

Institutt for bygg- og energiteknikk — Energi og miljø i bygg

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Webside: [www.oslomet.no](http://www.oslomet.no)

## MASTEROPPGAVE

OPPGAVENS TITTEL: <b>Optimalisering av hybridventilasjon for Klimahuset med hensyn til energibruk og termisk komfort, samt utforskning av dens ytelse mot fremtidige klimaendringer.</b>	DATO: 24.05.24
	ANTALL SIDER OG VEDLEGG: Sider: 55 Vedlegg: 4
FORFATTERE: Simen Sønderland	VEILEDER: Mehrddad Rabani

UTFØRT I SAMARBEID MED:	KONTAKTPERSON:
-------------------------	----------------

### KORT SAMMENDRAG:

Klimahuset på Tøyen benytter hybridventilasjon nå i dag, men fungerer ikke optimalt i henhold til inneklima og energibruk. En ny kontrollstrategi for hybridventilasjon er testet for Klimahuset på Tøyen med simuleringsverktøyet IDA-ICE. Den nye kontrollstrategien fokuserer på bruk av mekanisk ventilasjon med naturlig ventilasjon som støtte. Simuleringer viser til en oppnådd energibesparelse på 13% med hybridventilasjon kontra bruk av mekanisk ventilasjon. Kontrollstrategier gir god termisk komfort og tilfredsstillende dagens krav om luftkvalitet. Simulering av Klimahuset med fremtidig klima ga interessante resultater. I nære fremtid (2050) kan det forventes en energibesparelse på 19-21% med hybridventilasjon. I år 2100 kan energibesparelsen være opp mot 19-30%. Dette varierer etter de ulike fremtidige klimamodellene RCP 2.6, 4.5 og 8.6. På de varmeste dagene i år 2100 ser det ut til å være en utfordring å fjerne overskuddsvarme med hybridventilasjon. Dersom det tillates mer luftmengde fra det mekaniske anlegget kan det bedres. Med en godt gjennomført styringsstrategi kan hybridventilasjon være svaret på en mer energieffektiv drift i fremtiden.

### NØKKELOD:

**Hybridventilasjon**  
**Energibruk**  
**Fremtidig klima**

## Forord

Denne masteroppgaven er utført ved instituttet TKD i masterprogrammet Energi og Miljø i Bygg ved OsloMet. Masteroppgaven inngår i emnet MAEN5900 og ble fullført våren 2024. Jeg vil takke Mehrdad Rabani som intern veileder for et veldig godt samarbeid.

*Simen Sønderland*

---

Simen Sønderland

Oslo 24.mai 2024

## Sammendrag

De fleste bygg benytter balansert ventilasjon for å sørge tilfredsstillende luftkvalitet. Problematikken oppstår ved at de fleste systemer er dårlig optimalisert som fører til unødvendig energibruk. I USA og Europa går omtrent 40% av all energibruk til drift av bygg. Av den totale energibruken i bygg går 50% av dette til HVAC-systemer (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Hybridventilasjon har fått en økt interesse på grunn av dens evne til å redusere byggets energibruk. Ved å kombinere bruk av mekanisk ventilasjon og naturlig ventilasjon kan en strategisk og gjennomført kontrollstrategi for hybridventilasjon bidra til å redusere byggets energibruk.

De fleste bygg i Norge med hybridventilasjon ser ut til å bruke en mixed-mode strategi som har gitt nokså gode resultater. Utfordringene blant de fleste case-studiene ser ut til å være dårlig luftkvalitet på vintertid og stor risiko for høye innendørstemperaturer på sommertid.

Klimahuset på Tøyen benytter hybridventilasjon nå i dag, men fungerer ikke optimalt i henhold til inneklimate og energibruk. I Denne masteroppgaven skal en ny kontrollstrategi for hybridventilasjon testes for Klimahuset samt et typisk kontorbygg i Norge med simuleringsverktøyet IDA-ICE. Den nye strategien baseres på hovedsak bruk av det mekaniske anlegget med hjelp fra naturlig ventilasjon gjennom vindusåpning. Kontrollstrategien skal simuleres med nåværende klima og fremtidig klima for å undersøke dens motstandsdyktighet mot klimaendringer.

Resultatene for hybridventilasjon med nåværende klima ga gode resultater i henhold til inneklimate. Den nye kontrollstrategien for hybridventilasjon kontra bruk av mekanisk ventilasjon ser ut til å gi vesentlig større energibesparelse simulert for et typisk kontorbygg sammenliknet med Klimahuset på Tøyen. Energibesparelsen ble opp mot 13.1% for Klimahuset og 40% for kontorbygget. Den store forskjellen skyldes at kontorlandskapet har vesentlig høyere internlaster sammenliknet med Klimahuset og dermed har større nedkjølingsbehov og ventileringsbehov.

Simuleringer med fremtidig klimadata viste til interessante resultater for hybridventilasjon. Klimahuset simulert med den nye kontrollstrategien for hybridventilasjon i 2050 ga en energibesparelse på 19-21% kontra bruk av mekanisk ventilasjon. Dette varierer etter de ulike fremtidige klimamodellene RCP 2.6, 4.5 og 8.5. I år 2100 kan energibesparelsen være opp mot 19-30%. Luftkvaliteten viser til å være god men også bedre i fremtiden på grunn av mer vinduslufting, spesielt i sommerperioden. Den termiske komforten er tilfredsstillende i den nære fremtiden (2050), men i 2100 med RCP 4.5 og 8.5 sliter hybridventilasjon med å kaste ut overskuddsvarmen som fører til nedsatt termisk komfort i de ekstremt varme sommerdagene. Med en godt gjennomført styringsstrategi kan hybridventilasjon være svaret på en mer energieffektiv drift i fremtiden

# Abstract

Most buildings use balanced ventilation to ensure satisfactory air quality. The problem arises because most systems are poorly optimized, leading to unnecessary energy consumption. In the USA and Europe, approximately 40% of all energy consumption is used for building operations. Of the total energy use in buildings, 50% goes to HVAC systems (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Hybrid ventilation has gained increased interest due to its ability to reduce a building's energy consumption. By combining the use of mechanical ventilation and natural ventilation, a strategic and well-implemented control strategy for hybrid ventilation can help reduce a building's energy consumption.

Most buildings in Norway with hybrid ventilation seem to use a mixed-mode strategy that has yielded fairly good results. The challenges among most case studies appear to be poor air quality in winter and a high risk of high indoor temperatures in summer.

The Climate House at Tøyen currently uses hybrid ventilation but does not function optimally in terms of indoor climate and energy use. In this master's thesis, a new control strategy for hybrid ventilation will be tested for the Climate House at Tøyen as well as a typical office building in Norway using the simulation tool IDA-ICE. The new strategy is primarily based on using the mechanical system with the aid of natural ventilation through window opening. The control strategy will be simulated with current and future climates to examine its resilience to climate change.

The results for hybrid ventilation with the current climate showed good results regarding indoor climate. The new control strategy for hybrid ventilation compared to the use of mechanical ventilation appears to provide significantly greater energy savings simulated for a typical office building compared to the Climate House. The energy savings were up to 13.1% for the Climate House and 40% for the office building. The large difference is due to the office landscape having significantly higher internal loads compared to the Climate House, thus having greater cooling and ventilation needs.

Simulations with future climate data showed interesting results for hybrid ventilation. The Climate House simulated with the new control strategy for hybrid ventilation in 2050 resulted in an energy savings of 19-21% compared to the use of mechanical ventilation. This varies according to the different future climate models RCP 2.6, 4.5, and 8.5. By the year 2100, energy savings could be up to 19-30%. The air quality is expected to be good and even better in the future due to more window openings, especially during the summer period. Thermal comfort is satisfactory in the near future (2050), but in 2100, for RCP 4.5 and 8.5, hybrid ventilation struggles to expel excess heat, leading to reduced thermal comfort on extremely hot summer days. With a well-executed control strategy, hybrid ventilation can be the answer to more energy-efficient operations in the future.

# Innhold

<b>Forord</b> .....	<b>I</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Teori</b> .....	<b>2</b>
2.1 Ventilasjonsprinsipper- og løsninger.....	2
2.1.1 Naturlig ventilasjon .....	2
2.1.2 Mekanisk avtrekksventilasjon .....	5
2.1.3 Balansert mekanisk ventilasjon .....	5
2.1.4 Hybridventilasjon .....	6
2.2 Inneklima.....	6
2.2.1 Atmosfærisk miljø.....	7
2.2.2 Termisk miljø .....	7
2.3 Uteklima .....	11
2.3.1 Fremtidig klima .....	12
2.4 Krav og anbefalinger .....	13
2.4.1 Luftmengde .....	13
2.4.2 Operativ temperatur.....	14
2.4.3 Trekk .....	14
2.4.3 Vertikal temperaturdifferanse.....	15
<b>3 litteratursøk</b> .....	<b>16</b>
3.1 Eksempelbygg med hybridventilasjon .....	17
3.1.1 Skonnertveien Hageby i Grimstad.....	17
3.1.2 Brunla ungdomsskole .....	18
3.1.3 Mesterfjellet skole .....	19
3.1.4 Grong skole .....	20
3.1.5 Solstad barnehage.....	20
3.1.6 Kontorbygg i Glasgow .....	21
3.2 Hybridventilasjon med fremtidig klima .....	22
3.3 Konklusjon av litteratursøk .....	24
3.4 Klimahuset på Tøyen.....	25
3.5 Manglende forskningsområder.....	27
<b>4 Metode</b> .....	<b>28</b>
4.1 Kontorlandskapet.....	28
4.1.1 Ventilasjonsstrategi .....	29
4.1.3 Kontrollstrategi for vindusåpning.....	30
4.2 Klimahuset i Tøyen .....	31
4.2.1 Forutsetninger for Klimahuset.....	33

4.2.2 Ventilasjonsstrategi .....	34
4.3 Klimadata .....	35
4.3.1 Simulering med fremtidig klimadata .....	36
<b>5 Resultat.....</b>	<b>37</b>
5.1 Simulering av et typisk kontorlandskap .....	37
5.1.1 Termisk klima.....	38
5.1.2 Luftkvalitet .....	39
5.1.2 Energibruk og besparelse .....	39
5.2 Simuleringer av Klimahuset .....	40
5.2.1 Resultat av nåværende styringsstrategi for Klimahuset .....	40
5.2.2 Klimahuset med ny kontrollstrategi .....	41
5.2.2.1 Energibruk og besparelse .....	45
5.3 Resultat for simulering av Klimahuset med fremtidig klima .....	45
5.3.1 Termisk komfort.....	46
5.3.2 Luftkvalitet .....	47
5.3.3 Energi .....	49
<b>6 Diskusjon.....</b>	<b>51</b>
6.1 Feilkilder .....	52
<b>7 Konklusjon.....</b>	<b>53</b>
Referanseliste .....	54

## Figuroversikt

Figur 2.1, Ensidig naturlig ventilasjon [4].	3
Figur 2.2, Kryssventilasjon [4].	3
Figur 2.3, Oppdriftsventilasjon [4].	4
Figur 2.4, Illustrering av trykkendringer ved konstant innendørstemperatur [1].	4
Figur 2.5, Redusert ytelse ved ulike innetemperaturen [11].	9
Figur 2.6, Tabell B.1 NS-EN 16798 til venstre og PPD indeksen til høyre NS-EN ISO 7730 [10].	9
Figur 2.7, Adaptiv termisk komfort NS-EN 16798 Figur B.1 [30].	10
Figur 2.8, Klima-klassifiserings kart [14].	12
Figur 2.9, Endring av temperatur og nedbørmengde ved RCP 2.6 og RCP 8.5 [14].	13
Figur 3.1, Rapportert energibesparelse med Hybridventilasjon sammenlignet med rent mekanisk med ulike klima-klassifikasjoner [20].	16
Figur 3.2, Skonnertveien Hageby i Grimstad [16].	17
Figur 3.3, Automatisk styrt vindu for luftinntak av bygget og værstasjonen på taket [17].	18
Figur 3.4, Mesterfjellet skole [18].	19
Figur 3.5, Grong skole [4].	20
Figur 3.6, Solstad barnehage [25].	21
Figur 3.7, Energibruk for kjøling og oppvarming med mixed-mode (venstre) sammenlignet med full mekanisk ventilasjon(høyre) simulert med nåværende og fremtidig klima [23].	23
Figur 3.8, Termisk komfort i PPD ved ulike årsperioder [23].	23
Figur 3.9, Kartlegging av Klimahuset på Tøyen [27].	26
Figur 4.1, IDA-ICE modellen for kontorlandskapet	28
Figur 4.2, IDA-ICE Kontroll for nattventilasjon.	30
Figur 4.3, IDA-ICE Kontroll for vindusåpning.	31
Figur 4.4, IDA-ICE modellen for Klimahuset på toppen og plantegning med soneoppdeling nederst [27].	32
Figur 4.5, Makro for nåværende kontrollstrategi for vindusåpning i Klimahuset.	33
Figur 4.7, Schedule for internbelastning fra belysning og utstyr.	34
Figur 4.8, Månedsgjennomsnittstemperatur for år 2050 til venstre og 2100 til høyre.	36
Figur 5.1, Kontrollsignal for vindusåpning til venstre og tilluft til kontoret på høyre	37
Figur 5.2, Operativ temperatur med hybridventilasjon delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 figur B.1	38
Figur 5.3, Operativ temperatur med mekanisk ventilasjon delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 Tabell B.1	39
Figur 5.4, «Carpet plot» for luftkvalitet målt i ppm CO <sub>2</sub>	39
Figur 5.5, Sammenliknet energibruk for hybridventilasjon i blå og fullt mekanisk i grå.	40
Figur 5.6, Operativ temperatur i amfiet til venstre og åpningsgrad av vinduer i Amfiet til høyre.	41
Figur 5.7, Operativ temperatur i Klimahuset med HV delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 figur B.1	42
Figur 5.8, Operativ temperatur i Klimahuset med MV delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 Tabell B.1.	42
Figur 5.9, Detaljert soneanalyse for opplevd trekk i Klimahuset med hybridventilasjon i 23. januar.	43
Figur 5.10, Detaljert soneanalyse for opplevd trekk i Klimahuset med hybridventilasjon 20. juli, Venstre bilde er ved himlingen og høyre bilde er 1 meter over gulvet.	43
Figur 5.11, Vertikal temperaturdifferanse med vindusåpning i Amfiet for 25. januar	44
Figur 5.12, «Carpet plot» for luftkvalitet målt i ppm CO <sub>2</sub> for Klimahuset med HV.	44
Figur 5.14, Energibruket til Klimahuset med mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon	45
Figur 5.15, Antall prosent av okkupasjonstiden der vinduene er åpne for ulike klimadata	46
Figur 5.16, Termisk komfort målt i PPD for Klimahuset med HV til venstre og MV til høyre, simulert med ulike fremtidige klimamodeller.	47
Figur 5.17, «3D carpet plot» for luftkvalitet i ppm <sub>CO2</sub> med hybridventilasjon og mekanisk ventilasjon for ulike fremtidig klimasenario.	48
Figur 5.18, Energibruk for Klimahuset med mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon simulert med ulike fremtidige klimasenarioer.	49
Figur 5.19, Energibruken til Klimahuset med hybridventilasjon delt opp i energiposter med fremtidig klima.	50

## Tabelloversikt

Tabell 2.1, Standardverdier for bekledding, Tabell B.1 NS-EN ISO 7730 [10]. .....	8
Tabell 2.2, Standardverdier for metabolisme, Tabell C.1 NS-EN ISO 7730 [10]. .....	8
Tabell 2.3, PMV-Indeks .....	9
Tabell 2.4, Anbefalte verdier for operativ temperatur, TEK 17 § 13-4 .....	14
Tabell 2.5, Anbefalt operativ temperatur og maksimal middellufthastighet, NS-EN ISO 7730 [10]. .....	14
Tabell 2.6, NS-EN ISO 7730 grenseverdier for termisk komfort for ulike kategorier. ....	15
Tabell 2.7, Anbefalinger for maksimal vertikal temperaturdifferanse, NS-EN ISO 7730 .....	15
Tabell 4.1, Egenskaper for klimaskallet og internlaster .....	29
Tabell 4.2, Setpunktverdier for mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon for kontorlandskapet.....	29
Tabell 4.3, Klimaskallet til Klimahuset. ....	33
Tabell 4.4, Internlaster for Klimahuset. ....	34
Tabell 4.5, Setpunktverdier for ventilasjonsstrategiene [27].....	35
Tabell 5.1, Oversikt over termiske egenskaper for amfiet og utstillingen med HV og MV.....	42



## **Forkortelser**

HVAC – Heating, ventilation and air conditioning

WHO - World Health Organization

SBS - Sick Building Syndrome

PM - Partical Matter

MET - Metabolism

Clo - Clothing

PMV - Predicted Mean Vote

PPD - Predicted Percentage Dissatisfied

PD - Percentage dissatisfied

DR - Draught rate

SFP – Specific Fan Power

RCP - Representative Concentration Pathway

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

PPM - Parts Per Million

VAV - Variable Air Volume

ACH – Air Change per Hour

MV – Mekanisk ventilasjon

HV - Hybridventilasjon

# 1 Introduksjon

Energibruken har økt drastisk siden 1980. Med en økende populasjon har den globale energibruken og CO<sub>2</sub> utslipp økt med 85% og 75%, henholdsvis, fra år 1980 til 2012 [32]. Drift av bygg er ansvarlig for opp mot 40% av den totale energibruken i Europa og USA [32]. Av det totale energibruket i bygg går 50% av energibruken til HVAC systemer (Heating, Ventilation and Air Conditioning) [33]. Siden vi tilbringer opp mot 90% av tiden innendørs har det vært et stort fokus på installasjon av HVAC systemer i bygg [32]. Fokuset har vært å opprettholde et godt inneklima ettersom at det er blitt vist at nedsatt termisk komfort har en stor påvirkningsevne på produktivitet i arbeidsmiljøet samt dårlig luftkvalitet medfører risiko for nedsatt kognitiv evne [11, 9]. Den globale klimaendringen vil ha en stor påvirkning av oppvarming- og kjølebehovet for bygg. I neste århundre vil det globale oppvarmingsbehovet synke med 34% og kjølebehovet øke med 72% for boligbygg [32]. Hybridventilasjon har fått en økt oppmerksomhet som en løsning for å bidra til å redusere energikostnadene i bygg. Ved å redusere bruk av mekanisk ventilasjon og benytte naturlig ventilasjon når det lønner seg kan det bidra til å redusere energiforbruket. Solstad barnehage benytter hybridventilasjon og viser til en energibesparelse på 14% men likevel oppstår det noen problemer med inneklimaet [25]. For å kunne benytte hybridventilasjon må det planlegges godt. Bygget må ha gode arkitektoniske egenskaper og en god kontrollstrategi for vindusåpning/fasadeåpning.

Klimahuset på Tøyen utnytter en hybrid løsning for ventilasjon med automatisk styrte vinduer. Ventilering av bygget gjøres primært gjennom vinduslufting med mekanisk ventilasjon som støtte. Zolykha Ahmadi i sin master undersøkte inneklimaet og energibruken til Klimahuset, dette ble gjort ved simuleringer på IDA-ICE, spørreundersøkelse og målinger utført på befaring [27]. Hva Zolykha fant var at den nåværende styringsstrategien har stort forbedringspotensialet ettersom den hybride løsningen medførte nedsatt termisk komfort med mye trekk og dårlig luftkvalitet. Zolykha simulerte Klimahuset med 2 nye styringsstrategier for hybridventilasjon og fikk bedre resultater i henhold til inneklima og energibesparelse. Den mulige energibesparelsen ble beregnet å være på 9 og 12% basert på 2 ulike hybridsenariorer [27].

I denne masteren skal en ny kontrollstrategi for vindusåpning laget av Mehrdad Rabani testes for Klimahuset i tøyen med simuleringstøytet IDA-ICE. Potensiell energibesparelse, luftkvalitet og termisk komfort skal undersøkes ved implementering av den nye kontrollstrategien.

Kontrollstrategien skal først og fremst undersøkes for et typisk kontorbygg i Norge. Deretter skal samme kontrollstrategi testes for Klimahuset på Tøyen med nåværende klima og fremtidig klima for å undersøke hvor tilpasningsdyktig kontrollstrategien er.

## 2 Teori

Dette kapittelet skal dekke teori som omhandler de ulike ventilasjonsprinsippene, inneklima, klimaet samt relevant lovverk.

### 2.1 Ventilasjonsprinsipper- og løsninger

Hovedformålet med å ventilere et bygg er å skifte ut bruktluft med friskluft. Dette skal gjøres for å sikre tilfredsstillende luftkvalitet for brukerne av hensyn til både komfort og helse, men også hindre risikoen for fuktskader og kondens i vegger som er avgjørende for byggets levealder [2]. Det er 4 ulike strategier for å ventilere et bygg, disse er naturlig ventilasjon, mekanisk avtrekksventilasjon, balansert ventilasjon og hybridventilasjon [1].

#### 2.1.1 Naturlig ventilasjon

Naturlig ventilasjon er et ventilasjonsprinsipp som utnytter naturens krefter til å drive friskluft inn i bygget og ut. Naturlig ventilasjon er den eldste formen for ventilasjon, Bygg var ikke like tette som de er i dag [1]. Drivkreftene bak naturlig ventilasjon er termisk oppdrift og vindkrefter. Friskluft blir drevet inn i bygget gjennom åpninger som f.eks. vinduer, ventiler og utettheter i bygget.

Fordelen med naturlig ventilasjon er at den er enkel, krever tilnærmet ingen vedlikehold og krever ingen vifte som gir mindre støy. Ulempene er at den er svært avhengig av klimaet, det er stor risiko for redusert komfort, mangelfull ventilering og høyt energitap [3]. Klimaet i Norge er klassifisert som et kaldtemperert klima som gjør naturlig ventilasjon en utfordrende ventilasjonsløsning med risiko for trekk og kan gi høye energikostnader på vinteren.

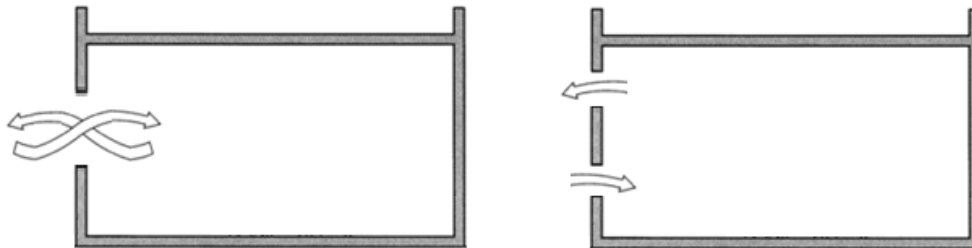
Det finnes tre fundamentale strategier for naturlig ventilasjon [4].

- Ensidig ventilasjon
- Kryssventilasjon
- Oppdriftsventilasjon

##### 2.1.1.1 Ensidig ventilasjon

Ensidig ventilasjon er den enkleste strategien, men også den minst effektive for naturlig ventilasjon. Figur 2.1 presentert under illustrerer prinsippet til ensidig ventilasjon [4]. Friskluft trenges inn i bygningskroppen og bruktluft forlater bygget gjennom samme side. Her er termisk oppdrift den største drivkraften, spesielt på vinteren hvor temperaturforskjellen mellom inne og ute er størst. På sommeren er det lufttrykk fra vind som driver luftbytte inn i bygningskroppen [6].

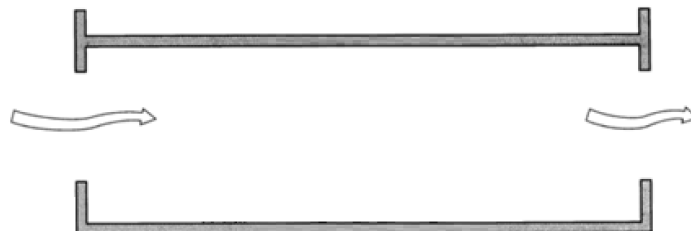
Fordelen med denne strategien er at bygg med cellekontorer har selv mulighet til å manuelt regulere temperatur og ventilering etter behov. Ulempene med ensidig ventilasjon er at drivkreftene er såpass svake at ventilering vil kun være tilstrekkelig nær åpningen, og vil muligens ikke trenge inn i andre rom. Effektiviteten av ensidig ventilering bedres dersom det er to åpninger i fasaden med en høydeforskjell, dette øker den termiske oppdriften [4]. Termisk oppdrift skal videre forklares i kapittel 2.1.1.2.



Figur 2.1, Ensidig naturlig ventilasjon [4].

### 2.1.1.2 Kryssventilasjon

Kryssventilasjon tar i større grad utnyttelse av vindtrykk som drivkrefter for å ventilere bygget. Her vil friskluft trenge inn i bygningsskallet fra lo-side fasaden og ut den motsatte fasaden som er le-side [6]. Ved lo siden vil det danne et overtrykk på fasaden og ved le siden vil den dannes et undertrykk som vil føre luftstrømmer igjennom bygget eller rommet. Prinsippet til kryssventilasjon er illustrert i figur 2.2.



Figur 2.2, Kryssventilasjon [4].

Effektiviteten av kryssventilasjon er av stor grad avhengig av det geografiske område, omgivelser og orientering av fasadene. Det dynamiske trykket fra vind på fasaden er gitt ved formel 1. Desto høyere trykket er desto mer luftskifte vil medføres [6].

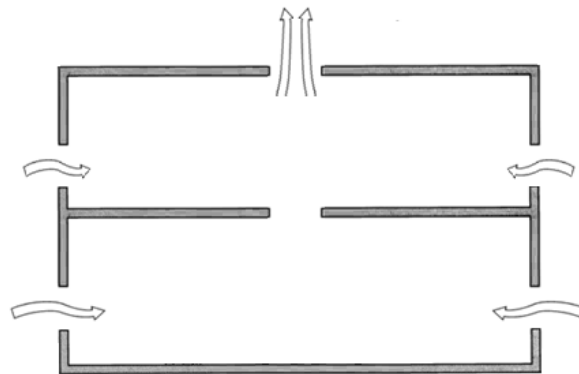
$$P_v = C_p * \frac{1}{2} * \rho_u * V_{ref}^2 \text{ [Pa]} \quad (1)$$

Hvor:

- $P_v$  er det dynamiske trykket fra vindkrefter. [Pa]
- $C_p$  er det statiske trykkoeffisienten. [Pa]
- $\rho_u$  er massetettheten til luften ute. [Kg/m<sup>3</sup>]
- $V_{ref}$  er referanse vindhastigheten. [m/s]

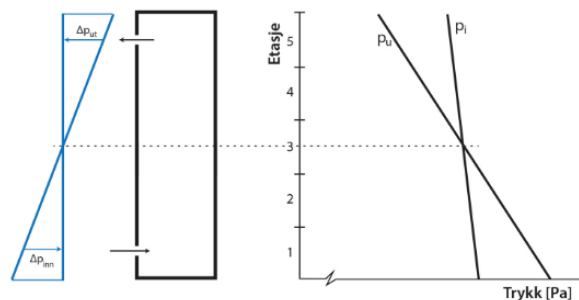
### 2.1.1.3 Oppdriftsventilasjon

Oppdriftsventilasjon benytter den termiske oppdriften som drivkraft for ventilasjon av bygget. Denne form for naturlig ventilering er den mest effektive og mest brukt i praksis. Kaldt-temperert friskluft trekkes inn i bygningskallet gjennom ventiler, vinduer og andre åpninger og deretter blir luften varmet opp. Oppvarmingen av luften driver luften ut igjennom vindtårn, skorsteinspipe eller åpning fra øverste etasje [6]. Figur 2.3 illustrerer prinsippet til oppdriftsventilasjon.



Figur 2.3, Oppdriftsventilasjon [4].

Figur 2.4 presentert under illustrerer trykkendringene til luften ved endring av temperatur [1]. Ved åpningen nederst er det et positivt trykk med luft som strømmer inn i bygningskroppen, ettersom luften gjennomgår en temperaturøkning i bygget vil luftens tetthet  $\rho$  minkes som medfører større lufttrykk innendørs.



Figur 2.4, Illustrering av trykkendringer ved konstant innendørstemperatur [1]

Hovedprinsippet til den termiske oppdriften er luftens endring av tetthet  $\Delta\rho$ . Formel 2 gir luftens tetthet ved gitt temperatur [1].

$$\rho_T = \rho_{273K} * \frac{273K}{T} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2)$$

Hvor:

$\rho_T$  er luftens tetthet.  $[\text{kg/m}^3]$

$\rho_{273K}$  er luftens tetthet ved 0°C. (ca 1.29)  $[\text{kg/m}^3]$

$T$  er luftens temperatur.  $[\text{K}]$

For å kunne bestemme effektiviteten av den naturlige ventilasjonen må den totale trykkforskjellen  $\Delta P$  undersøkes. Formel 3 kan brukes for å vurdere den totale trykkforskjellen dersom det antas konstant innendørstemperatur [6].

$$\Delta P_h = \rho_u * g * (h_0 - h) * \frac{\Delta T}{T_i} = \rho_i * g * (h_0 - h) * \frac{\Delta T}{T_u} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Hvor:

$\Delta P_h$  er trykkforskjellen. [Pa]

$\rho_u$  er luftens tetthet ute. [Kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_i$  er luftens tetthet inne. [Kg/m<sup>3</sup>]

$T_i$  er innendørstemperatur. [K]

$T_u$  er utendørstemperatur. [K]

$\Delta T$  er forskjellen mellom innendørs- og utendørstemperatur. [K]

### 2.1.2 Mekanisk avtrekksventilasjon

Mekanisk avtrekksventilasjon baseres på bruk av vifter som drivkraft og er av den grunn uavhengig av klimaet i motsetning til naturlig ventilasjon [7]. Virkemåten til mekanisk avtrekksventilasjon er at den har en vifte som driver luft fra kjøkken og våtrom ut av bygningskroppen og dette skaper et undertrykk i bygget. Undertrykket driver friskluft inn i bygget gjennom åpninger som ventiler, vinduer og utettheter i bygget [2].

Fordelen med mekanisk avtrekksventilasjon er at det er lett å installere og kan lett reguleres etter behov. Ulempen er at på vintertid vil det bli stor risiko for trekk, det er ingen mulighet for varmegjenvinning som øker oppvarmingsbehovet. Undertrykket produsert fra viftene kan trekke ut mer radongass fra grunnen og viften eller viftene kan gi lokalt støy dersom det ikke er noen form for støydemping i anlegget [2].

### 2.1.3 Balansert mekanisk ventilasjon

Den mest brukte ventilasjonsmetoden er balansert ventilasjon, både for boliger og næringsbygg [1]. Prinsippet bak balansert ventilasjon er at omtrent samme mengde tilluft og avtrekksluft er drevet mekanisk med hver sin vifte [3]. Dette gir mulighet til å behandle luften med komponenter som varmegjenvinner, varme- og kjølebatteri, filter og befukter. Luften blir distribuert inn og ut av bygget gjennom kanalføringer. Varmegjenvinning fra den varme avtrekksluften til den kalde tilluften har en virkningsgrad på 80-85% for moderne anlegg, dette gjør balansert ventilasjon svært fordelaktig spesielt i land med kald-temperert klima som Norge [1].

Fordelene med balansert ventilasjon er at den har mulighet til å behandle tilluften som gir god komfort og helse. Det kan benyttes en varmegjenvinner som reduserer oppvarmingsbehovet med 80%. Anlegget kan produsere lite støy ved bruk av lydfeller/dempere og har gode muligheter for regulering etter behov på både rom- og bygningsnivå. Ulempene inkluderer et økt behov for vedlikehold, samt høyere

kostnader. Det er større risiko for funksjonssvikt dersom nødvendig vedlikehold ikke opprettholdes. Ventilasjonsaggregatet kan forårsake mye støy dersom det ikke er dimensjonert tilstrekkelig med lydfeller/dempere [3].

#### **2.1.4 Hybridventilasjon**

Hybridventilasjon har som mål å kombinere fordelene ved både mekanisk ventilasjon og naturlig ventilasjon. Med hybridventilasjon så gjenstår ulempene med begge prinsipper, men ved riktig kontrollstrategi kan ulempene minimaliseres. Målsettingen med hybridventilasjon er å redusere den totale viftebruken samt kjølebehovet ved å utnytte naturens drivkrefter når omstendighetene er tilfredsstillende. Ved mekaniske ventilasjonsanlegg kan vifteeffekten utgjøre opp til 15% av byggets totale energiforbruk [5]. Hybridventilasjon sammenlignet med ren naturlig ventilasjon er mer robust ettersom den vil kunne sikre tilfredsstillende luftkvalitet og temperatur selv når de eksterne faktorene ikke er til tilstrekkelige [5].

Hybridventilasjon deles opp i tre ulike prinsipper [4]:

- ***Naturlig og mekanisk ventilasjon (mixed-mode).***

Denne formen for strategi baserer seg på to adskilte systemer hvor kontrollstrategien er å bytte mellom bruk av naturlig ventilasjon eller mekanisk ventilasjon.

- ***Vifte-assistert naturlig ventilasjon.***

Prinsippet baseres på bruk av et naturlig ventilasjonssystem med en assisterende vifte dersom de eksterne forholdene for naturlig ventilasjon ikke er sterke nok.

- ***Mekanisk ventilasjon med støtte fra naturlige drivkrefter.***

Dette prinsippet er basert på et mekanisk ventilasjonssystem som utnytter de naturlige drivkreftene slik at det dekker litt av ventilasjonsbehovet eller kjølebehovet når de rette omstendighetene er der.

## **2.2 Inneklima**

Å holde et godt inneklima er essensielt ettersom vi befinner oss innendørs opp mot 90% av tiden. Inneklimaet har derfor stor betydning på helse og velvære. WHO (World Health Organization) definerer begrepet inneklima at det omfattes av termisk-, atmosfærisk-, akustisk-, aktinisk- og mekanisk miljø.

Denne oppgaven skal i hovedsak sette lys på det atmosfæriske- og termiske miljøet.

### 2.2.1 Atmosfærisk miljø

Atmosfærisk miljø er det overordnede begrepet som omhandler luftkvalitet. Luftkvalitet har en stor påvirkning på helse, komfort og produktivitet. Dårlig luftkvalitet kan påvirke helsen på forskjellige måter, dette inkluderer hodepine, kvalme, nesetetthet, øyeproblemer, halsproblemer og mer. Dette er symptomer som er knyttet til fenomenet SBS (Sick building syndrome) [8]. Dette fenomenet ble først identifisert av WHO i 1984. Det har blitt rapportert symptomer som beskriver SBS helt siden 1970 tallet. Arbeidere hadde disse symptomene når de startet å jobbe på arbeidsplassen og ble symptomfri etter at de forlot [8]. Jose Guillermo cedeño laurent et al fant at eksponering av høye mengder med luftpartikler (PM2.5) og CO<sub>2</sub> var tilknyttet til redusert kognitive funksjoner som responstid, minne, treffsikkerhet, oppmerksomhet og utførelse av kognitive lederfunksjoner [9].

For at det atmosfæriske miljøet skal være tilfredsstillende må det være tilstrekkelig med luftskifte samt filtrering av luften. Da forsørges det at forurensing fra mennesker og materialer blir fjernet og byttet med friskluft.

### 2.2.2 Termisk miljø

Det termiske miljøet omfatter de parametrene som har innflytelse på menneskets varmebalanse [1]. Disse parametrene deles inn i miljøfaktorer og personfaktorer. Miljøfaktorer inkluderer Lufttemperatur, strålingstemperatur, lufthastighet og relativ fuktighet. Personfaktorer består av bekledding og aktivitetsnivå. Når en skal vurdere det termiske miljøet må disse parametrene vurderes [1].

Miljøfaktorene skal vurderes etter de forventede personfaktorer til rommet eller bygget.

Når en skal vurdere temperatur i et rom må både lufttemperaturen og middelstråletemperaturen tas i betraktning. Den operative temperaturen er middelverdien av lufttemperaturen og middelstråletemperaturen og blir brukt som dimensjonerende temperatur [1].

Bekledding er gitt ved parameteren «clo» og beskriver isolasjonsevne til bekleddingen av personer. 1 clo tilsvarer en isolasjonsevne på 0.155 m<sup>2</sup>\*K/W [1]. Tabell 2.1 henviser til NS-EN ISO 7730 standardverdier for bekledding ved ulike kombinasjoner av pledd [10].



Tabell 2.1, Standardverdier for bekledning, Tabell B.1 NS-EN ISO 7730 [10].

Work clothing	$I_{cl}$		Daily wear clothing	$I_{cl}$	
	clo	$m^2 \cdot K/W$		clo	$m^2 \cdot K/W$
Underpants, boiler suit, socks, shoes	0,70	0,110	Panties, T-shirt, shorts, light socks, sandals	0,30	0,050
Underpants, shirt, boiler suit, socks, shoes	0,80	0,125	Underpants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0,50	0,080
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,90	0,140	Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155	Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear with long legs and sleeves, thermo-jacket, socks, shoes	1,20	0,185	Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes, cap, gloves	1,40	0,220	Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes	2,00	0,310	Underwear with long sleeves and legs, shirt, trousers, V-neck sweater, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
Underwear with long sleeves and legs, thermo-jacket and trousers, Parka with heavy quilting, overalls with heavy quilting, socks, shoes, cap, gloves	2,55	0,395	Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, vest, jacket, coat, socks, shoes	1,50	0,230

Metabolisme er gitt ved parameteren «Met» og forteller hvor mye energi som produseres per  $m^2$  kroppsareal. En gjennomsnittlig voksen person er  $1.75m^2$ . Tabell 2.2 henviser til NS-EN ISO 7730 standardverdier for metabolisme ut ifra gitt aktivitet [10].

Tabell 2.2, Standardverdier for metabolisme, Tabell C.1 NS-EN ISO 7730 [10].

Activity	Metabolic rate	
	$W/m^2$	met
Reclining	46	0,8
Seated, relaxed	58	1,0
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)	70	1,2
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)	93	1,6
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work, machine work)	116	2,0
Walking on level ground:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

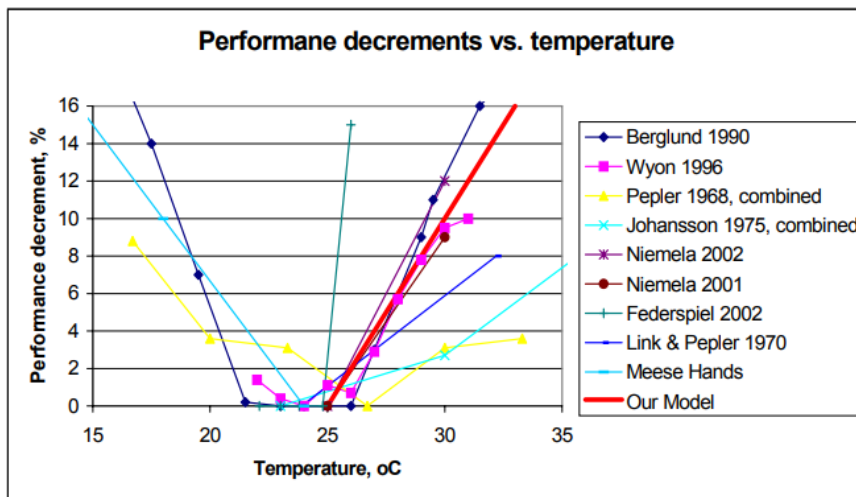
### 2.2.2.1 Termisk komfort

Et menneske oppnår termisk komfort når den indre varmeproduksjonen er lik varmetapet til omgivelsene [10]. Den termiske komforten blir vurdert med PMV-Indeksen som er en forkortelse for «Predicted Mean Vote». PMV-Indeksen er oppfunnet av den danske professoren O. P. Fanger og er basert på eksperiment med subjektive tilbakemeldinger av et stort antall mennesker ved eksponering for ulike termiske miljøer [1]. PMV-Indeksen består av en 7-punkt skala der -3 beskriver kaldt og +3 beskriver hett vist i tabell 2.3. Likningen for PMV baseres på lufthastighet, lufttemperatur, relativ fuktighet, operativ temperatur, bekledning og aktivitetsnivå [10].

Tabell 2.3, PMV-Indeks

Skala	-3	-2	-1	0	1	2	3
Vurdering	Kaldt	Kjølig	Litt kaldt	nøytralt	Litt varmt	varmt	Hett

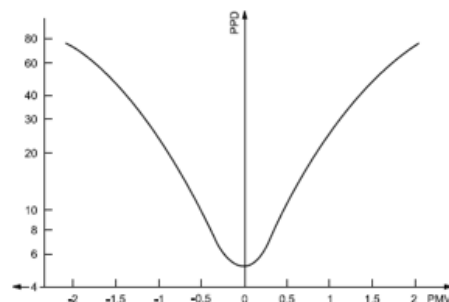
Seppänen et al samlet resultater fra en samling av studier hvor arbeideres produktivitet ble målt ved ulike innnetemperaturer, se figur 2.5 [11]. Figuren viser til et tydelig mønster, når termisk komfort ikke oppnås har det en stor påvirkning på ytelsen av de ansatte. Produktiviteten ble kvantifisert ved bruk av ulike tester, noen av dem var blant annet hukommelse-, addere-, multiplisere-, hastighetstest og evnen til å lære. Nedsatt produksjon er kritisk for bedriftseiere ettersom lønn til de ansatte er ofte den største utgiften.



Figur 2.5. Redusert ytelse ved ulike innnetemperaturer [11].

PPD står for «Predicted Percentage Dissatisfied» og forteller prosentandel misfornøyde ved gitt PMV. PPD indeksen er illustrert i figur 2.6 på høyre side [10]. PPD indeksen er basert på subjektive tilbakemeldinger ved ulike termiske omgivelser. Det vil alltid være noen misfornøyde selv ved PMV på 0. Derfor antas det at PPD vil alltid være minst 5% [1]. NS-EN 16798 tabell B.2 vist til venstre i figur 2.6 deler opp termisk komfort i ulike kategorier som benyttes for å vurdere termiske komfort.

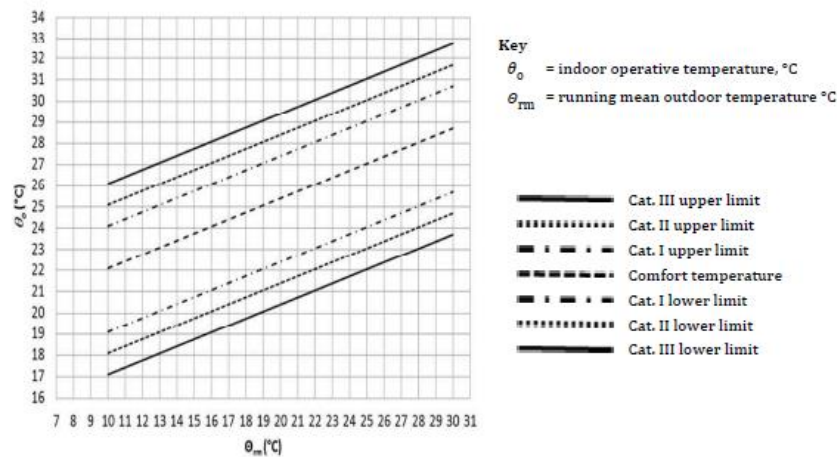
Category	Thermal state of the body as a whole	
	Predicted Percentage of Dissatisfied PPD %	Predicted Mean Vote PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < + 0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < + 0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < + 0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < + 1,0



Figur 2.6, Tabell B.1 NS-EN 16798 til venstre og PPD indeksen til høyre NS-EN ISO 7730 [10].

### 2.2.2.2 Adaptiv termisk komfort

NS-EN 16798 introduserer den adaptive termisk komfortmodellen, den skal gjelde for bygg som ikke har mekanisk kjøling [30]. Den går ut på at den termiske komforten varierer i henhold til utetemperaturen, dersom det er veldig varmt ute tillates det en høyere temperatur innendørs se figur 2.7. Den termiske komforten vurderes etter stillesittende aktivitet med mulighet for nedkjøling av bygget med bruk av f. eks vindusåpning [30]. Dersom et bygg utnytter en hybrid løsning og samtidig har mulighet for mekanisk kjøling kan den adaptive termisk komfort modellen allikevel benyttes.



Figur 2.7, Adaptiv termisk komfort NS-EN 16798 Figur B.1 [30].

### 2.2.2.3 Trekk

Ved høye luftstrømmer i et rom vil det oppleves trekk som er lite behagelig. DR% (Draught rate) modellen definert av NS-EN ISO 7730 predikerer prosentandel mennesker som vil oppleve termisk ubehag ved trekk. DR% kan regnes ved bruk av formel 4 [10].

$$DR\% = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0.05)^{0.62} (0.37 * \bar{v}_{a,l} * T_u + 3.14) \quad (4)$$

Hvor:

$t_{a,l}$  er lokal lufttemperatur [°C].

$\bar{v}_{a,l}$  er lokale gjennomsnittslufthastigheten [m/s].

$T_u$  er turbulens intensitet [%].

#### 2.2.2.4 Vertikal temperaturdifferanse

Høy vertikal temperaturdifferanse mellom hode og ankler vil forårsake lokalt ubehag for stillesittende personer [1]. Standardisert målepunkt for den vertikale temperaturdifferansen er 0.1 meter over bakket og 1.1 meter over bakken. Vindusåpning med kald utetemperatur kan gi stor vertikal temperaturdifferanse og er derfor en viktig parameter å undersøkes i denne oppgaven. Prosentandel misfornøyde (PD) som en funksjon av den vertikale temperaturdifferansen er gitt av formel 5 [10].

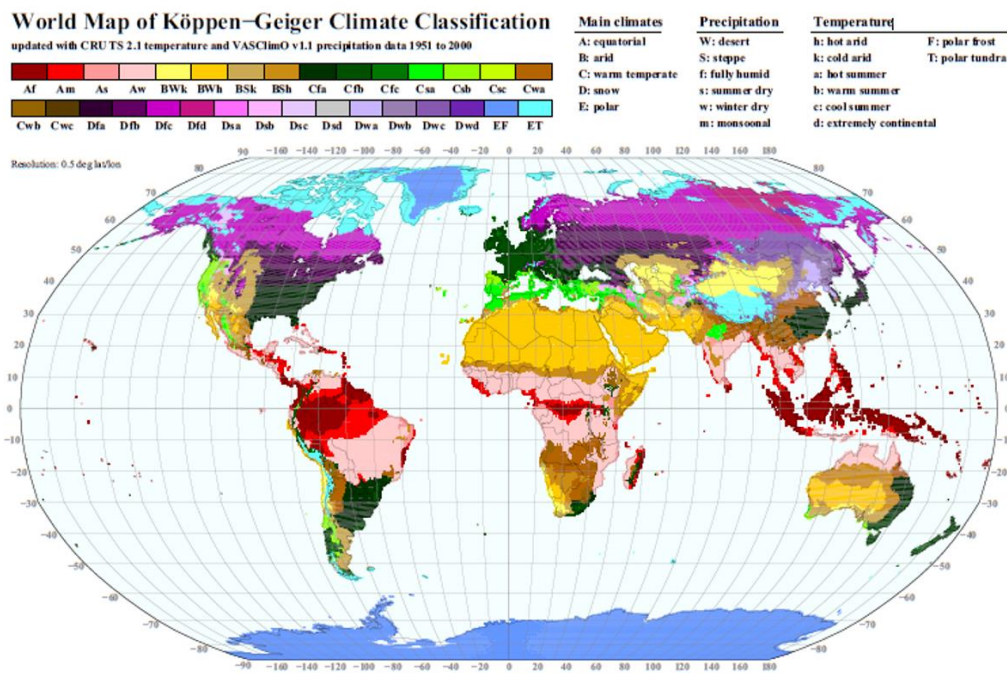
$$PD = \frac{100}{1 + e^{5.76 - 0.856 \cdot \Delta t_{a,v}}} \quad [\%] \quad (5)$$

Hvor:

$\Delta t_{a,v}$  er den vertikale temperaturdifferansen [-].

### 2.3 Uteklima

Klimaet er definert som middelerverdier av ulike parametere som forteller værtilstanden i et område. Disse middelerverdiene er brukt for en periode på 30 år. Disse middelerverdiene kan da brukes til å predikere ulike utfaktorer som temperatur, nedbør og vind [13]. I Norge er det store variasjoner i klimaet, både geografisk og over tid. Norge strekker seg over 13 breddegrader med masse fjell og kystareal mot Golfstrømmen. Fra normalperioden 1961-1990 var den høyeste årsmiddeltemperaturen på 6-8°C langs kysten i sør og den laveste på -6°C i Finnmark. Golfstrømmen er sentral for Norges klima, uten den hadde Norge hatt et kaldere klima. Strømmen fra sør frakter varme opp som videre varmer opp luftmasser langs kystkanten. Dette bidrar til en mer jevn temperatur slik at temperaturen ikke synker så mye på vintersesongen [13]. Forskeren Wladimir köppen presenterte et klima-klassifiserings kart i 1961, Denne har blitt oppdatert og digitalisert av Kottekk et al se figur 2.8 [14]. Norge klassifiseres som hovedsakelig Dfd som beskriver et klima som er: kald-temperert, fuktig og har en kald vinter. Langs kystkanten klassifiseres det som Cfb som beskriver et klima som er: varm-temperert, fuktig og har varm sommer.

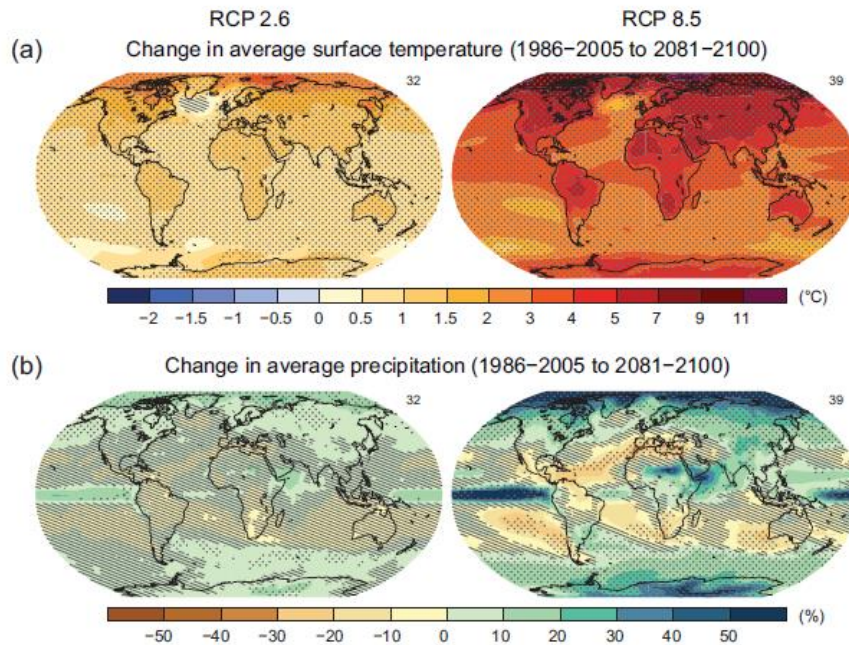


Figur 2.8, Klima-klassifiserings kart [14].

### 2.3.1 Fremtidig klima

Klimaet endrer seg kontinuerlig. De siste hundre årene i Norge har årsmiddeltemperaturen steget med 0.8°C og årsnedbøren økt med 20% [13]. I denne perioden har flere land gjennomgått en industrialisering som har økt karbondioksidutslippene i stor grad. Bruk av fossile brennstoffer henter opp lange karbonkjeder fra bunnen av havet og brenner de til korte karbonkjeder i form av CO<sub>2</sub> gass som har vesentlig mindre tetthet, dette forårsaker klimagasseffekten som øker jordens temperatur.

RCP (Representative Concentration Pathways) ble introdusert av IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) I den femte vurderingsrapporten fra FNs klimapanel i 2014 [14]. RCP presenterer ulike scenarier for fremtidig klima ut ifra fortsettende økning av klimagassutslipp. RCP brukes som et viktig verktøy for å prosjektere fremtidig klimadata. Det er i hovedsak fire RCP utviklingsbaner: RCP- 2.6, 4.5, 6 og 8.5. Disse defineres etter det totale strålingspådrivet oppnådd i år 2100. Strålingspådrivet er en kvantitativ beskrivelse av menneskelig klimagassutslipp målt i Watt per kvadratmeter. Figur 2.9 illustrerer en sammenlikning mellom RCP 2.6 og RCP 8.5. Utviklingssenarioene viser stor forskjell i både temperaturøkning og endring av nedbørmengde mellom tidsperiodene 1986-2005 og 2081-2100 [14].



Figur 2.9, Endring av temperatur og nedbørmengde ved RCP 2.6 og RCP 8.5, [14].

## 2.4 Krav og anbefalinger

Dette kapittelet omhandler krav til inneklimate i bygg. I hovedsak blir det satt fokus på krav til luftmengdebehov, krav til operativ temperatur og anbefalinger for vurdering av termisk komfort.

### 2.4.1 Luftmengde

*Høyt CO<sub>2</sub> konsentrasjoner skyldes mangelfull ventilasjon i forhold til antall personer i lokalene* [12]. Ettersom CO<sub>2</sub> er den største forurensingen som blir produsert i bygget er det denne parameteren som er dimensjonerende for byggets ventilasjonsmengde. Arbeidertilsynet veiledning 444 stiller krav til CO<sub>2</sub>-nivå på under 1000 ppm [12]. Så for å sikre tilstrekkelig med ventilasjonsmengde skal luftmengdebehovet dimensjoneres ut ifra 3 faktorer: Personbelastning (A), Materialbelastning (B) og til slutt forurensninger fra aktiviteter og prosesser (C). Ifølge Tek 17 § 13-3 skal det ventileres 26 m<sup>3</sup>/h med friskluft per person ved lett aktivitet. For materialbelastning skal det tilføres 2.5 m<sup>3</sup>/h friskluft per m<sup>2</sup> gulvareal dersom bruksenheten eller rommet er i bruk og 0.7 m<sup>3</sup>/h dersom bruksenheten eller rommet ikke er i bruk. Luftmengdebehovet skal vurderes etter den største dimensjonerende faktoren, altså enten (A+B) eller C [1]. I et klasserom vil det dimensjonerende luftmengdebehovet være i henhold til person- og materialbelastning. I en fabrikk som forurenser luften med ulike kjemikalier fra en prosess må ha luftmengdebehovet dimensjonert ut ifra det. TEK 17 § 13-3 og Arbeidertilsynet veiledning 444 stiller samme krav for dimensjonerende luftmengdebehov, men bruker ulike enheter.



## 2.4.2 Operativ temperatur

TEK 17 § 13-4 Stiller krav til termisk inneklima. Det første leddet sier som følgende:

«Termisk inneklima i rom for varig opphold skal tilrettelegges ut fra hensynet til helse og tilfredsstillende komfort ved forutsatt bruk». Tabell 2.4 presentert under gir grenseverdiene for operativ temperatur ved ulike aktivitetsgrupper. Temperaturen skal ikke overstige 26°C, men er tillat å overstrides opp mot maks 50 timer i året. I fyringssesongen anbefaler arbeidertilsynet at den operative temperaturen ikke skal under 22°C [12].

Tabell 2.4. Anbefalte verdier for operativ temperatur, TEK 17 § 13-4

Aktivitetsgruppe	Lett arbeid	Middels arbeid	Tungt arbeid
Temperatur °C	19-26	16-26	10-26

NS-EN ISO 7730 setter ingen krav men gir en mer detaljert anbefaling for dimensjonering av operativ temperatur. Målet med anbefalingene er å velge en temperatur som gir en PMV verdi på 0 som tilsvarer en PPD på 5%. Tabell 2.5 viser NS-EN ISO 7730 sin anbefaling på operativ temperatur for ulike kategori. Kategoriene deles opp etter prosentandel misfornøyde hvor kategori A gir <6% og kategori C gir <15% misfornøyde.

Tabell 2.5, Anbefalt operativ temperatur og maksimal middelluftshastighet, NS-EN ISO 7730 [10].

Type of building/space	Activity W/m <sup>2</sup>	Category	Operative temperature °C		Maximum mean air velocity <sup>a</sup> m/s	
			Summer (cooling season)	Winter (heating season)	Summer (cooling season)	Winter (heating season)
Single office	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Landscape office		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Conference room		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 <sup>b</sup>
Auditorium			24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 <sup>b</sup>
Cafeteria/restaurant	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 <sup>b</sup>
Classroom		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 <sup>b</sup>
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 <sup>b</sup>
Kindergarten	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 <sup>b</sup>
Department store		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 <sup>b</sup>
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> The maximum mean air velocity is based on a turbulence intensity of 40 % and air temperature equal to the operative temperature according to 6.2 and Figure A.2. A relative humidity of 60 % and 40 % is used for summer and winter, respectively. For both summer and winter a lower temperature in the range is used to determine the maximum mean air velocity.

<sup>b</sup> Below 20 °C limit (see Figure A.2).

## 2.4.3 Trekk

Arbeidertilsynet sier at lufthastigheten bør maks være 0.15 m/s i et bygg med rolig aktivitet og i fyringssesongen [12]. Dette gjelder for områder i oppholdssonen. NS-EN ISO 7730 gir også anbefaling for trekk delt opp i tre kategorier, se tabell 2.6 [10]. Disse verdiene er gitt ved en turbolensintensitet på 40%.

Tabell 2.6, NS-EN ISO 7730 grenseverdier for termisk komfort for ulike kategorier.

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	$-0,2 < PMV < + 0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < PMV < + 0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < PMV < + 0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10

### 2.4.3 Vertikal temperaturdifferanse

TEK 17 § 13-4 tilsier at en lufttemperatur på 3-4°C mellom hode og føtter gir uakseptabelt ubehag. Dette er kun en anbefaling og er av den grunn ikke et krav. NS-EN ISO 7730 gir anbefalte verdier for maksimal vertikal temperaturdifferanse gitt i tabell 2.7 [10]. Kategori A gir en PD på <3% og kategori C gir en PD på <10% misfornøyde.

Tabell 2.7, Anbefalinger for maksimal vertikal temperaturdifferanse, NS-EN ISO 7730

Category	Vertical air temperature difference <sup>a</sup> °C
A	< 2
B	< 3
C	< 4

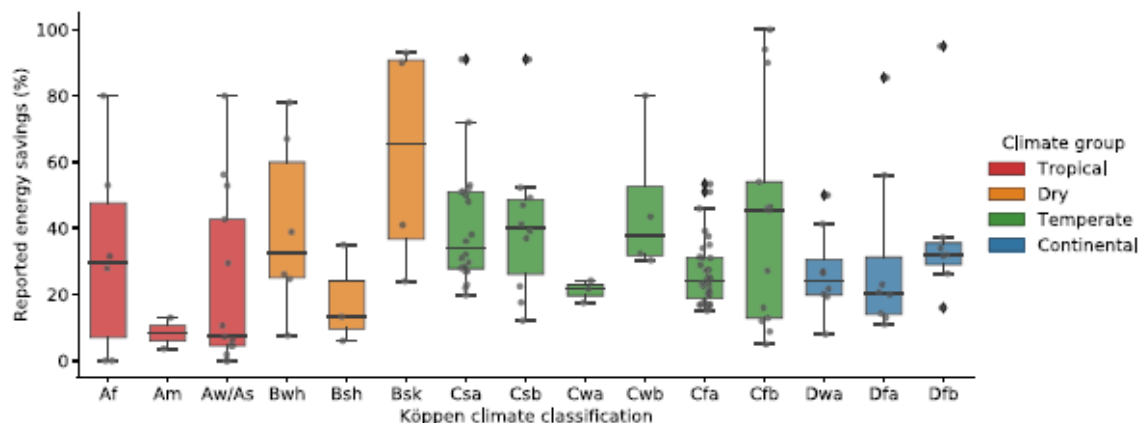
<sup>a</sup> 1,1 and 0,1 m above floor.



### 3 litteratursøk

I dette kapittelet skal relevant litteratur presenteres. Til å starte med ble det gjennomført et litteratursøk for å finne relevant materiale. De Inkluderte materialene varierer fra forskningsrapporter, mastergrader og annet. Det ble i hovedsak brukt 3 litteraturløstasjoner, disse er Oria, ScienceDirect og Google scholar. Det er i hovedsak satt søkelys på artikler som er skrevet innen de siste 20 årene. Litteratursøket er delt opp i 2 kapitler. Det første kapitlet inneholder casestudier med bygg som har en form for hybridventilasjon. I det andre kapitlet skal det ses mer nærmere på hva dagens litteratur sier om fremtiden for hybridventilasjon.

Hybridventilasjon har blitt iverksatt i mange bygg i håp om å redusere energibruken for bygget og mulig bedre inneklimate. Det har vært en økende trend de siste 20 årene for hybridventilasjon. Peng et al. gjennomførte en omfattende litteraturløstasjon av hybride systemer med mixed-mode løsning [20]. Her analyserte og syntetiserte de relevant forskning og ga en omfattende oversikt over feltet. 74 studier ble inkludert og delt opp i kategorier som klima, bygningstype og kontrollstrategi. Resultatet av litteraturløstasjonen viste at det var mye studier med hybridventilasjon i klima som Cfb (marimt klima), Cfa (subtropisk fuktig klima) og Csa (Middelhavsklima) se vedlegg 0. Blant de ulike bygningstypene med mixed-mode var kommersielle, bolig- og utdanningsbygninger de tre mest valgte bygningstypene for case-studiene. Figur 3.1 presenterer den rapporterte energibesparelsen for hybridventilasjon fra casestudiene delt inn i de ulike klima-klassifikasjonene, Klimaet som nærmest representerer Norge er Dfb men også Cfa og Cfb for vestlandet langs kysten.



Figur 3.1, Rapportert energibesparelse med hybridventilasjon sammenlignet med rent mekanisk med ulike klima-klassifikasjoner, [20]

Omtrent alle studier undersøkte den termiske komforten, men det var kun 15% av studiene som kvantitativt undersøkte luftkvaliteten. Av denne grunn er det risiko for at luftkvaliteten kan ha blitt ofret for å oppnå bedre resultater i henhold til energibesparelsen.

### 3.1 Eksempelbygg med hybridventilasjon

I dette kapittelet skal det presenteres ulike casestudier. Det er inkludert både virkelige bygg samt simulerte bygg. Det er en rekke med kriterier som ble fastslått under inklusjon av casestudiene. Disse er da:

- Kaldt-temperert klima, helst nordisk klima.
- Bygget må inneholde en form for hybridventilasjon med noe som kan åpnes, dette kan da være vinduer, fasadeåpninger o.l.
- Hybridventilasjonen må være automatisert.

#### 3.1.1 Skonnertveien Hageby i Grimstad

Ingvild Haktorson i sin masteroppgave undersøkte endringen av energibruk ved å bytte balansert ventilasjon med hybridventilasjon for et nybygg i massivtre [16]. Bygget som undersøkes er et leilighetskompleks bestående av 35 leiligheter ferdigbygd i 2017 se figur 3.2. Kun en leilighet på 106m<sup>2</sup> ble brukt til undersøkelsen. Leiligheten har en Mixed-mode hybridventilasjonsstrategi med automatisk vindusåpning som luftinntak. Kontrollstrategien for vindusåpning er basert på innnetemperatur, CO<sub>2</sub> konsentrasjon og utetemperaturen. For å hindre at vinduene var åpen mer enn nødvendig så ble det definert en tilstedeværelse på 0 fra kl 9:00-15:00. Ingvild brukte IDA-ICE for å simulere bygget ved de ulike ventileringsstrategiene. Dersom innnetemperatur overstiger 25°C vil bygget ta i bruk en mekanisk avtrekksvifte skal hjelpe til med luftskifte i bygget.



Figur 3.2, Skonnertveien Hageby i Grimstad, [16]

Resultatet for simulering av leiligheten med balansert ventilasjon og hybridventilasjon ga et årlig energiforbruk på henholdsvis 67,6 kWh/m<sup>2</sup> og 39,7 kWh/m<sup>2</sup>. Simuleringen med balansert ventilasjon hadde en tilstedeværelse på 100% i motsetning til simuleringen med hybridventilasjon med 0% tilstedeværelse fra kl 9:00 til 15:00. Av den grunn kan ikke resultatene sammenliknes direkte, men likevel fortelle at hybridventilasjonsløsningen gir lavere energibruk grunnet den store differansen. Den Operative temperaturen oversteg ikke 27°C og hadde høyeste verdi av PPD på 22%. Hybridventilasjonen hadde noen utfordringer på vinteren med høye CO<sub>2</sub> nivåer, spesielt på soverommet med en maksimalverdi på 1270ppm.

### 3.1.2 Brunla ungdomsskole

Brunla ungdomsskole undergikk en renovering i 2012 med installasjon av mekanisk avtrekksventilasjon og motoriserte vinduer som åpnes etter en kontrollstrategi. Strategien for hybridventilasjon er mixed-mode naturlig ventilasjon med en assisterende avtrekksvifte dersom de naturlige drivkreftene ikke er sterke nok. Marianne Algrøy i sin master gjorde en undersøkelse av energiforbruket og inneklimate for bygget [17]. Marianne brukte et klasserom med 4 automatiske styrbare vinduer for å analysere inneklimate og energibruken. Vinduene åpnes automatisk i henhold til brukerstyrte settpunkter for temperatur og CO<sub>2</sub> i sonen som vinduene befinner seg i. Brukerne kan også i tillegg manuelt kontrollere åpningsgrad av vinduene. Innetemperatur ble satt større vekt på enn CO<sub>2</sub> konsentrasjonen. Figur 3.3 viser de kontrollstyrte vinduene og værstasjonen plassert på taket.



Figur 3.3, Automatisk styrt vindu for luftinntak av bygget og værstasjonen på taket, [17]

Marianne utførte IDA-ICE simuleringer av klasserommet for å sammenlikne mixed mode hybridventilasjon med fullt mekanisk balansert ventilasjon. Resultatet viste at den årlige besparelsen av strøm for hybridløsningen er 4.5 kWh/m<sup>2</sup> dette tilsvarer en energibesparelse på omtrent 4%. Marianne kommenterte også at denne besparelsen kunne vært høyere dersom det ble tillat høyere CO<sub>2</sub>-nivåer. Inneklimavurderingen tilsa noe redusert luftkvalitet hvor CO<sub>2</sub>-nivået oversteg folkehelseinstituttets anbefalinger i korte perioder. Temperaturen holdt seg på et akseptabelt nivå. Risiko for trekk var lav etter beregningene, men ansatte der sa de opplevde trekk nærme vinduene, spesielt på vintertid.

### 3.1.3 Mesterfjellet skole

Mesterfjellet skole er en barne- og ungdomsskole i Larvik med et bruttoareal i underkant av 6000m<sup>2</sup> se figur 3.4. Magnus Lie har i sin masteroppgave valgt å undersøke energibruken og inneklimate for mesterfjellet skole [18]. Skolen benytter en mixed-mode løsning med vinduslufting i kombinasjon med balansert mekanisk ventilasjon. Det mekaniske anlegget er neddimensjonert i overkant av 50% grunnet at anlegget er dimensjonert etter luftkvalitetskrav på vintertid. Anlegget antas å utnytte vinduslufting i stor grad for å fjerne overskuddsvarme. Kontrollstrategien for vindusluftingen er basert på målt CO<sub>2</sub>, vinduttrykk, vindretning, nedbør og inne- og utetemperatur. Den lokale værdataen måles av værstasjonen plassert på taket. Vinduene kan også manuelt styres av brukerne.



Figur 3.4, Mesterfjellet skole, [18].

I Resultatet til Magnus fant han at mixed-mode ventilasjonen ga en potensiell energibesparelse på 15,7%. Simuleringer viste til uakseptabelt termisk klima med en operativ temperatur på maksimalt 32°C. Det er tillatt å overstige anbefalte operative temperatur på maksimalt 50 timer i et år, men simuleringen tyder til at dette overstrides. Det atmosfæriske miljøet er ikke tilfredsstillende ettersom CO<sub>2</sub>-nivået overstiger den anbefalte verdien på 1000ppm store deler av skoledagen. Dette samsvarer med tilbakemeldingene fra elever som beskriver luften som «tung».

Magnus konkluderer at det mekaniske anlegget burde brukes i større grad til romkjøling for å sikre et godt termisk miljø. Han videre forklarer at fordelene ved Mixed-mode hybridventilasjon ikke veier opp for de potensielle ulempene. I undervisnings- og kontorbygg kan avvik av atmosfærisk miljø og termisk inneklimate gi store konsekvenser i henhold til helse, læreevne og produktivitet.

### 3.1.4 Grong skole

Grong skole er en barne- og ungdomsskole lokalisert i Medjå i Grong kommune, se figur 3.5. Bygget har kun en etasje og ble ferdigbygd i 1998 med et bruttoareal på 1001m<sup>2</sup> [19]. Bygget har et avkaststårn og inntakstårn med kulvert. Bygget har en hybrid-ventilasjonsstrategi som innebærer bruk av mekanisk ventilasjon med hjelp fra naturlige drivkrefter [4]. Bygget har også mange sydvendte vinduer for å utnytte solvarme for å bespare oppvarmingsenergi. inntakstårnet som supplementerer bygget med luft gjennom kulverten har en pådragsvifte som skal hjelpe til dersom de naturlige drivkreftene ikke er tilstrekkelige. Kontrollstrategien for å sikre et godt inn klima og god komfort er basert på målt innetemperatur og CO<sub>2</sub> konsentrasjon fra sensorer i hvert klasserom. Dersom settpunkt-verdiene overstrides vil det åpnes en avtrekksluke med en vifte for å trekke ut luften [4]. Avtrekkstårnet har tre selvregulerende spjeld med vifter som reguleres etter behov. Det utnyttes varmegjenvinning av avtrekksluften fra avkaststårnet varmegjennvinningsraten er dessuten lav og kun på 55-60% [19]. I kulverten filtreres luften for mindre partikler gjennom en filter, de større havner som oftest på gulvet og er lett å rense.



Figur 3.5, Grong skole, [4]

Undersøkelse av inn klima og energibruk viste til en akseptabel luftkvalitet og termisk komfort. Den kjøleende effekten av kulverten var mer effektiv enn forventet. Hybride løsningen gir ingen tydelig fordel overfor balansert mekanisk ventilasjon ettersom energibruket er korresponderende med referansebruken i Norge. Energibruken er høyere enn forventet som skyldes underestimert varmetap fra kuldebroer og feil med kontrollstrategien som til senere tid ble fikset [4].

### 3.1.5 Solstad barnehage

Solstad barnehage er et lavenergibygg i Stavern som har hybridventilasjon. Bygget ble ferdigstilt i 2011 og har et bruksareal på 788m<sup>2</sup> se figur 3.6. Yngvar Grimsbo Øgård gjorde en vurdering av inn klimaet



og energibruken til barnehagen i sin masteroppgave [25]. Bygget har en mixed-mode strategi med bruk av motorstyrte vinduer og balansert mekanisk anlegg. På vinteren benyttes varmegjenvinningen fra det balanserte mekaniske anlegget, og på sommeren skal bygget i hovedsak benytte naturlig ventilasjon gjennom vindusåpningene. Garderobene benytter kun mekanisk ventilasjon. Solstad barnehage har et høyt rom i midten av bygget som fungerer som et avkaststårn, dette bidrar til å bedre den termiske oppdriften. Kontrollstrategien for vindusåpningen er basert på sensormålte verdier i rommene og lokale værdata fra værstasjonen. Dersom ekstra lufting ønskes av brukerne, er det mulig å manuelt styre vindusåpningen [25].



Figur 3.6, Solstad barnehage, [25]

Det ble utført IDA-ICE simuleringer for å undersøke energibruket og inneklimate til barnehagen. Simuleringer viser til en energibesparelse på opp mot 14% i forhold til drift med kun mekanisk ventilasjon. Bygget oppstår på noen få problemer når det kommer til inneklimate. Ved ekstremt varme dager har bygget problemer med å holde akseptabel inneklimate med naturlig ventilasjon uten hjelp av mekanisk kjøling. Luftkvaliteten er tilfredsstillende på sommertid, men overstiger 1000ppm på vintertid.

### 3.1.6 Kontorbygg i Glasgow

Hamdy et al. undersøkte ulike strategier for hybridventilasjon for en bygningsmodell i Glasgow Scotland med IDA-ICE [31]. Bygget utnytter kryssventilasjon i kombinasjon med oppdriftsventilasjon hvor luftinntaket er gjennom automatisk kontrollerbare fasadeåpninger. Den tredje og aktuelle kontrollstrategien styrer fasadeåpningene ved målt temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå i okkuperte soner. Det balanserte mekaniske anlegget skal sikre maksimal CO<sub>2</sub>-nivå <1000ppm og inneklimate på <26°C. Naturlig ventilasjon skal kun være i bruk når utetemperatur var 5-24°C ellers skal det mekaniske anlegget brukes. Den tredje Kontrollstrategien ga best resultater i henhold til generell vurdering av

inneklima og energibesparelse. Resultatet viste at hybridventilasjon sammenlignet med balansert mekanisk ventilasjon ga en energibesparelse på 68% mindre vifteenergi med kun 1.3 kWh/m<sup>2</sup> ekstra oppvarmingsbehov og en energibesparelse på 100% for kjøling. CO<sub>2</sub>-nivået holdt seg for det meste på 900-1000ppm men aldri over 1000 ppm. Simulering av termisk komfort for juni til juli viser en gjennomsnittlig termisk komfort på ~8% PPD med en toppverdi på 15%.

### 3.2 Hybridventilasjon med fremtidig klima

Det er en begrenset mengde av litteratur for hybridventilasjon i kaldt-temperert klima i henhold til klimaendring. Det ser ut som fokuset ligger mer i å undersøke hybridventilasjon i varme klimasoner og se hvordan fremtidig klima kan påvirke kjølepotensialet til hybridventilasjon. I fremtiden så vil det forekomme sterkere og mer frekvente hetebølger, dette kan forårsake mindre tilgjengelighet for bruk av hybridventilasjon i områder som allerede har varmt klima. For Norge så kan potensiell temperaturøkning bidra til bedre vilkår for hybridventilasjon.

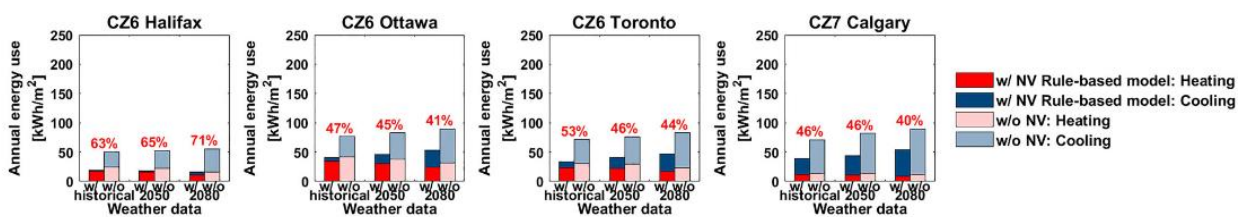
I Australia går mye av energibruken i bygg til nedkjøling. Bamdad et al. undersøkte potensiale for energibesparelse med mixed-mode hybridventilasjon og takvifte i henhold til fremtidig klima i Australia [21]. Det ble valgt ut 6 byer med ulike klimasoner som modellen skulle simuleres med. Bygget bruker automatisk styrte vinduer og takvifter som reguleres etter sensormålte parametere. I studiet blir bygningsmodellen simulert med nåtidens klima samt 2 scenarier for fremtidig klima i år 2080. A1F1 som representerer en fremtid med fokus på økonomisk vekst og brensel av fossile stoffer, dette er tilnærmet RCP 8.5. B2 er det andre scenarioet som representerer en mildere økonomisk vekst med mer fokus på bærekraftig utvikling, dette er tilnærmet RCP 4.5.

Studiet fant i resultatet at kjølebehovet over de 6 ulike klimasonene i Australia i 2080 (A1F1) hadde en betydelig økning på 24% og 56% i Darwin og Melbourne, henholdsvis. Kjølebehovet for det simulerte bygget ble redusert signifikant med mixed-mode ventilasjon med opp mot 47% besparelse med nåværende klima. Energibesparelsen med mixed-mode ventilasjon og takvifte for begge fremtidige klimascenariene så ut til å reduseres med 25% og 6% i Brisbane og Darwin, henholdsvis. Men likevel gjenstår mixed-mode ventilasjon med takvifte effektiv for energibesparelse. Integrering av takvifte viste seg å være lønnsomt med en gjennomsnittlig energibesparelse på 7% [21].

Sanchez-Garcia et al. undersøkte den potensielle fremtidige energibesparelsen i et kontorbygg i Seville, Spania [22]. I studiet ser de på den mulige energibesparelsen ved å sammenligne et HVAC-system med en mixed-mode løsning. Bygget har nå til dags alltid lukkede vinduer og åpne luker for luftinntak så bygget opererer aldri i mixed-mode. Designbuilder EnergyPlus er simuleringsverktøyet som ble benyttet i prosjektet. Kontrollstrategien er basert på den adaptive termisk komfortmodellen og benytter automatisk styrt vinduslufting som naturlig ventilasjon. I resultatet viser det til en energibesparelse med

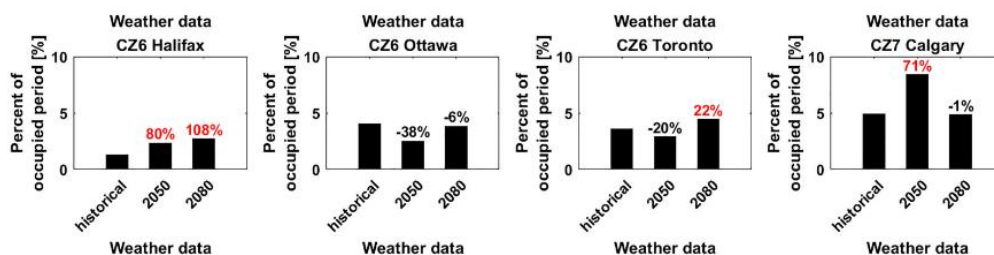
mixed-mode på 59.8% med simulering av nåværende klima. Antall kjøletimer ble redusert med 735 timer. I henhold til fremtidig klima fant de at den totale energibesparelsen med mixed-mode er på 38% i 2080 med klimamodell A2 (RCP 6-8.5). Energibruket for oppvarming reduserte med 8.5% og for nedkjøling økte den med 22.8% fra nåværende tid til 2080 [22].

Sara Gilani og William O'Brien undersøkte effekten av naturlig ventilasjon i henhold til klimaendring i USA og Canada [23]. Modellen brukt til å evaluere naturlig ventilasjon i et cellekontor på 9m<sup>2</sup> simulert i 14 byer i USA og Canada. Ensidet ventilasjon gjennom vinduet er regulert etter den adaptive komfortmodellen. Når vinduet er lukket skal sonen tilføres med friskluft gjennom et mekanisk anlegg. Studiet sammenligner energibruken til mixed-mode løsningen og full mekanisk ventilasjon, her gjelder det kun energibruk til oppvarming og kjøling. Figur 3.7 presenterer resultatet for energibesparelse for 4 byer i Canada. Her står energibesparelsen i prosent og delt opp i ulike år med simulert klimadata A2 (RCP 6-8.5). Resultatet viser til en tydelig økning av energibruk, men energibesparelsen med mixed-mode ser ut til å synke gradvis over tid. Dette er fordi prosentandel av tiden vinduene er åpne også minker over tid [23]. Halifax ser ut til å ha en økning i potensiell energibesparelse med opp mot 71% i 2080.



Figur 3.7, Energibruk for kjøling og oppvarming med mixed-mode (venstre) sammenlignet med full mekanisk ventilasjon(høyre) simulert med nåværende og fremtidig klima, [23].

Figur 3.7 presenterer kun 4 av 14 byer ettersom de nærmest representerer norsk klima og av den grunn er mer interessante å se på. Vifteenergibruken ser ut til å være ikke inkludert som er veldig relevant når en skal sammenligne energibesparelsen med hybridventilasjon sammenlignet med mekanisk anlegg. Den termiske komforten er evaluert og presentert i figur 3.8, her vises det antall misfornøyde i prosent. Resultatene er blandet og viser til ingen konkret mønster, men kan konkluderes med at tallene er innenfor akseptabelt nivå [23].



Figur 3.8, Termisk komfort i PPD ved ulike årsperioder. [23]



Studien gjør ingen bemerkning på luftkvalitet som er også veldig relevant spesielt i kjøligere klima hvor høyt CO<sub>2</sub> nivå ofte forekommer på vintertid.

Wang et al. studerte den fremtidige endringen av energibruk for et medium-stort kontorbygg i 5 forskjellige byer i USA [24]. Det ble brukt flere klimamodeller for å simulere fremtidig klima. Mixed-mode er en av de undersøkte ventilasjonsmetodene som benyttes i simuleringene. Kontrollstrategien er basert på adaptiv termisk komfortmodellen, men det blir ikke spesifisert om det er noe form for vindusåpning/fasadeåpning. Resultatet av simuleringene viste til en generell økning i energibruk på opp mot 15% i Phoenix i Arizona i år 2080 med RCP 8.5. I Akron i Ohio som tilsvarer mest nordisk klima vil energibruken øke med kun 6% i 2080 med RCP 8.5. Det ble simulert energibruk med ulike ventileringsstrategier deriblant mixed-mode. For Phoenix minket energibruken med mixed-mode i 2080 med ~1% (RCP 8.5) og ~9% (RCP 2.6) sammenlignet med nåværende klima. Det mest lovende tilfelle er Washington DC som minket energibruken i 2080 med ~7% (RCP 8.5) og ~12.5% (RCP 2.6) sammenlignet med nåværende klima. Wang et al. konkluderer med at mixed-mode er en egnet strategi for å nøytralisere den økte energikostnaden for bygg i den kommende fremtiden [24].

### **3.3 Konklusjon av litteratursøk**

Det ser ut som at hybridventilasjon har en del utfordringer med inneklime på kalde vinterdager og varme sommerdager i Norge. Alle presenterte case-studier fra Norge så ut til å ha over anbefalingen til luftkvalitet på 1000ppm CO<sub>2</sub> på vinteren. På varme sommerdager ser det ut som rent naturlig ventilasjon ikke klarer å promotere tilstrekkelig med luftskifte for å kaste ut overskuddsvarmen. Dette gir da nedsatt termisk komfort. De fleste byggene med hybridventilasjon i Norge utnytter en mixed-mode løsning hvor det aktivt byttes mellom bruk av naturlig ventilasjon og mekanisk ventilasjon. Det tyder til at mixed-mode ikke gir tilstrekkelig med ventileringsstrategier. Det ville mulig egnet seg bedre med mekanisk ventilasjon med støtte fra naturlige drivkrefter eller vifte-assistert naturlig ventilasjon ettersom de naturlige drivkreftene ikke klarer å promotere nok luftskifte av seg selv. Energibesparelsen ser ut til å variere stort og kan være grunnet flere årsaker bl.a. dårlig kontrollstrategi, dårlig vedlikeholdsarbeid, dårlig arkitektoniske egenskaper eller annet.

Magnus Lie i sin master konkluderte med at han mener energibesparelsen med mixed-mode ikke er verdt det på grunn av vanskelighetene med å oppnå et tilfredsstillende inneklime. I skolebygg og kontorbygg er det kritisk å oppnå et godt inneklime for å forsørge at konsentrasjonsevnen og andre kognitive egenskaper ikke skal svekkes [18].

Det er en begrenset mengde litteratur på hybridventilasjon i henhold til fremtidig klima, spesielt nordisk klima. Resultatet fra litteratursøket ga et generelt mønster for hvordan fremtiden til hybridventilasjon

ser ut for områder med allerede varmt klima. Det fremtidige klimaet vil ha mer frekvente og ekstreme og hetebølger som øker kjølebehovet betraktelig. Den mulige energibesparelsen så ut til å reduseres i de varme områdene, dette er grunnet at kjøleeffekten fra naturlig ventilasjon ikke er tilstrekkelig når utetemperaturen er veldig høy, og av den grunn må mekanisk ventilasjon benyttes. Wang et al. konkluderte at hybridventilasjon er en egnet ventilasjonsstrategi i forhold til rent mekanisk for å kompensere for fremtidig klimaendring i henhold til energibruk [24].

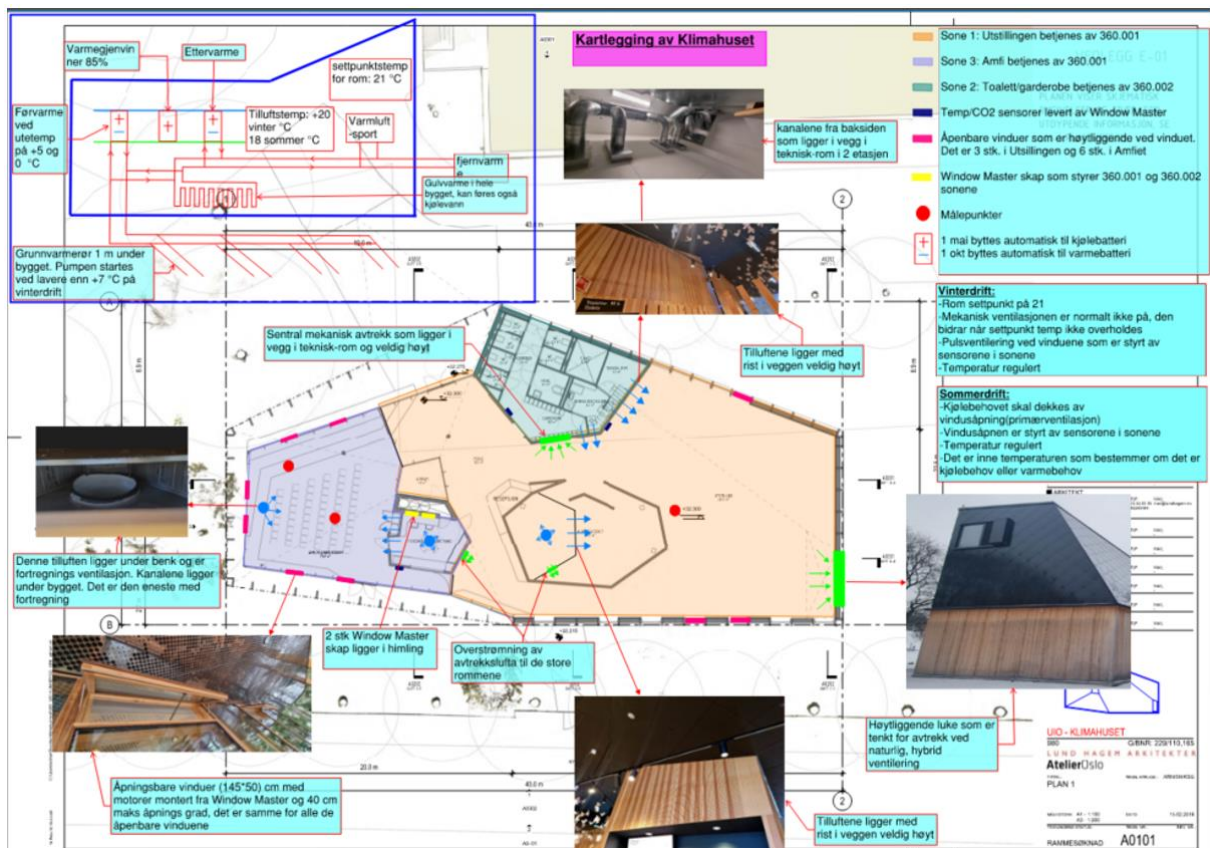
I Norge må det benyttes i hovedsak mekanisk ventilasjon med varmegjenvinner på vintertur på grunn av det høye oppvarmingsbehovet. I en fremtid med høyere temperatur vil nok fyringssesongen bli kortere og muligens bidra til mer bruk av vindusåpning. Ved mer bruk av vindusåpning framfor det mekaniske anlegget kan det oppnås en større energibesparelse. Sara Gilani og William O'Brien i sin studie fant en økning i energibesparelse for en by i Canada. Halifax som deler tilnærmet samme klima som Norge, noe varmere (klimaklasse Dfb), viste til en økning i energibesparelse på 8% fra nåværende klima til 2080 (RCP 6-8.5) for hybridventilasjon [23].

### **3.4 Klimahuset på Tøyen**

Klimahuset på Tøyen utnytter en hybrid løsning for ventilasjon med automatisk styrte vinduer. Figur 3.9 gir en oversiktlig kartleggelse av byggets funksjoner og drift [27]. I kontrollstrategien for hybridventilasjon så vektlegges det bruk av naturlig ventilasjon med mekanisk ventilasjon som sekundær. Zolykha Ahmadi i sin master oppgave undersøkte Klimahuset med flere styringsstrategier for hybridventilasjon med simuleringsprogrammet IDA-ICE samt dro på befaring for å utføre fysiske beregninger og benyttet spørreskjemaer.

Zolykha simulerte Klimahuset med 4 ventilasjonssenarioer med IDA-ICE:

- Verifisering av modell (Styringsstrategien Klimahuset benytter nå)
  - Fullt mekanisk ventilasjon
- 1) Mekanisk ventilasjon alltid på med hjelp av vindusåpning + pulsventilering i vår og høst og nattkjøling i juli (Hybridventilasjon)
  - 2) Mekanisk ventilasjon alltid på med hjelp av vindusåpning + nattkjøling og utetempkontroll (Hybridventilasjon)



Figur 3.9, Kartlegging av Klimahuset på Tøyen [27].

Zolykha kommer til konklusjon at styringsstrategien for hybridventilasjon som benyttes i dag ikke er en bra løsning. Styringsstrategien medførte dårlig inneklimate, temperaturfall og ingen kontroll på luftmengdene samt hadde stort energiforbruk. Klimahuset med fullt mekanisk ventilasjon ble benyttet som referanse for å kunne avgjøre den potensielle energibesparelsen for de 2 nye hybridsenarioene. Den første styringsstrategien for hybridventilasjon benytter mekanisk ventilasjon hele tiden med hjelp av vindusåpning, nattventilering i juli og pulsventilering i vår og høst i okkupasjonstiden. Potensiell energibesparelse ble 9.06% med tilfredsstillende inneklimate. Den andre styringsstrategien for hybridventilasjon gikk ut på mekanisk ventilasjon var alltid på med hjelp av vindusåpning med nattkjøling og utetemperaturkontroll. Den sistnevnte styringsstrategien viste seg til å gi en potensiell energibesparelse på 11.96% kontra bruk av fullt mekanisk ventilasjon. Zolykha til slutt konkluderte at vindusåpning ved lavere utetemperatur enn 15°C fører til stort temperaturfall og trekk i lokalet. Nattventilering viser seg til å være et svært effektivt passivt tiltak for å redusere kjølebehovet og at hybridventilasjon kan bidra til stor energibesparelse dersom det utnyttes en godt planlagt styringsstrategi.

### **3.5 Manglende forskningsområder**

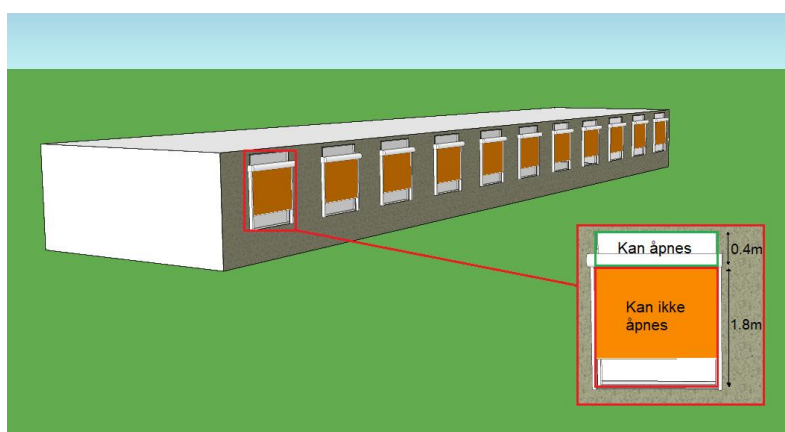
I denne studien skal en ny kontrollstrategi for hybridventilasjon undersøkes for et typisk kontorbygg og for Klimahuset på Tøyen. Fleste tilfeller av hybridventilasjon benytter en mixed-mode løsning hvor det byttes mellom bruk av mekanisk ventilasjon og naturlig ventilasjon. Det ser ut til at mixed-mode hybridventilasjon har en del problemer med å gi tilfredsstillende inneklime når det benyttes naturlig ventilasjon. I denne kontrollstrategien skal det fokuseres på bruk av mekanisk ventilasjon med hjelp fra naturlig ventilasjon. Denne form for hybridventilasjon finnes det begrenset mengde forskning på i Norsk klima. Det skal også undersøkes hvor motstandsdyktig denne kontrollstrategien for hybridventilasjon er mot fremtidig klima. Per dags dato er det ingen forskning på hybridventilasjon med fremtidig klima i Norge.

## 4 Metode

Dette kapitlet skal presentere fremgangsmåten for å undersøke kontrollstrategien for hybridventilasjon med nåværende og fremtidig klimadata. Først og fremst skal den undersøkes for et typisk kontorbygg i Norge med bruk av simuleringsprogrammet IDA-ICE. Her skal energibesparelse, termisk komfort og luftkvaliteten undersøkes. Deretter skal den samme kontrollstrategien for hybridventilasjon testes for Klimahuset på Tøyen med både nåværende og fremtidig klimadata.

### 4.1 Kontorlandskapet

Først og fremst skal kontrollstrategien for hybridventilasjon undersøkes for et typisk kontorbygg i Norge. Kontorlandskapet er i andre etasje og har et areal på 180m<sup>2</sup> med 11 identiske vinduer se figur 4.1. Vinduene er delt opp i 2 deler; øvre del som kan åpnes og nedre del som ikke kan åpnes. Den nedre delen av vinduet som ikke kan åpnes er også armert med automatisert solskjerming som aktiveres ved sensormålt solintensitet på 175W/m<sup>2</sup>. Det er plassert radiatorer under vinduene, disse skal ikke være på når vinduene er åpne.



Figur 4.1, IDA-ICE modellen for kontorlandskapet

Tabell 4.1 presenterer forutsetninger for klimaskall og internlast for kontorlandskapet. Byggets bruksmønster er definert i henhold til NSPEK 3031 for kontorbygg [26]. Klimadata er hentet fra værstasjonen på Blindern i år 2019. Data er samlet fra programmet Meteonorm som skal videre forklares i kapittel 4.3.

Tabell 4.1, Egenskaper for klimaskallet og internlast

Parameter, enhet	Verdi/egenskap
Gulvareal, m <sup>2</sup>	180
U-verdi for ekstern vegg, (W/m <sup>2</sup> K)	0.18
Glass U-verdi, (W/m <sup>2</sup> K)	0.70
Vinduets g-verdi	0.5 (0.05) <sup>1</sup>
Normalisert kuldebro $\psi$ , (W/m <sup>2</sup> K)	0.03
Infiltrasjon n <sub>50</sub> , 1/h	0.6
Internlaster (personer/belysning/utstyr)	6m <sup>2</sup> / 8W/m <sup>2</sup> / 25 W/m <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Med solskjerming aktivert.

#### 4.1.1 Ventilasjonsstrategi

Kontorlandskapet skal simuleres med 2 ulike ventilasjonsstrategier; hybridventilasjon og fullt mekanisk ventilasjon. Simuleringen med mekanisk ventilasjon skal ha et fullt VAV system som reguleres etter settpunktverdier for temperatur og CO<sub>2</sub> på 20.5°C til 23°C og maks 900ppm, henholdsvis, se tabell 4.2. Tilluften skal holde en konstant lufttemperatur på 18°C og et minimum og maksimum luftmengde på 0.7 L/m<sup>2</sup>s og 4.5 L/m<sup>2</sup>s, henholdsvis. Aggregatet skal ha en gjennomsnittlig SFP på 1.5 kW/m<sup>3</sup>s og varmegjenvinneren har en gjennomsnittlig effektivitetsgrad på 80%. For simulering med fullt mekanisk ventilasjon skal det også utnytte en kontrollstrategi for nattventilasjon i perioder utenfor okkupert tid dette forklares i detalj i kapittel 4.1.2.

Strategien for hybridventilasjon skal baseres på hovedsak bruk av VAV-system med automatisk styrt vindusåpning som assisterende naturlig ventilasjon. VAV-systemet for hybridventilasjonen skal dele samme spesifikasjoner som fullt mekanisk med unntak av maksimal luftmengde som skal reduseres ned til 2 L/m<sup>2</sup>s. Samme settpunktverdier for VAV benyttes. Kontrollstrategien for vindusåpning beskrives i detalj i kapittel 4.1.3.

Tabell 4.2, Settpunktverdier for mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon for kontorlandskapet.

	CO <sub>2</sub> maks (ppm)	VAV Min Luftmengde (L/s*m <sup>2</sup> )	VAV Maks luftmengde (L/s*m <sup>2</sup> )	Oppvarmings-Settpunkt (°C)	Kjølesettpunkt (°C)
Mekanisk	900	0.7	4.5	20.5	23
Hybrid	900	0.7	2.5	20.5	23

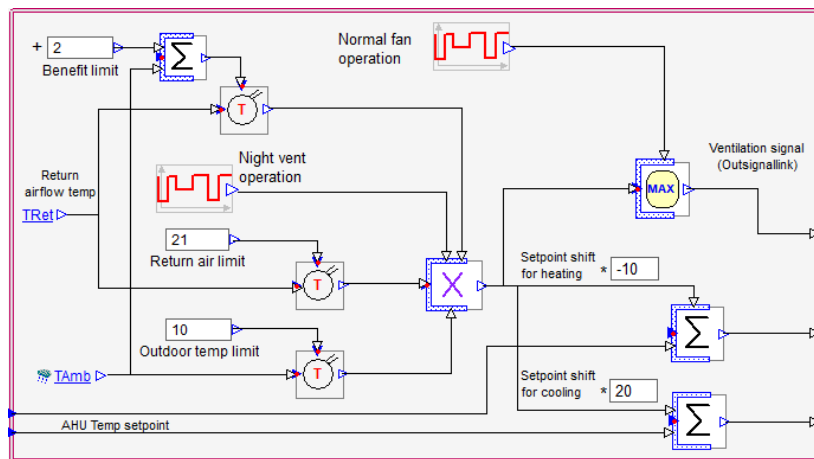
#### 4.1.2 Nattventilasjon

Begge ventilasjonsstrategier skal benytte en kontroll for nattventilasjon. Den fullt mekaniske strategien skal ha nattventilering gjennom ventilasjonsanlegget, den hybride strategien skal benytte vindusåpning. Dette forklares videre i kapittel 3.2.2. Prinsippet med nattventilasjonen er å kjøle ned bygget utenfor okkupasjonstid. Dette gjøres for å sikre en behagelig temperatur når driftstiden for bygget starter. Figur

4.2 illustrerer kontrollstrategien for nattventilering med ventilasjonsaggregatet. Temperatursettpunktet for varmeveksler og varmebatteriet er satt ned med 10 grader. For kjøling er det satt opp 20 grader. Tidsperioden for nattventilering er kl 22:00 til 7:00 fra 1.mai til 30. september.

Nattventilasjonen vil være på når:

- 3) Utendørstemperaturen er over 10°C.
- 4) Avkastluften er over 21°C.
- 5) Utendørstemperaturen er minst 2°C lavere avkastluften.



Figur 4.2, IDA-ICE Kontroll for nattventilasjon.

### 4.1.3 Kontrollstrategi for vindusåpning

Kontrollstrategien for vindusåpning deles inn i 7 kontrollområder med hver sin funksjon. Makroen for vindusåpning kan ses i figur 4.3.

**Kontrollområde 1** setter en maksimumsverdi for antall luftskifte i sonen. Her sørger makroen at vinduene skal regulere åpningsgraden slik at sonen ikke får mer enn 7 ACH (luftskifte per time). Dette er for å hindre trekk.

**kontrollområde 2** sørger for at vinduet skal åpne dersom temperaturen i sonen stiger over settpunkttemperaturen som varierer fra 23-24°C, dette bestemmes ut i fra utetemperaturen.

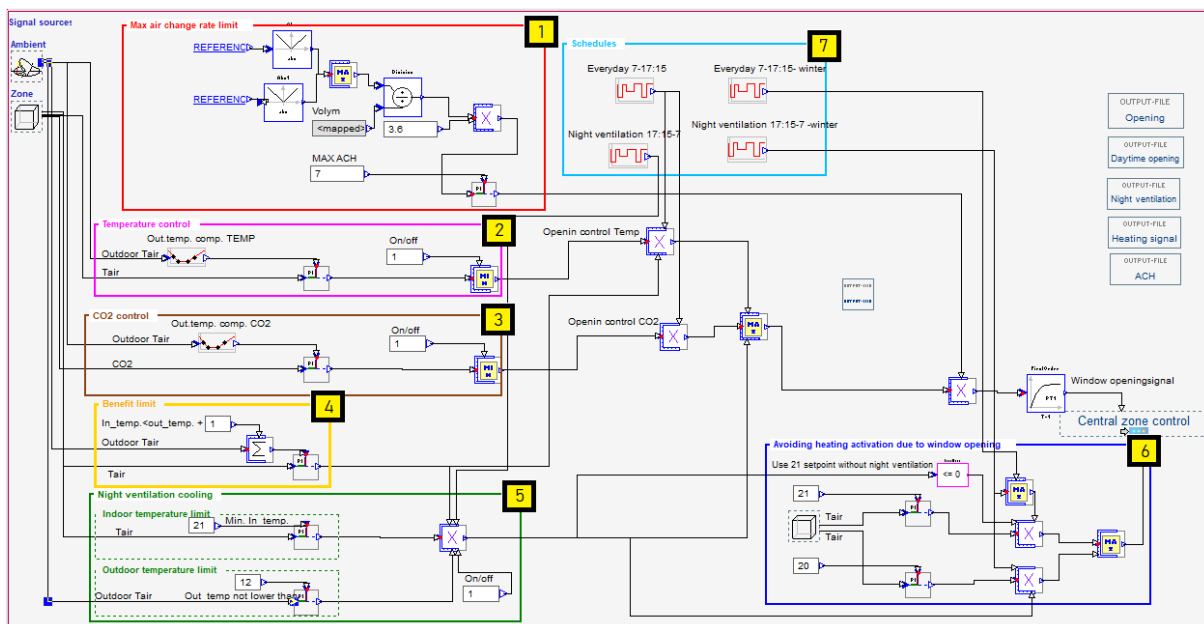
**kontrollområde 3** sørger for vindusåpning dersom sensormålte CO<sub>2</sub> verdien i sonen er på 950 ppm.

**Kontrollområde 4** definerer fordelsgrensen og den tilsier at hvis innetemperaturen er 24°C eller mer skal vinduet åpne dersom utetemperaturen er minst 1°C mindre enn innetemperaturen.

**kontrollområde 5** kontrollerer nattventilasjon og den er satt slik at dersom innetemperatur er mer enn 21°C og ute temperaturen ikke er mindre enn 12°C så skal vinduene åpnes for nattkjøling.

**kontrollområde 6** skal hindre oppvarming når vinduene er åpne.

**kontrollområde 7** definerer tidsperiodene. Driftstiden er kl 7:00 til 17:15 og perioden for nattventilering er fra kl 17:15 til 7:00. Kontrollområde 2 og 3 gjelder for kun tidsperioden 7:00 til 17:15 og kontrollområde 5 gjelder kun for tidsperiode 17:15 til 7:00. 1, 4 og 6 gjelder for begge tidsperioder.

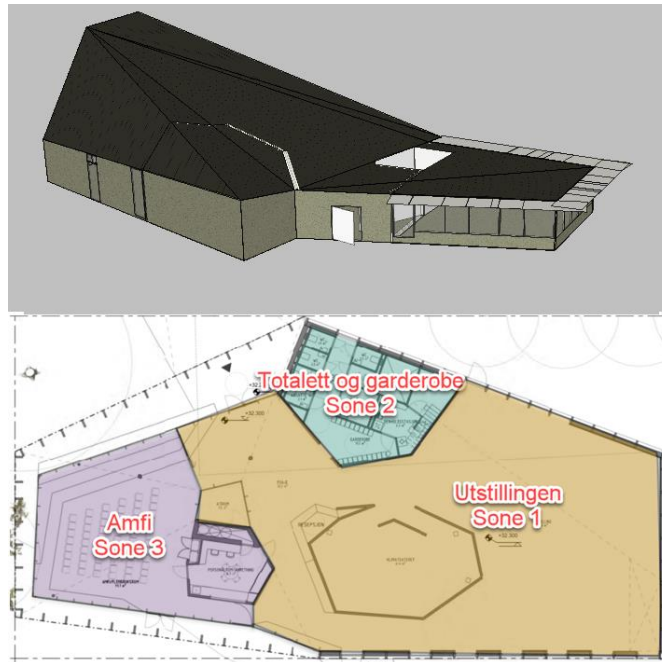


Figur 4.3. IDA-ICE Kontroll for vindusåpning.

## h4.2 Klimahuset i Tøyen

Klimahuset på Tøyen er et FutureBuilt prosjekt som ble ferdigbygd og driftsatt i 2019 se figur 4.4. Bygget har som formål å formidle kunnskap om klimaendringer til barn og unge [29]. Her blir det holdt foredrag, debatter og vist filmer som er målretta mot å spre kunnskap om klimaendringene. Bygget er konstruert med tre og lavkarbonbetong som har mer enn halvert klimagassutslippene ved oppbygg sammenliknet med et typisk referansebygg. Bygget er definert som et Plusshus av futurebuilt betyr at bygget produserer mer strøm enn den selv bruker. Overskuddet blir eksportert til nettverket. Bygget er armert med vinkla solcellepanel, god isolasjon og mye termisk masse for å sikre en jevn og behagelig temperatur [29]. Bygget er installert med motoriserte vinduer fra Window Master hvor de skal bidra til å kjøle ned bygget samt ventilere bygget.

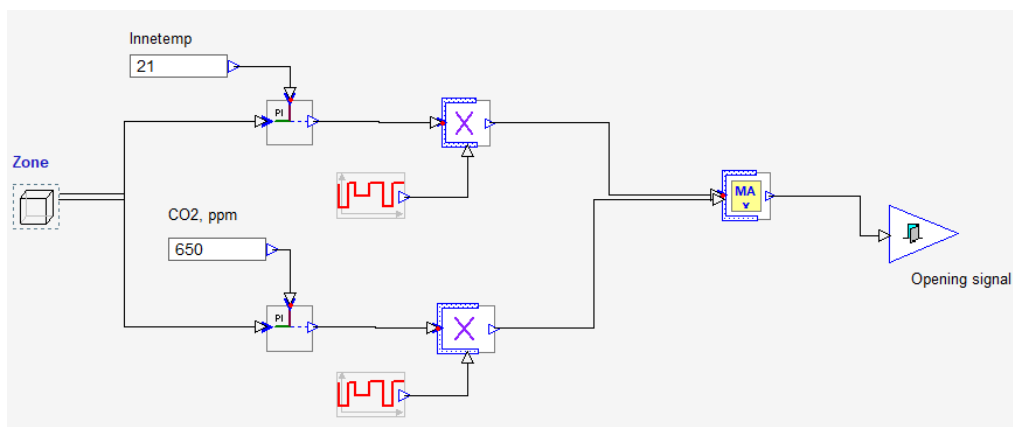




Figur 4.4. IDA-ICE modellen for Klimahuset på toppen og plantegning med soneoppdeling nederst [27].

Klimahuset er delt opp i 3 soner; Amfi hvor det befinner seg en sal med flere sitteplasser, utstillingsrom og bad. Amfi har 6 automatisk styrte vinduer og utstillingen har 4. Det er også installert automatisk styrte screen persienner for solskjerming i amfiet. Utstillingen har et vindu plassert på toppen av rommet, denne vil fungere som avtrekksvindu ettersom den er høyt plassert og har et stort åpningsareal. For oppvarming av bygget benyttes det gulvvarme som bidrar til en jevn varmfordeling av bygget.

Klimahuset benytter hybridventilasjon som ventilasjonsstrategi hvor det fokuseres på bruk av naturlig ventilasjon med mekanisk ventilasjon som hjelp når den naturlige ventilasjonen ikke er tilstrekkelig. Zolykha i sin master undersøkte styringsstrategien for hybridventilasjon som er i bruk i dag og resultatene viste til dårlig inneklimate med trekk, stor temperatur fall, høyt CO<sub>2</sub>-nivå samt veldig høyt energiforbruk, hovedsakelig i form av oppvarming [27]. Figur 4.5 presenterer den nåværende makroen for vindusåpning i Klimahuset. Den fungerer slikt at vinduene skal åpnes når innetemperatur overstiger 21° eller når CO<sub>2</sub> konsentrasjonen overstiger 650 ppm. Vindusåpning skjer kun i driftsperioden som er klokka 9:00 til 17:00.



Figur 4.5, Makro for nåværende kontrollstrategi for vindusåpning i Klimahuset.

Ny kontrollstrategi for hybridventilasjon skal testes for Klimahuset. Med den nye kontrollstrategien skal det i hovedsak fokuseres på bruk av det mekaniske anlegget og utnytte naturlig ventilasjon når et sett med kriterier er tilfredsstillt som vist i kapittel 4.1.3. I tillegg skal hybridventilasjonsstrategien sammenliknes med Klimahuset med fullt mekanisk ventilasjon. Dette er for å beregne den mulige energibesparelsen.

#### 4.2.1 Forutsetninger for Klimahuset

Badet har ingen vinduer som kan åpnes og er samtidig kravpålagt med konstant luftmengde, av den grunn skal badet ikke inkluderes i simuleringene. Hensikten med denne undersøkelsen er å finne den mulige energibesparelsen ved bruk av en hybridventilasjonsstrategi, badet gjenstår det samme på begge scenarioene og er derfor ikke interessant å inkluderes. Tabell 4.3 presenterer Klimahusets klimaskall, verdiene er basert på de virkelige tallene som er innsamlet av Zolykha [27].

Tabell 4.3, Klimaskallet til Klimahuset [27].

Parameter, enhet	Verdi/egenskap
Gulvareal, m <sup>2</sup>	582 (Uten badet)
U-verdi for ekstern vegg, (W/m <sup>2</sup> K)	0.12
U-verdi for tak, (W/m <sup>2</sup> K)	0.10
U-verdi for gulv (W/m <sup>2</sup> K)	0.07
Glass U-verdi, (W/m <sup>2</sup> K)	0.88
Vinducts g-verdi	0.38
Normalisert kuldebro $\psi$ , (W/m <sup>2</sup> K)	0.03
Infiltrasjon n <sub>50</sub> , 1/h	0.73

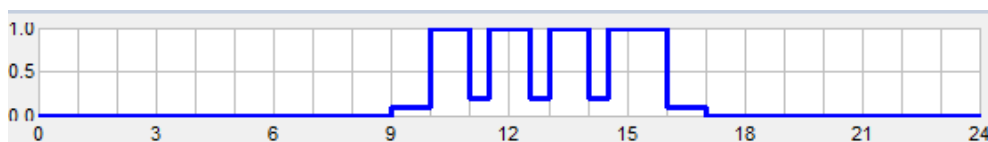
Verdiene som brukes for internlast er basert på de virkelige dataene hentet inn fra Zolykha. Belastning fra belysning er noe lavere enn det NS 3031 anbefaler. Men dette gjøres opp for ved at

amfiet har tre glassfasader som slipper inn mye dagslys, av utsyr befinner det kun en skjerm. Utstillingen har mindre vinduer og dermed trenger mer belysning. Utstyret i utstillingen består hovedsakelig av skjermer som spilles med fast tidsintervall. Tabell 4.4 presenterer internlastene til Klimahuset. For personbelastningen er det regnet med at bygget har en maksimal belastning på 62 personer fordelt likt mellom amfiet og utstillingen. Bekledning er satt til 0.5 til 1 clo, fra sommer til vinter. Aktivitetsnivået er satt til å være 1.2 MET, dette tilsvarer sittende aktivitet.

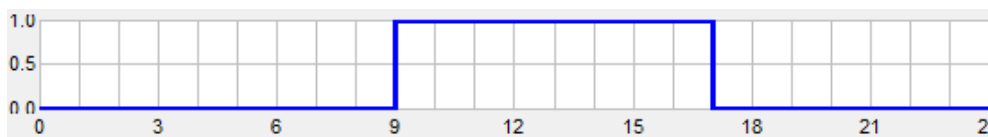
Tabell 4.4, Internlaster for Klimahuset.

Sone	Belysning (W/m <sup>2</sup> )	Personbelastning (m <sup>2</sup> )	Utstyr (W/m <sup>2</sup> )
Amfiet	2	3.8	1
Utstillingen	4	13.3	1

Schedulen for personbelastning til Klimahuset vises i figur 4.6, denne er basert på informasjon som Zolykha hentet fra brukerne. Åpningstiden til Klimahuset er hver dag fra klokken 9:00 til 17:00. Zolykha i hennes oppgave brukte den samme schedulen for personbelastning til utstyr og belysning. Dette er endret på og kan ses i figur 4.7.



Figur 4.6, Schedule for personbelastning.



Figur 4.7, Schedule for internbelastning fra belysning og utstyr.

### **Termisk komfort**

Termisk komfort for hybridventilasjon skal vurderes etter den adaptive termiske komfortmodellen som presentert i kapittel 2.2.2.4 i henhold til NS-EN 16798 figur B.1. For vurdering av termisk komfort med fullt mekanisk ventilasjon skal NS-EN 16798 Tabell B.1 benyttes. Begge ventilasjonsstrategier skal vurderes etter kategori II.

### **4.2.2 Ventilasjonsstrategi**

Det skal sammenliknes 3 ventilasjonsstrategier for å kunne vurdere fordelene med hybridventilasjon og den nye kontrollstrategien. Først og fremst skal Klimahuset med nåværende styringsstrategi undersøkes, deretter skal Klimahuset simuleres med fullt mekanisk ventilasjon og til slutt hybridventilasjon med den nye styringsstrategien for vindusåpning. Det skal gjøres noen små endringer med den nye styringsstrategien for hybridventilasjon for å bedre tilpasse Klimahuset ettersom det er en stor forskjell

på bruksmønsteret til Klimahuset og et typisk kontorlandskap, mer detaljer i kapittel 4.2.2.1. Setpunktverdier for Klimahuset vises i tabell 4.5

Tabell 4.5, Setpunktverdier for ventilasjonsstrategiene

	CO <sub>2</sub> maks (ppm)	VAV Min Luftmengde (L/s*m <sup>2</sup> )	VAV Maks luftmengde (L/s*m <sup>2</sup> )	Oppvarmings-Setpunkt (°C)	VAV Kjølesetpunkt (°C)
Fullt mekanisk ventilasjon	900	0.4	4	20.5	25
Nåværende styringsstrategi for vindusåpning	(650) <sup>1</sup> 1000	0.4	2	20	23
Ny styringsstrategi for vindusåpning	900 (950) <sup>1</sup>	0.4	2	20	26

1. For vindusåpning

Aggregatet skal ha en gjennomsnittlig SFP på 1.5 kW/m<sup>3</sup>s og varmegjenvinneren har en gjennomsnittlig effektivitetsgrad på 80%. Det finjusteres noen verdier for kontroll av nattventilasjon og vindusåpning, dette er på grunn av at Klimahuset har veldig lav internlast i motsetning til et typisk kontorbygg. Dette da påvirker oppvarmings- og kjølebehovet. Derfor er nedre grense for utetemperatur satt til 12°C og nedre grense for innetemperatur 22°C for nattventilering. Nattventilering skal også kun benyttes i perioden fra 1. mai til 1. september. Dette skal hindre unødvendig kjøling av bygget. Nattventilering er satt til å kun være i bruk i tidsperioden fra 1. mai til 1. september. Dette gjelder kun simulering av Klimahuset med fullt mekanisk ventilasjon.

#### 4.2.2.1 Ny styringsstrategi for vindusåpning

Styringsstrategien for vindusåpning er den samme som presentert i kapittel 4.1.3. Noen endringer er gjort for å tilpasse Klimahuset bedre. Oppvarmingssignal i kontrollsonen 6 er endret til å være på 20°C på driftstid og 19°C utenfor driftstiden. Kontroll for nattventilasjon med vindusåpning er begrenset til en tidsperiode fra 1. mai til 1. september. Ettersom det er vesentlig mye luftskifte mellom de to sonene så er maks luftskifte løftet opp til maks 10 ACH i kontrollsonen 1.

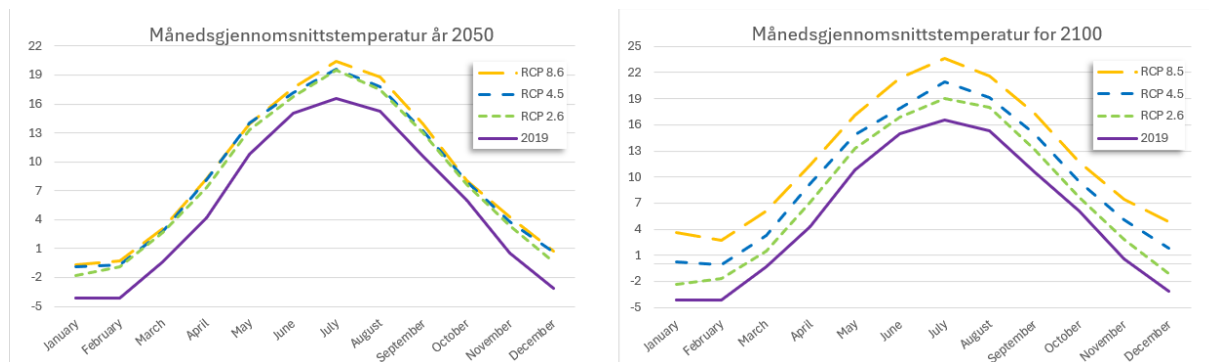
### 4.3 Klimadata

Programmet brukt til å simulere klimafilene er Meternorm. Meternorm gir oversikt over værstasjoner med historisk klimadata, Meternorm gir også muligheten å bruke flere værstasjoner for å interpolere til en ønsket lokasjon. Meternorm er fullt kompatibel med IDA-ICE hvor klimafilene kan nedlastes i form av PRN fil. Med historisk klimadata kan dette også brukes for å simulere fremtidig klima. Her kan det

velges mellom ulike fremtidig klimasenarioer som tidligere nevnt i kapittel 2.3.1 og årstid. Klimadata hentet fra værstasjonen Oslo Blindern i år 2019, dette er det seneste året som kunne bli valgt.

#### 4.3.1 Simulering med fremtidig klimadata

For å undersøke hvor motstandsdyktig kontrollstrategien for hybridventilasjon er så skal Klimahuset simuleres med fremtidig klimadata. Alt av settpunktverdier, egenskaper o.l skal forbli det samme, ingenting skal tilpasses/endres. Det skal undersøkes om den termiske komforten, luftkvalitet og energibesparelsen er tilstrekkelig under klimaendring. Det skal simuleres for 2 fremtidig årstider; 2050 og 2100. For begge disse årsperiodene skal det simuleres med 3 klimamodeller, disse er da RCP 2.6, RCP 4.5 og RCP 8.5. Figur 4.8 presenterer månedsgjennomsnittstemperatur for år 2050 og 2100. Lilla linjen representerer nåværende klima fra 2019. år 2050 viser ikke til stor endring mellom de ulike fremtidige klimamodellene men forskjellene kommer frem i 2100 hvor RCP 8.5 har gjennomsnittstemperatur i juli på 23.6°C. Dette er en temperaturdifferanse på 7°C sammenliknet med nåværende klima.



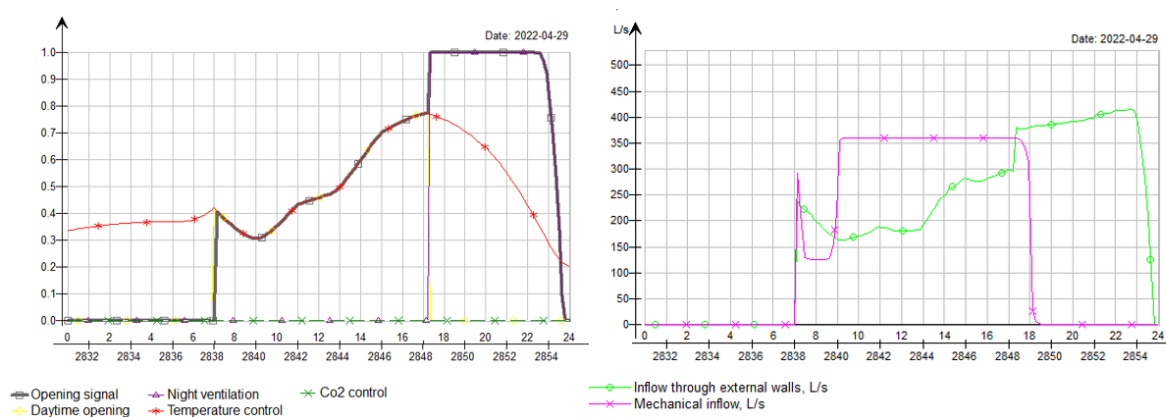
Figur 4.8, Månedsgjennomsnittstemperatur for år 2050 til venstre og 2100 til høyre.

## 5 Resultat

Dette kapittelet presenterer resultatene for simuleringer gjort på IDA-ICE for å undersøke effektiviteten og robustheten til den nye styringsstrategien for hybridventilasjon. Først er kontrollstrategien undersøkt for et typisk kontorbygg i Norge. Deretter skal styringsstrategien testes for Klimahuset på Tøyen. Styringsstrategien skal sammenliknes med den nåværende styringsstrategien til Klimahuset, men også Klimahuset med fullt mekanisk ventilasjon for å undersøke energieffektiviteten og innklimaet. Til slutt skal simuleringer av Klimahuset med fremtidig klima presenteres.

### 5.1 Simulering av et typisk kontorlandskap

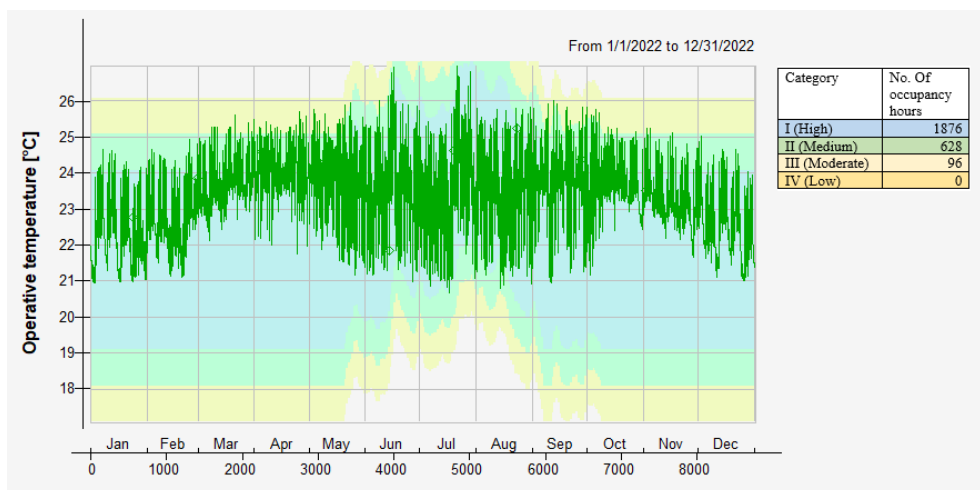
Grafen til venstre i figur 5.1 presenterer kontrollsignalet for vindusåpningen for en tilfeldig dag i april (29. april). Temperatur-kontrollen bestemmer i hovedsak åpningsgraden av vinduene på dagtid. CO<sub>2</sub> nivået stiger aldri over setpunktet på 950 ppm og av den grunn vil ikke signalet for CO<sub>2</sub>-kontroll slå ut. Dette skyldes mulig stor mengde internlast slik at temperaturen øker i større grad enn det CO<sub>2</sub> nivået gjør av personbelastningen. Signal i mørkelilla på figur til venstre presenterer åpningsgraden for nattkjøling, her kan en se at den gir full åpningsgrad når tidsperioden for nattkjøling gjelder. Grafen til høyre viser luftinnstrømninger til sonen hvor det er god sammenheng mellom vinduets åpningsgrad og innstrøm gjennom eksterne vegger vist i fargen grønn. Vinduene gjenstår åpne 27% av tiden i okkupasjonstiden, dette inkluderer ikke nattventilering med vindusåpning. Vinduene er definert som åpne dersom åpningsgraden er 10% eller mer. I Sommeren gjenstår vinduet for det meste åpent og mindre åpnet i de kjøligere sesongene. Dette er for å hindre stort varmetap og heller benytte mekanisk ventilasjon med varmegjenvinner.



Figur 5.1, Kontrollsignal for vindusåpning til venstre og tilluft til kontoret på høyre

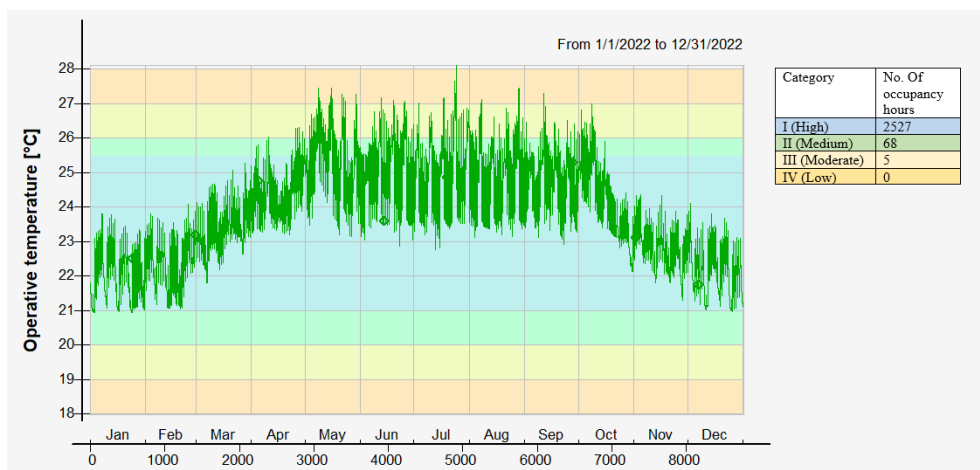
### 5.1.1 Termisk klima

Kontorlandskapet med hybridventilasjon overstiger operative temperaturen på 26°C i 18.7 timer med høyeste temperatur på 26.95°C. Dette tilfredsstillter Tek 17 §13-4 sin anbefaling som tillater et maksimum overskridelse på 50 timer i året. Men ettersom bygget utnytter vindusåpning som hovedenhet for nedkjøling av bygget skal termisk komfort heller vurderes etter NS-EN 16798 Figur B.1 som baseres på den adaptive termisk komfort modellen. Figur 5.2 presenterer den operative temperaturen for kontorlandskapet. kategoriene er delt opp i fargekoder som vist i tabellen på figuren. Imidlertid ser det ut som den hybride løsningen for kontorlandskapet har vanskeligheter å opprettholde termisk komfort i mai, april og september hvor temperaturen befinner seg deler av tiden innenfor kategori III. Den operative temperaturen i kontorbygget overstrider kategori II 96 timer av året.



Figur 5.2, Operativ temperatur med hybridventilasjon delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 figur B.1

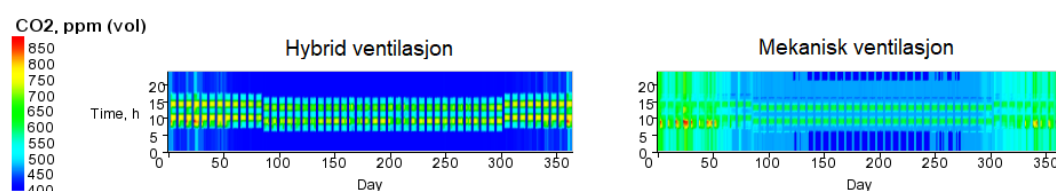
Kontorlandskapet med mekanisk ventilasjon overstiger operative temperaturen på 26°C i 4.7 timer. Figur 5.3 viser resultatet for termisk komfort for kontorlandskapet med mekanisk ventilasjon. Termisk komfort er vurdert etter NS-EN 16798 tabell B.2. Den termiske komforten ser ut til å være svært tilfredsstillt med kun 5 timer i kategori III og hele 2527 timer av okkupasjonstiden i kategori I som tilsvarer en PPD på <6%. PPD for årsperioden for mekanisk- og hybridventilasjon kan ses i vedlegg 1.



Figur 5.3, Operativ temperatur med mekanisk ventilasjon delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 Tabell B.1

### 5.1.2 Luftkvalitet

Resultatet for luftkvalitet målt i ppm CO<sub>2</sub> er illustrert i figur 5.4. Figuren viser et «Carpet plot» med tid på dagen i y-aksen i henhold til dag i året på x-aksen. Hybridventilasjon tillater vindusåpning utenfor driftstid selv på vintertid. Nattventilering med mekanisk ventilasjon er kun mulig i perioden 1. mai til 30. september og av den grunn har hybridventilasjon lavere CO<sub>2</sub> konsentrasjon utenfor driftstiden. Hybridventilasjon får høyere maksimumsverdier for CO<sub>2</sub> konsentrasjon med opp mot 750ppm, og mekanisk ventilasjon får toppverdier på rundt 600ppm. I vintersesongen har mekanisk ventilasjon høyere CO<sub>2</sub> verdier enn sommertiden. Høyeste CO<sub>2</sub> konsentrasjonen for mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon er 900ppm og 950ppm, henholdsvis.

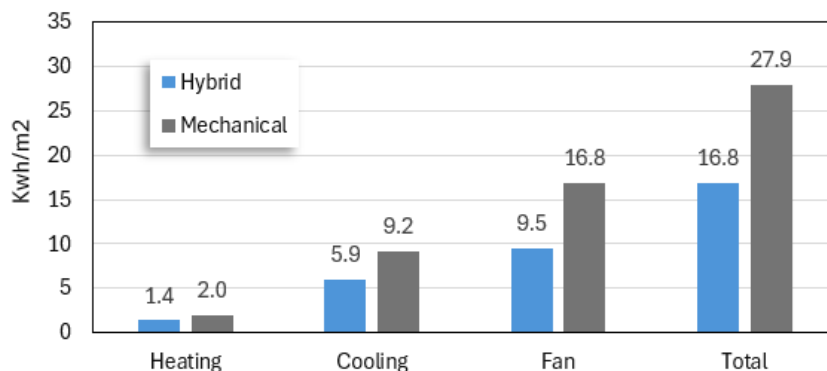


Figur 5.4, «Carpet plot» for luftkvalitet målt i ppm CO<sub>2</sub>

### 5.1.2 Energibruk og besparelse

Figur 5.5 presenterer resultatet for energibruk for et typisk kontorbygg med de ulike ventilasjonsstrategiene. Energibruk til oppvarming ser ut til å holde seg veldig lavt. Dette er fordi bygget har en god isolasjonsevne og får mye varmetilskudd gjennom internlaser. Grunnet dette varmetilskuddet vil det bli større behov for kjøling. Hybridventilasjon viser til å ha en energibesparelse for kjøling på 35% framfor fullt mekanisk og vifteenergi reduseres med 43%. Den totale energibesparelsen ved å benytte hybridventilasjon fremfor fullt mekanisk ventilasjon viser til å være opp mot 40% for kontorlandskapet. Oversikt over resultatet for simuleringene kan ses i vedlegg 1.





Figur 5.5, Sammenliknet energibruk for hybridventilasjon i blå og fullt mekanisk i grå.

## 5.2 Simuleringer av Klimahuset

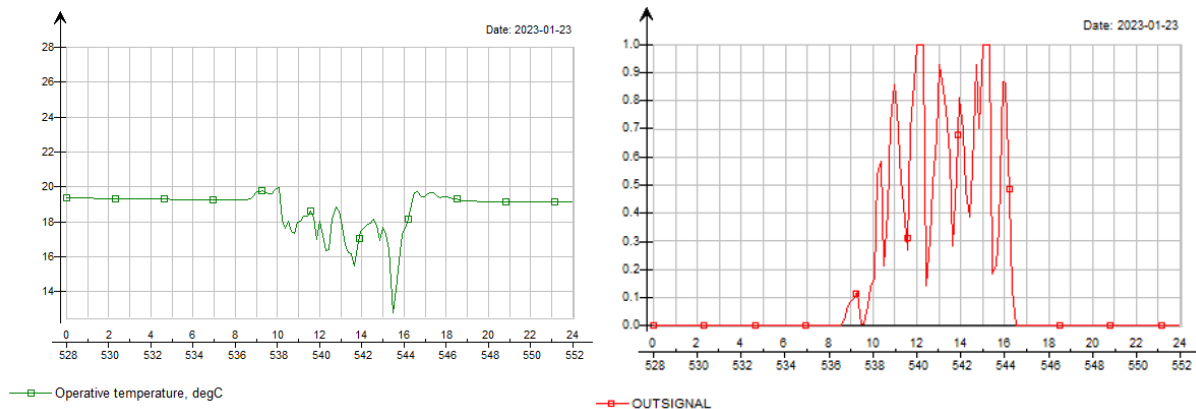
Klimahuset ble simulert for 3 ulike ventilasjonsstrategier; Klimahuset med nåværende styringsstrategi for hybridventilasjon, Klimahuset med fullt mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon med ny kontrollstrategi for vindusåpning. Kun Amfiet og Utstillingen ble benyttet i simuleringene, badet er fjernet. For å undersøke termisk komfort ble det satt mest fokus på Amfiet. Kun Amfiet ble benyttet i simuleringene med fremtidig klima i henhold til termisk komfort og luftkvalitet. Dette er fordi Amfiet har mye vindusareal og høy personbelastning sammenliknet med romarealet og er dermed mest utsatt for overvarme og dårlig luftkvalitet. For energiberegning av Klimahuset i henhold til fremtidig klima ble både Amfiet og Utstillingen brukes.

### 5.2.1 Resultat av nåværende styringsstrategi for Klimahuset

Styringsstrategien for hybridventilasjon som benyttes i Klimahuset på Tøyen i dag ser ut til å ha problemer. Ettersom styringsstrategien for ventilering baseres på primært bruk av vindusåpning med mekanisk ventilasjon som sekundær ventilasjon medføres det stort varmetap. Klimahuset med den nåværende styringsstrategien har en årlig energibruk på 88.3 kWh/m<sup>2</sup> hvor 96% av energibruken går til oppvarming. Sammenliknet med Klimahuset med fullt mekanisk ventilasjon som har en årlig energibruk på 63.6 kWh/m<sup>2</sup> er det 39% høyere årlig energibruk. Klimahuset har et bruksmønster som tilsvarer en total okkupasjonstid på 2920 timer, av denne tiden er vinduene i amfiet åpent 89% av tiden.

I vintersesongen oppstår det vanskeligheter med å opprettholde god termisk komfort ettersom vindusåpningen etterlater et stort temperaturfall, se figur 5.6. På den kaldeste dagen går den operative temperaturen i amfiet ned til under 13°C i 23. januar, da er utetemperaturen -15°C. Temperaturfall oppstår kun i okkupasjonstiden der Klimahuset benytter vindusåpning. Luftkvaliteten ser ut til å være

tilfredsstillende med max CO<sub>2</sub> på 800 ppm i januar, og holder seg ellers jevnt på setpunktverdien på 650 ppm.

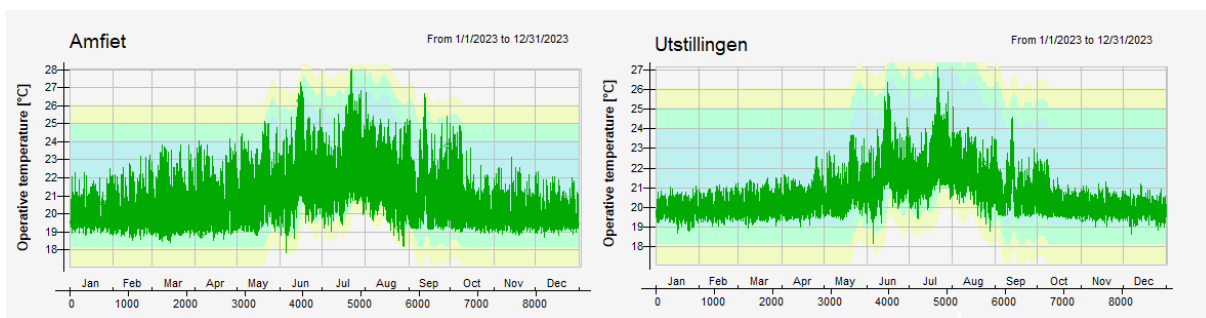


Figur 5.6, Operativ temperatur i amfiet til venstre og åpningsgrad av vinduer i Amfiet til høyre.

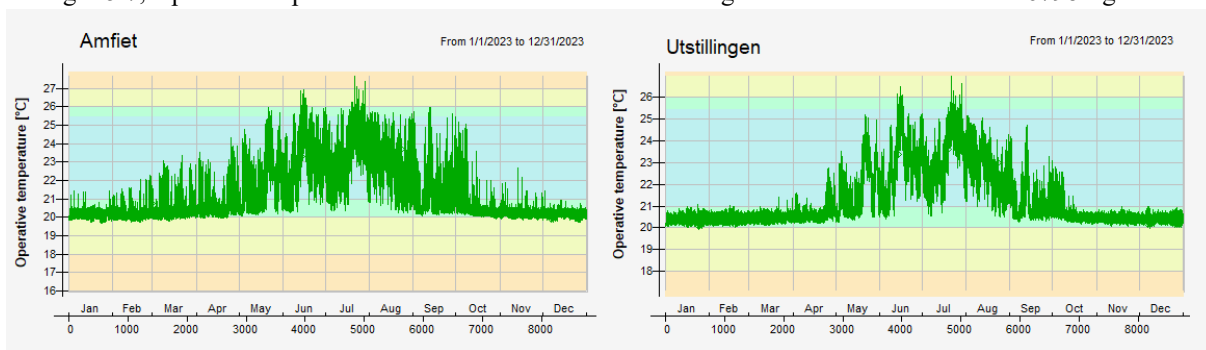
## 5.2.2 Klimahuset med ny kontrollstrategi

Det viser seg at ventilasjonsbehovet er svært lavt. Den maksimale luftmengden for hybridventilasjon er satt til 2 L/m<sup>2</sup>\*s for både Amfiet og Utstillingen, men kan reduseres en del ettersom luftmengdebehovet nesten aldri passerer 600 L/s som tilsvarer i overkant av 1 L/m<sup>2</sup>\*s, se vedlegg 2. I amfiet er vinduene åpne i totalt 468 timer med minste grense på 10% åpningsgrad, dette tilsvarer at prosentandel av okkupasjonstiden der vinduene er åpne er på 16%. Sammenliknet med kontorlandskapet er dette 11 prosentpoeng mindre. Dette kan skyldes at kontorlandskapet har vesentlig høyere nedkjølingsbehov enn Klimahuset.

Resultatet for termisk komfort for både hybridventilasjon og mekanisk ventilasjon kan ses i figur 5.7 og figur 5.8. Det ser ut som den operative temperaturen forholder seg på nedre grense mye av tiden. Det er vesentlig større temperaturendringer i Amfiet enn det er i Utstillingen både for HV (Hybridventilasjon) og MV (Mekanisk ventilasjon). Amfiet med HV ser ut til å ha de største utfordringer med å holde stabil operativ temperatur med antall timer over 26°C på 41.3 timer se tabell 5.1. Vurdering etter den adaptive termisk komfort modellen for HV kan en se at den operative temperaturen holder seg innen kategori II for mesteparten av tiden med kun 8 timer overskridelse for amfiet og 1 time for utstillingen. MV har kun 5 timer utenfor kategori II i amfiet og 0 timer i utstillingen. Den maksimale operative temperatur er relativt likt for begge soner og ventilasjonsstrategier på omtrent 27°C. Det er tydelig at MV gir en mer stabil innetemperatur, men mye av temperatursvingningene er utenfor driftstiden og av den grunn ikke like relevant.



Figur 5.7, Operativ temperatur i Klimahuset med HV delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 figur B.1



Figur 5.8, Operativ temperatur i Klimahuset med MV delt i kategorier i henhold til NS-EN 16798 Tabell B.1

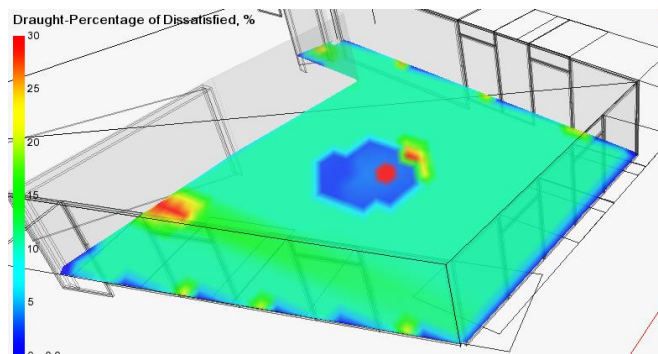
Tabell 5.1, Oversikt over termiske egenskaper for amfiet og utstillingen med HV og MV.

	Zone	Max $T_{op}$ [°C]	Hours of $T_{op}$ < 26°C [h]	Hours outside category II [h]
HV	Amfiet	27.9	41.3	8
	Utstillingen	27.2	1.8	1
MV	Amfiet	27.5	4.3	5
	Utstillingen	27.0	0	0

I Amfiet ser det ut til å være en del vindusåpning på vintertid, vinduene har til tider en åpningsgrad på rundt 10-30% for korte perioder, selv på de kaldeste dagene. Dette er noe som ikke er ønskelig ettersom det fører til stort temperaturfall og ekstra oppvarmingsbehov. Og av den grunn er det nødvendig å undersøke den vertikale temperaturredifferansen og risikoen for trekk.

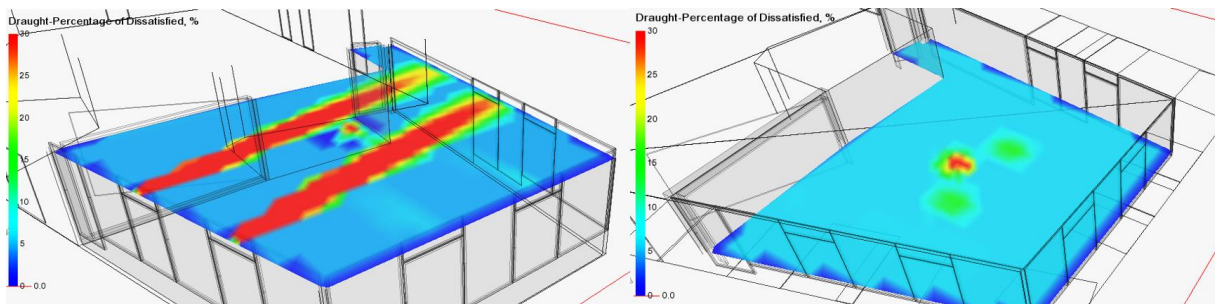
For å vurdere risikoen for trekk (DR%) er det blitt utført Detaljert soneanalyse med IDA-ICE. Det er gjort analyse for 2 ulike dager, en i vinter og en i sommer. Figur 5.9 presenterer DR% for den kaldeste dagen i januar (23.januar) med utetemperatur på -15°C. Klokkeslett på dagen er 15:15 og åpningsgraden av vinduene er kun 15% den tiden. Ved døren som fører til utstillingen er det en del lufthastighet som gir en del lokal trekk. Ved vinduene ser det ut som at det ikke er særlig mye trekk, men i hele sonen ser ut til å ha en DR% på rundt 10-13%. «flekken» i midten av sonen er der tilluften til sonen er. Amfiet er kun gitt en tilluftsventil og den er plassert i midten av sonen, dette vil medføre stor lufthastighet der ventilen er som kan forklare hvorfor det kan oppleves trekk i midten av rommet. Vindusåpning på kalde vinterdager medfører stort temperaturfall og bør unngås på kalde dager som dette, dette kan bedres ved

å øke den maksimale tilluftsmengden for amfiet slik at det ikke trengs vindusåpning for å redusere CO<sub>2</sub>-nivået.



Figur 5.9, Detaljert soneanalyse for opplevd trekk i Klimahuset med hybridventilasjon i 23. januar.

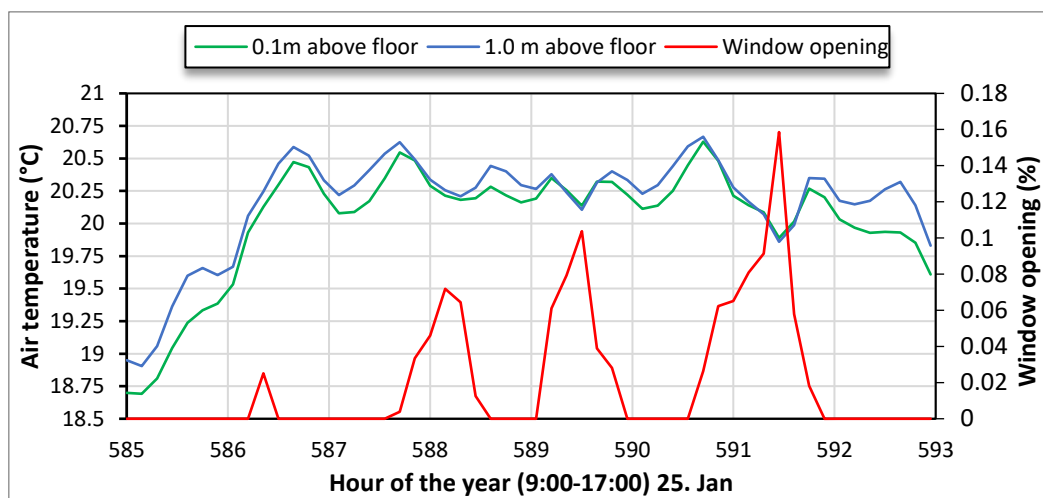
Den andre simulerte dagen for å undersøke trekk er en varm sommerdag med høy åpningsgrad av vinduene. Figur 5.10 presenterer en detaljert soneanalyse for trekk i Amfiet den 20. juli. I det tidspunktet bildet er tatt har vinduene en åpningsgrad på 70% og det blåser vind med hastighet på 4.3 m/s mot den vest-vendte fasaden til Amfiet. I bildet til venstre i figur 5.10 kan det ses at det blåser veldig mye luft inn i sonen og dermed forårsaker mye lokalt trekk. Dette er da ved himlinghøyde som er utenfor okkupasjonssonen. Bildet til høyre i figur 5.10 er tatt samme klokkeslett og dag og viser at den store luftmengden gjennom vinduene ikke påvirker trekk i oppholdssonen.



Figur 5.10, Detaljert soneanalyse for opplevd trekk i Klimahuset med hybridventilasjon 20. juli, Venstre bilde er ved himlingen og høyre bilde er 1 meter over gulvet.

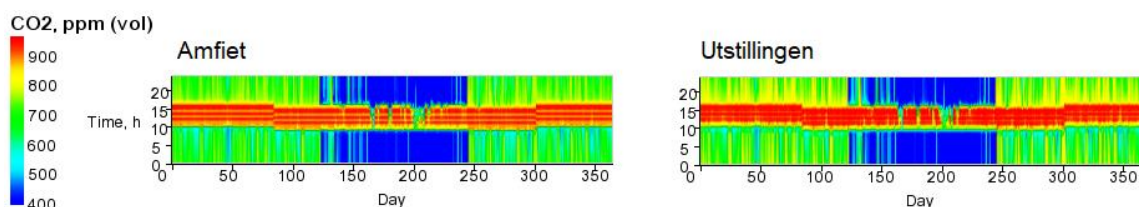
Figur 5.11 presenterer den vertikale temperaturdifferansen og dens påvirkning av vindusåpning. Simuleringen er gjort for 25. januar hvor utetemperaturen er da rundt -9°C. Kravene om maksimal vertikal temperaturdifferanse i henhold til NS-EN ISO 7730 er gitt ved høydene 0.1 til 1.1 meter over gulvet, i simuleringen er det gitt resultat for lufttemperatur på 0.1 meter og 1.0 meter over gulvet, ikke 1.1m. Lufttemperaturen ser ut til å synke i det vinduene åpnes men holder seg likevel innenfor komfortabel temperatur. Merkelig nok ser det ut til at den vertikale temperaturdifferansen minker når vinduene åpnes. Når vinduene åpnes går den vertikale temperaturdifferansen mot ~0°C. Dette kan

skyldes at vindusåpningen fører til at luften blander seg godt i det uteluften kommer inn i rommet grunnet den store temperaturforskjellen på inne- og uteluften.

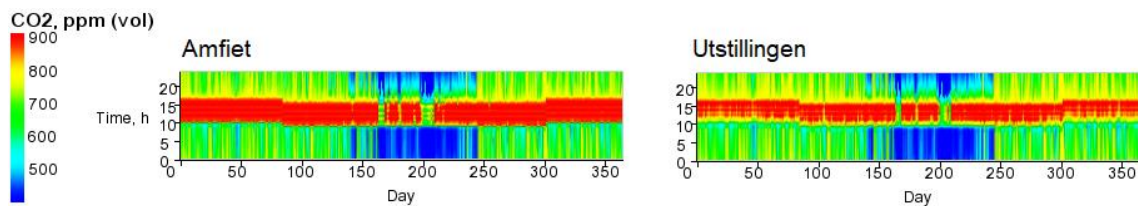


Figur 5.11, Vertikal temperaturredifferanse med vindusåpning i Amfiet for 25. januar

Luftkvaliteten i form av ppm CO<sub>2</sub> for Klimahuset kan ses i figur 5.12 med HV og figur 5.13 for MV. Det viser til tider høye konsentrasjoner av CO<sub>2</sub> i okkupasjonstiden, men overstiger aldri Arbeidertilsynet veiledning 444 sitt krav til CO<sub>2</sub>-nivå på maks 1000 ppm. HV har en øvre grense på 950ppm, det er da CO<sub>2</sub>-kontrollen for vindusåpning gir signal. For mekanisk ventilasjon er den øvre grensen på 900ppm. Tykkelsen på «det røde feltet» for HV ser ut til å være større i utstillingen, dette kan være fordi det er færre vinduer i Utstillingen enn det er i amfiet. For MV er «det røde feltet» bredere i amfiet enn i utstillingen, dette kan være grunnet den høye personbelastningen relativt til romarealet. Det ser ut som Klimahuset med HV klarer å redusere CO<sub>2</sub> nivået raskere med nattventilasjon enn det MV klarer. «Det blå feltet» som viser område med 400ppm ser også ut til å være større i lengden for HV enn MV. De varmeste periodene i sommeren viser til å gi bedre luftkvalitet denne kan skyldes at ventilasjonsmengden økes for å kaste ut overskuddsvarmen og dermed gir mer luftskifte. Se vedlegg 2 for mer detalj om luftmengde for både HV og MV.



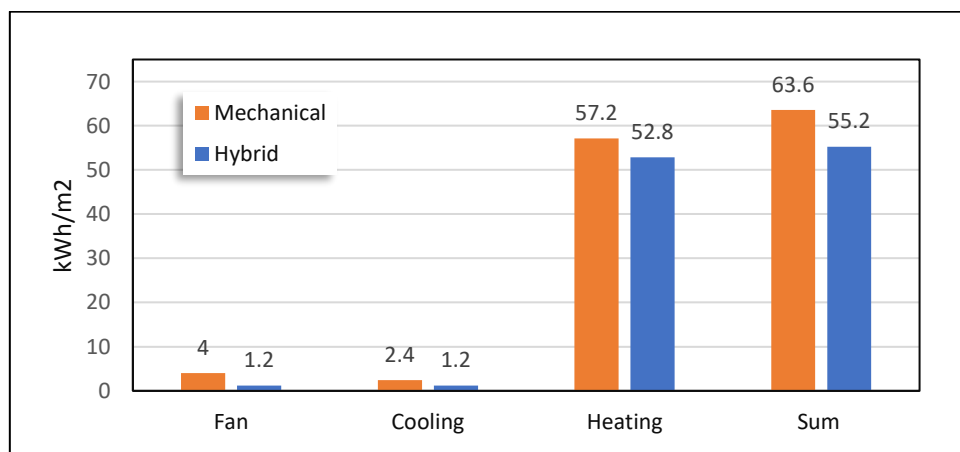
Figur 5.12, «Carpet plot» for luftkvalitet målt i ppm CO<sub>2</sub> for Klimahuset med HV.



Figur 5.13, «Carpet plot» for luftkvalitet målt i ppm CO2 for Klimahuset med MV.

### 5.2.2.1 Energibruk og besparelse

Energibruket for oppvarming, nedkjøling og viftebruk til Klimahuset med HV og MV kan ses i figur 5.14. Ettersom Klimahuset har relativt lite internlaster sammenliknet med kontorlandskapet går vesentlig større grad av energibruken til oppvarming av bygget kontra nedkjøling. Likevel er det stor relativ endring i energibruk for viftebruk og nedkjøling med HV framfor MV. Energibesparelsen for viftebruk og nedkjøling er 70% og 50.7%, henholdsvis. For oppvarming av bygget har HV en besparelse på 7.6%, dette skyldes at bygget tillater en lavere temperatur med HV ettersom termisk komfort er vurdert i henhold til NS-EN 16798 Figur B.1. Den totale energibruken for oppvarming, kjøling og viftebruk for Klimahuset med hybridventilasjon er 13.1% lavere enn energibruken med fullt mekanisk ventilasjon framfor fullt mekanisk ventilasjon. Dette er vesentlig lavere enn kontorlandskapet som fikk en energibesparelse på 40% med hybridventilasjon. Den nye styringsstrategien for hybridventilasjon gir 60% lavere energibruk sammenliknet med den nåværende kontrollstrategien til Klimahuset.

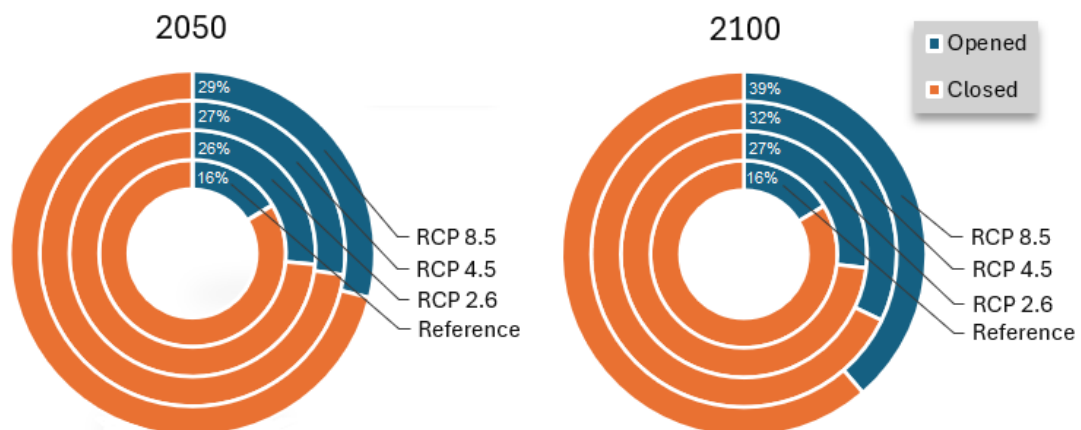


Figur 5.14, Energibruket til Klimahuset med mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon

## 5.3 Resultat for simulering av Klimahuset med fremtidig klima

For å undersøke hvor motstandsdyktig den nye kontrollstrategien for hybridventilasjon er mot fremtidig klima er Klimahuset blitt simulert for år 2050 og 2100 med 3 forskjellige fremtidig klimamodeller; RCP 2.6, 2.4 og 8.5.

Figur 5.15 presenterer et diagram som illustrerer prosentandel av okkupasjonstiden der vinduene er åpne i Amfiet. Den innerste sirkelen er referansen som representerer vindusåpning med nåværende klima. For år 2050 er det allerede en økning i overkant av 10 prosentpoeng, for de ulike klimamodellene er det minimal forskjell mellom hverandre med prosentandel tid åpent på 26% og 29% for RCP 2.6 og RCP 8.5, henholdsvis. For år 2100 ser man en vesentlig større forskjell mellom de ulike fremtidige klimamodellene, fra 27% av tiden åpent med RCP 2.6 til 39% med RCP 8.5. Dette er da forventet ettersom kjølebehovet blir særdeles større ved høyere utetemperatur, temperaturforskjellen mellom de ulike fremtidige klimamodellene kan ses i figur 4.8 i kapittel 4.3.1.



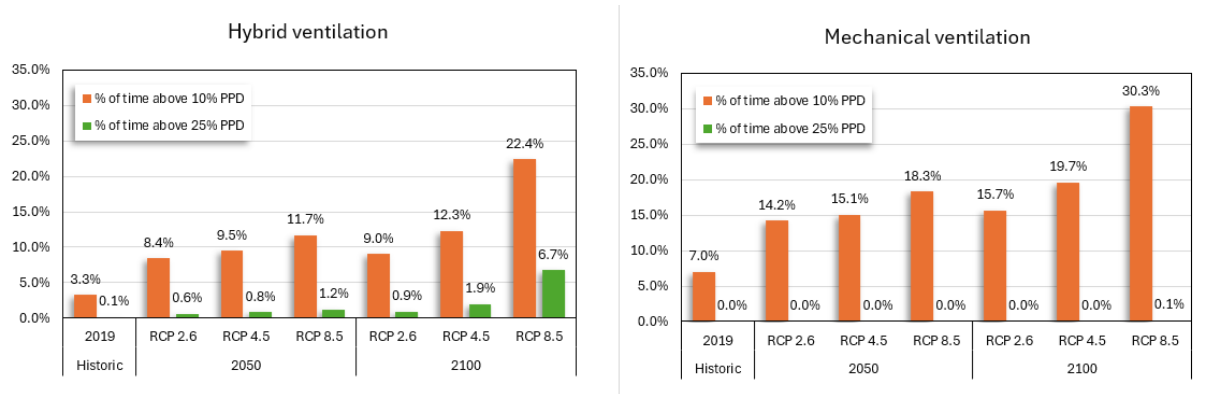
Figur 5.15, Antall prosent av okkupasjonstiden der vinduene er åpne for ulike klimadata

### 5.3.1 Termisk komfort

Termisk komfort for Klimahuset med HV og MV kan ses i figur 5.16. Det er en tydelig økende trend med prosent misfornøyde for både HV og MV. Verdien i y-aksen presenterer prosentandel tid der PPD er over 10% for oransje søyler og 25% for grønne søyler. Prosentandel misfornøyde er kun beregnet i okkupasjonstiden, tid utenfor driftstid er ikke inkludert under beregningene. Klimahuset med HV kontra MV ser ut til å ha mindre tid over 10% PPD for alle klimasenarioene. Prosentandel misfornøyde overstiger nesten aldri 25% med fullt mekanisk ventilasjon, dette er grenseverdien for kategori IV i NS-EN 16798. For hybridventilasjon overstiges PPD<25% sjeldent, men for år 2100 med RCP 8.5 sliter HV å holde temperaturen nede på sommerperioden og dermed har 6.7% av okkupasjonstiden over 25% PPD.



Det er stor forskjell på Klimahuset med MV og HV når det kommer til maks misnøye med den termiske komforten. Maks PPD for Klimahuset med HV og MV i år 2100 med 8.5 RCP er 63.2% og 34.9%, henholdsvis. Den operative temperaturen er da 29.9°C for HV og 27.9°C for MV. Maks PPD er da lite representativt for å vurdere den termiske komforten, men allikevel forteller det om ventilasjonsstrategiens evne til å kaste ut overskuddsvarmen.



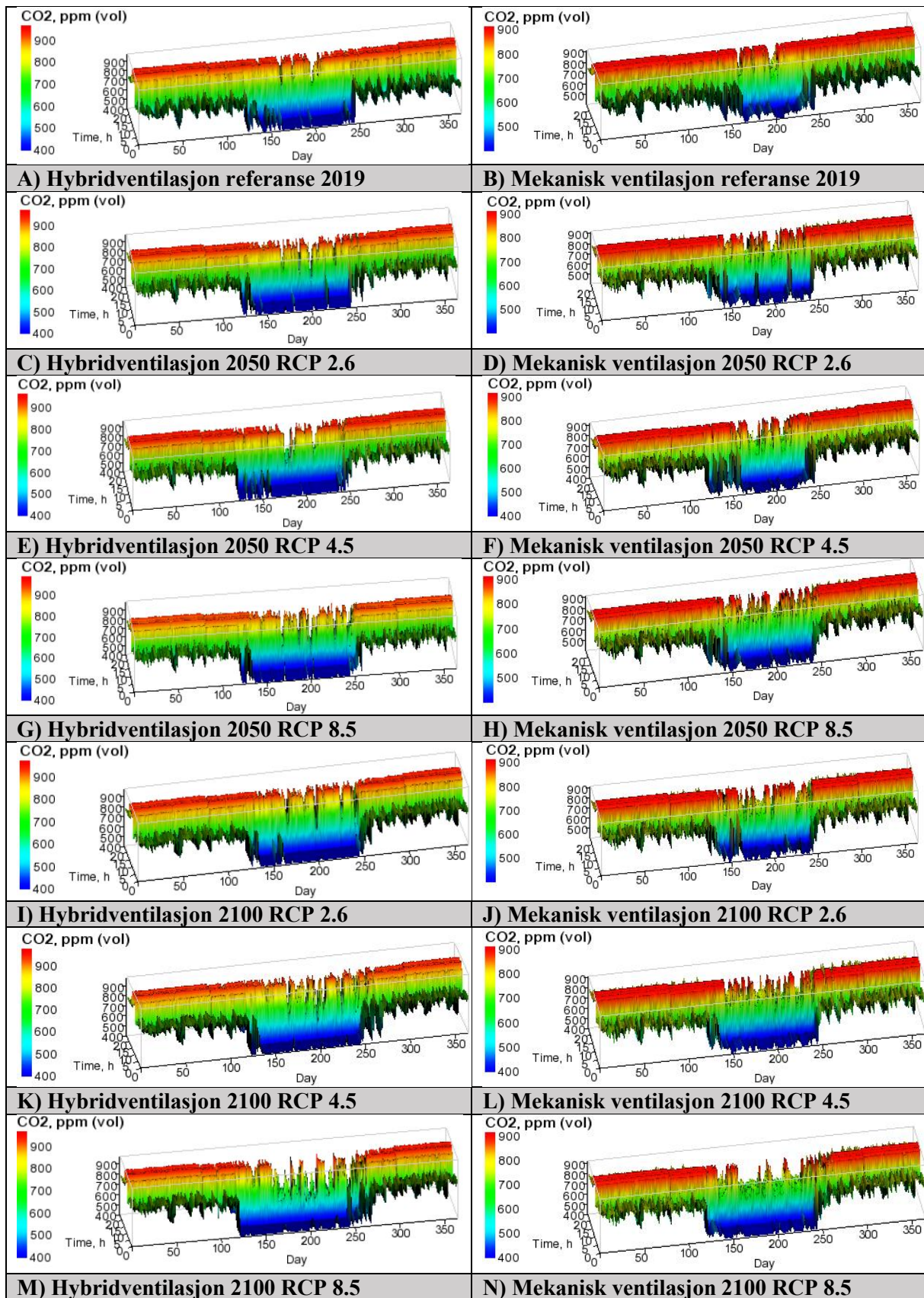
Figur 5.16, Termisk komfort målt i PPD for Klimahuset med HV til venstre og MV til høyre, simulert med ulike fremtidige klimamodeller.

Basert på den adaptive termiske komfortmodellen i henhold til NS-EN 16798 så er den termiske komforten tilfredsstillende for alle klimasenarioene med hybridventilasjon. For år 2100 med RCP 8.5 er Klimahuset med HV kun 23 timer utenfor kategori II. For mer detaljer om termisk komfort med fremtidig klima for Klimahuset se vedlegg 3

### 5.3.2 Luftkvalitet

Figur 5.17 presenterer 3D «carpet plot» for luftkvalitet med hybridventilasjon og mekanisk ventilasjon for ulike fremtidige klimasenarioer. Her er det viktig å skille mellom øvre grense for HV og MV. HV har øvre grense på 950 ppm og MV har øvre grense på 900 ppm. Bredden av plotten representerer hvilken time det er av dagen, lengden representerer hvilken dag det er i året og høyden er konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i luften. «det blå feltet» ser ut til å utvide i fremtiden, dette kan være på grunn av det økte behovet for nattventilasjon på grunn av økt utetemperatur. Som tidligere nevnt så kan det ses at begge ventilasjonsstrategier viser til bedre luftkvalitet på sommertiden, denne forskjellen ser ut til å bli større ettersom utetemperaturen øker, dette medfører mer tid der vinduene er åpne. År 2050 med RCP 8.5 med HV i G) ser ut til å avvike fra de andre resultatene med lavere CO<sub>2</sub> konsentrasjon. Luftkvalitet ser ut til å ikke bli negativt påvirket av fremtidig klimaendringer.



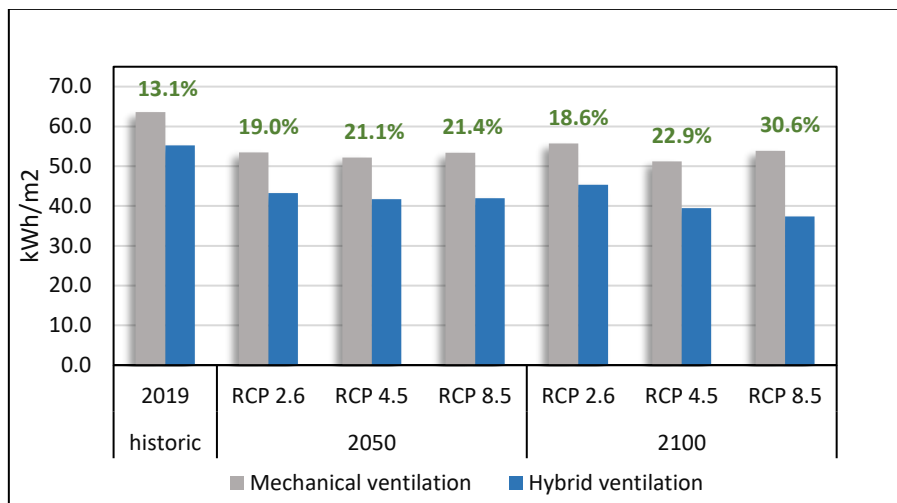


figur 5.17, "3D carpet plot" for luftkvalitet i ppm<sub>CO2</sub> med hybridventilasjon og mekanisk ventilasjon for ulike fremtidig klimasenario.

### 5.3.3 Energi

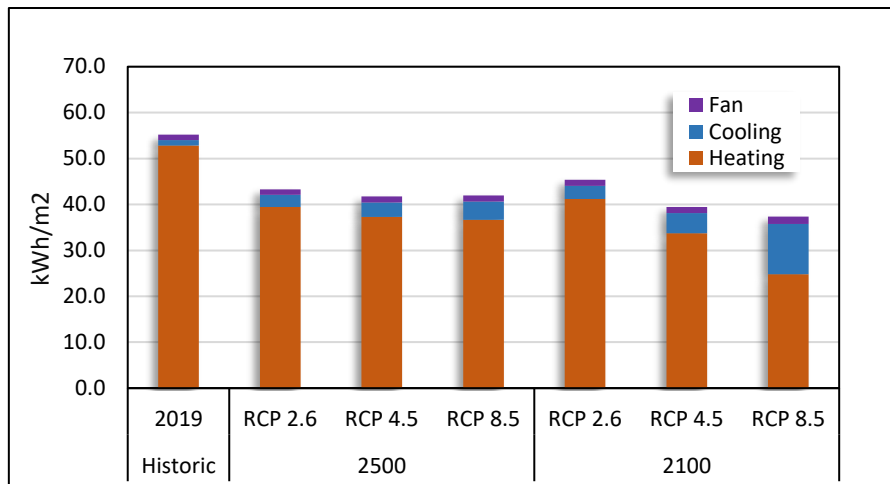
Figur 5.18 presenterer resultatet for energibruken til Klimahuset simulert med mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon med ulike fremtidige klimasenarioer. Med Klimahuset simulert med historisk klimadata fra 2019 ligger energibesparelsen med HV på 13.1% kontra bruk av MV. Begge ventilasjonsstrategier ser ut til å redusere i energibruk, men HV ser ut til å få en sterkere reduksjon av energibruk. I nær fremtid (2050) ser det ut som det kan forventes rundt 20% i energibesparelse med HV kontra MV, dette er en økning på 7 prosentpoeng i forhold til nåværende data. I 2100 ser det ut som det er stor forskjell mellom de ulike klimamodellene i henhold til energibesparelse.

I år 2100 gir Klimahuset med HV besparelse på 18.6% med RCP 2.6 og 30.6% med RCP 8.5. Med økt utetemperatur kreves det større behov for nedkjøling, for mekanisk ventilasjon betyr dette mer viftepådrag og mer effekt til nedkjøling av luften. For hybridventilasjon kan det ofte nøyes med kun vindusåpning og kan forklare hvorfor energibesparelsen er større når utetemperaturen øker.



Figur 5.18, Energiforbruk for Klimahuset med mekanisk ventilasjon og hybridventilasjon simulert med ulike fremtidige klimasenarioer.

Figur 5.19 presenterer fordelingen av energibruk i henhold til oppvarming, nedkjøling og viftebruk for Klimahuset med hybridventilasjon for ulike klimasenarioer. Det er tydelig at oppvarmingsbehovet reduseres i fremtiden, men på den motsatte siden vil kjølebehovet vil øke. I 2019 går 96% av energibruken til oppvarming av bygget mens i år 2100 med RCP 8.5 går 66% av energibruken til oppvarming. Energibesparelsen for hver energipost med HV kontra MV ser ut til å variere lite mellom de ulike klimasenarioene. Energibesparelsen for viftebruk, nedkjøling og oppvarming i år 2100 med RCP 8.6 sammenliknet med nåværende klima har en endring på 5, -5.1 og 1.6 prosentpoeng, henholdsvis. Ypperlige detaljer om energibruk for Klimahuset med fremtidig klima kan ses i vedlegg 4.



Figur 5.19, Energibruken til Klimahuset med hybridventilasjon delt opp i energiposter med fremtidig klima.

## 6 Diskusjon

Simulering av et typisk kontorbygg i Norge med hybridventilasjon ga gode resultater i henhold til energibesparelse. Sammenliknet med Klimahuset på tøyen er det en stor forskjell. Kontorbygget fikk en energibesparelse på 40% med hybridventilasjon kontra fullt mekanisk og Klimahuset fikk kun 13.1%. Dette skyldes av den store forskjellen på internlast. Mye internlast forårsaker varmetilskudd til sonen som øker behovet for luftskifte slik at overskuddsvarmen blir kastet ut. Klimahuset og kontorlandskapet med mekanisk ventilasjon har et arealspesifikt energibruk fra vifte på 4 kW/m<sup>2</sup> og 16.8 kW/m<sup>2</sup>, henholdsvis. Klimahuset og Kontorlandskapet deler samme SFP. Hybridventilasjon gir høyest prosent energibesparelse for viftebruk kontra bruk av mekanisk ventilasjon, men grunnet Klimahusets lave luftmengdebehov spares det mest energi i form av nedkjøling.

Videre optimalisering er mulig ved å endre maksimale luftmengden for begge sonene i Klimahuset. Amfiet må benytte vindusåpning på vintertid for å regulere CO<sub>2</sub> nivået, dette er ikke ønsket ettersom det fører til temperaturfall som vist i simuleringene av Klimahuset. Utstillingen hadde mindre utfordringer ettersom sonen har vesentlig større areal, høyde på rommet og mindre vindusareal enn Amfiet. Dermed blir det mindre belastning for luftkvaliteten og lavere risiko for overvarme. Den maksimalt tillatte luftmengden til Amfiet bør økes og kan minskes for Utstillingen. Det kan også være fordelaktig å unngå å benytte vinduslufting for å regulere CO<sub>2</sub> nivået og heller benytte mekanisk ventilasjon til den oppgaven. Gjennom simulering ser det ut til at vindusåpning gir best besparelse i form for nedkjøling av bygget. Vindusåpning for å regulere CO<sub>2</sub> nivået vil gi temperaturfall når utetemperaturen er lav og forårsake mer energibruk i form av oppvarming som potensielt kan være større enn den mulige energibesparelsen i form av viftebruk. Vindusåpning for å regulere CO<sub>2</sub>-nivået skjer oftest utenfor sommerperioden fordi på sommertiden dimensjoneres luftmengdebehovet etter temperaturen i større grad enn CO<sub>2</sub>-nivået.

Det ser det ut til at den nye styringsstrategien for hybridventilasjon gir vesentlig bedre termisk komfort sammenliknet med den nåværende styringsstrategien for Klimahuset. Dette skyldes at den nye strategien prioriterer mekanisk ventilasjon og heller bruker automatisk styrt vindusåpning som et hjelpemiddel for nedkjøling av bygget. Med mekanisk ventilasjon kan det benyttes en varmegjenvinner slik at ventilering av bygget ikke medfører stort varmetap som Klimahuset gjør nå med den nåværende ventilasjonsstrategien. Den nye strategien benytter også nattventilering med vindusåpning som også er vist å være en lønnsomt passiv kjølestrategi. Det bør også nevnes at en del energibesparelse er oppnådd ved at den nye styringsstrategien tillater høyere CO<sub>2</sub>-nivå enn den nåværende strategien. Men den nye styringsstrategien for hybridventilasjon overstrider ikke arbeidertilsynet veiledning 444 sitt krav om luftkvalitet.

Hybridventilasjon viser seg til å være svært egnet for det fremtidige klimaet. Hybridventilasjon henter inn størst energibesparelse i form av nedkjøling av bygget kontra bruk av mekanisk ventilasjon. Med de fremtidige klimamodellene som predikerer høyere utetemperatur viser det til en større energibesparelse med hybridventilasjon kontra bruk av mekanisk ventilasjon. År 2100 med RCP 8.6 ga det beste resultatet i henhold til energibesparelse på 30.6%. Styringsstrategien for hybridventilasjon presterer godt i henhold til termisk- og atmosfærisk inn klima for år 2050 med alle klimamodellene. Men i år 2100 oppstår det noen problemer med det termiske klimaet med RCP 8.5. Da sliter hybridventilasjon med å kaste ut overskuddsvarmen slik at PPD overstiger 25% 119 timer av okkupasjonstiden.

For at styringsstrategien skal kunne tilpasse seg mer fremtidig klima er det noen endringer som bør gjøres. Først kan perioden for nattventilering endres til å vare lenger, dette må da videre undersøkes for å finne en riktig periode. For å kunne motstå de veldig varme dagene i fremtiden lønner det seg å tillate mer luftmengde slik at det ikke blir altfor varmt i bygget.

## 6.1 Feilkilder

Det oppstod en rekke med problemer med IDA-ICE etter oppdatering av programmet til versjon 5.0. PI regulatorene i makroen for vindusåpning ville ikke fungere ordentlig. Bl.a. ville ikke innendørs-temperaturgrense for nattventilasjon fungere som førte til unødvendig kjøling og oppvarming av bygget. Dette lot seg fikses ved å endre PI innstillingene. Oppvarmingssignalet hadde også problemer der den ga fullt energipådrag noen ganger når det var oppvarmingsbehov, dette ble også fikset ved å endre PI innstillinger. Men det gjenstår et lite problem med at varmpådraget avtar sakte når det ikke er oppvarmingsbehov, gjennom testing anses dette som en «liten» påvirkning og kan aksepteres, dette gjelder for simulering med hybridventilasjon.

For simuleringer med detaljert sone analyse som analysering av trekk og vertikal temperaturdifferanse var det avvik fra de virkelige resultatene. Ved vanlige setpunktverdier ville vinduene ikke åpnes for å regulere CO<sub>2</sub>-nivået fordi CO<sub>2</sub> konsentrasjonen aldri nådde 950ppm. For å fikse dette problemet ble den maksimale tillate luftmengden til amfiet redusert slik at resultatene kunne representere en typisk dag for Klimahuset med vindusåpning på vintertid. Hensikten med disse undersøkelsene var å se hvordan vindusåpning på en kald dag påvirket den termiske komforten. Likevel skal det også ta i betraktning at det er mindre luftskifte i sonen på grunn av redusert luftmengde og kan dermed påvirke resultatet.

## 7 Konklusjon

Klimahuset på Tøyen med hybridventilasjon fungerer ikke optimalt som den gjør i dag. Simuleringer viser til dårlig termisk komfort med kraftige temperaturfall i vintersesongen og har høyt oppvarmingsbehov. Med en ny kontrollstrategi for hybridventilasjon som fokuserer på bruk av mekanisk ventilasjon med naturlig ventilasjon som støtte kan Klimahuset oppnå en energibesparelse på opp mot 13.1% kontra fullt mekanisk ventilasjon. Med denne styringsstrategien medfører det god termisk komfort og tilfredsstillende luftkvalitet. Hybridventilasjon som ventileringsstrategi viser seg til å egne best for bygg med høy internlast som kontorbygg som krever stort nedkjølingsbehov. Resultater fra simulering av et typisk kontorbygg i Norge med hybridventilasjon viser til en høy energibesparelse på 40% kontra bruk av fullt mekanisk ventilasjon. Klimahuset er kun et undervisnings-/utstillingsbygg og derfor får ikke like stor fordel av å benytte hybridventilasjon.

Klimahuset med den nye kontrollstrategien for hybridventilasjon er simulert med fremtidig klimadata. Resultatene viser til at det kan oppnås høyere energibesparelse med hybridventilasjon kontra mekanisk ventilasjon i fremtiden. I år 2050 kan det oppnås en energibesparelse på 19-21% og år 2100 kan energibesparelsen være opp mot 19-30%. Dette varierer etter de ulike fremtidige klimamodellene RCP 2.6, 4.5 og 8.5. Luftkvaliteten viser til å være god men også bedre i fremtiden, dette er fordi fremtiden benytter mer vindusåpning. Av den totale okkupasjonstiden er vinduene åpen 16% av tiden med nåværende klima, i år 2100 med RCP 8.5 er vinduene åpen 39% av okkupasjonstiden. Den termiske komforten er tilfredsstillende i den nære fremtiden (2050), men i 2100 med RCP 4.5 og 8.5 sliter hybridventilasjon med å kaste ut overskuddsvarmen som fører til nedsatt termisk komfort i de ekstremt varme sommerdagene. Tilpassing av luftmengde og nattventilering kan bidra til videre optimalisering for drift i fremtiden. Med en godt gjennomført styringsstrategi kan hybridventilasjon være svaret på en mer energieffektiv drift i fremtiden

## Referanseliste

- [1] Sturla Ingebrigtsen. 2019. *Ventilasjonsteknikk del I: 2019 utgave*. VVS-foreningen/Nemitek
- [2] SINTEF. 2017. *552.301 Ventilasjon av boliger. Prinsipper*. Byggforskserien.  
[https://www.byggforsk.no/dokument/527/ventilasjon\\_av\\_boliger\\_prinsipper](https://www.byggforsk.no/dokument/527/ventilasjon_av_boliger_prinsipper)
- [3] Wigenstad, T., Schild, P. G., kliniski, M., Simonsen, I. (2012) *Ventilasjons- og varmeløsninger med lavt energibehov*. Prosjektrapport 110. SINTEF Byggforsk.  
[https://www.sintefbok.no/book/index/944/ventilasjons\\_og\\_varmeloesninger\\_i\\_boliger\\_med\\_lavt\\_ener\\_gibehov](https://www.sintefbok.no/book/index/944/ventilasjons_og_varmeloesninger_i_boliger_med_lavt_ener_gibehov)
- [4] Heiselberg, P. 2006. *Design of Natural and Hybrid Ventilation*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Lecture notes No. 5. <https://vbn.aau.dk/en/publications/design-of-natural-and-hybrid-ventilation>
- [5] Dokka, T. H., Mysen, M., Schild, P. G., Tjellflaat, P. O. 2003. *Bygningsintegrert ventilasjon – en veileder*. Økobygg. [https://www.byggemiljo.no/wp-content/uploads/2014/10/20\\_Bygningsintegrert-ventilasjon.pdf](https://www.byggemiljo.no/wp-content/uploads/2014/10/20_Bygningsintegrert-ventilasjon.pdf)
- [6] Kleiven, T. 2003. *Natural Ventilation in Buildings*. Norwegian University of Science and Technology. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmliui/handle/11250/231090>
- [7] Mathisen, H. M., Stang, J., Kleiven, T., Tjellflaat, P. O. 2004. *Valg mellom naturlig, hybrid og mekanisk ventilasjon*. SINTEF Energiforskning AS. <https://hdl.handle.net/11250/2834947>
- [8] A.P Jones. (1999). indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*.  
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00272-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00272-1)
- [9] Jose Guillermo Cedeño Laurent et al. (2021) Associations between acute exposures to PM2.5 and carbon dioxide indoors and cognitive function in office workers: a multicountry longitudinal prospective observational study. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1bd8>
- [10] Standard Norge. 2006. *Ergonomi i termisk miljø Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort (NS-EN ISO 7730)*
- [11] Seppänen, O., Fisk, W. F., Faulkner, D. 2003. Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.  
<https://escholarship.org/uc/item/3j82f642>
- [12] Arbeidstilsynet. *Inneklima og luftkvalitet på arbeidsplassen*.  
<https://www.arbeidstilsynet.no/tema/inneklima>
- [13] Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., ... & Ådlandsvik, B. (2009). *Klima i Norge 2100*. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilplassing.  
<https://imr.brage.unit.no/imr-xmliui/bitstream/handle/11250/117195/Bauer-Hanssen%20et%20al%202009%20Klima%20NOU.pdf?sequence=1>
- [14] Kotték, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- [15] T. F. Stocker et al. 2013. *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Climate change, vol. 5.  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- [16] Haktorsen, I. 2018. *Inneklima og energibruk ved bruk av balansert ventilasjon vs. Hybridventilasjon i nybygg i massivtre (Masteroppgave)*. Universitetet i Agder.  
<http://hdl.handle.net/11250/2562900>
- [17] Algrøy, M. 2014. *Energibruk og inneklima i skoler og barnehager med "mixed-mode" ventilasjon (Masteroppgave)*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitetet.  
<http://hdl.handle.net/11250/2562900>
- [18] Lie, M. 2015. *Hybridventilasjon i moderne bygninger (Masteroppgave)*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. <http://hdl.handle.net/11250/2359297>



- [19] Buvik, K. 2003. *Miljøvennlige skoleanlegg*. SINTEF, Økobygg. [https://www.sintef.no/globalassets/upload/miljoevennlige-skoleanlegg\\_kb.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/upload/miljoevennlige-skoleanlegg_kb.pdf)
- [20] Peng, Y., Lei, Y., Tekler, Z. D., Antanuri, N., Lau, S., Chong, A. 2022. Hybrid system controls of natural ventilation and HVAC in mixed-mode buildings: A comprehensive review. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112509>
- [21] Bamdad, K., Matour, S., Izadyar, N., Omrani, S. 2022. Impact of climate change on energy saving potentials of natural ventilation and ceiling fans in mixed-mode buildings. *Building and environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108662>
- [22] Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Martín del Río, J. J., Pérez-Fargallo, A. 2018. Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change. *Energy and buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.002>
- [23] Gilani, S., O'Brien, W. 2020. Natural ventilation usability under climate change in Canada and the United States. *Building Research & Information*. <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1760775>
- [24] Wang, L., Liu, X., Brown, H. 2017. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. *Energy and buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.007>
- [25] Øgård, Y. G. 2014. *Ventilative cooling for schools and kindergartens* (Masteroppgave). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. <http://hdl.handle.net/11250/2353757>
- [26] Standard Norge. 2021. Energy performance of buildings Calculation of energy needs and energy supply (SN-NSPEK 3031).
- [27] Zolykha Ahmadi. 2023. *Effekten av vindusåpning som hybridventilasjonsteknologi på termisk inn klima og energibruk i Klimahuset* (Masteroppgave). OsloMet. [https://bibsyst-almaprimo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/ji7c72/TN\\_cdi\\_cristin\\_nora\\_11250\\_3101388](https://bibsyst-almaprimo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/ji7c72/TN_cdi_cristin_nora_11250_3101388)
- [28] Rabani, M., Petersen, A. J. 2023. Detailed assessment of hybrid ventilation control system in a mixed-mode building in cold climate. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/10/102006>
- [29] Petersen, A. J. 2020. *Klimahuset*. <https://www.erichsen-horgen.no/prosjekter/kulturbygg/Klimahuset/>
- [30] Standard Norge. 2019. *Bygningenes energiytelse Ventilasjon i bygninger* (NS-EN 16798-1:2019).
- [31] Hamdy, M., Mauro, G. M. 2019. Optimizing Hybrid Ventilation Control Strategies Toward Zero-Cooling Energy Building. *Frontiers in Built Environment*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00097>
- [32] Cao, X., Dai, X., Liu, J. 2016. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- [33] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C. 2007. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>



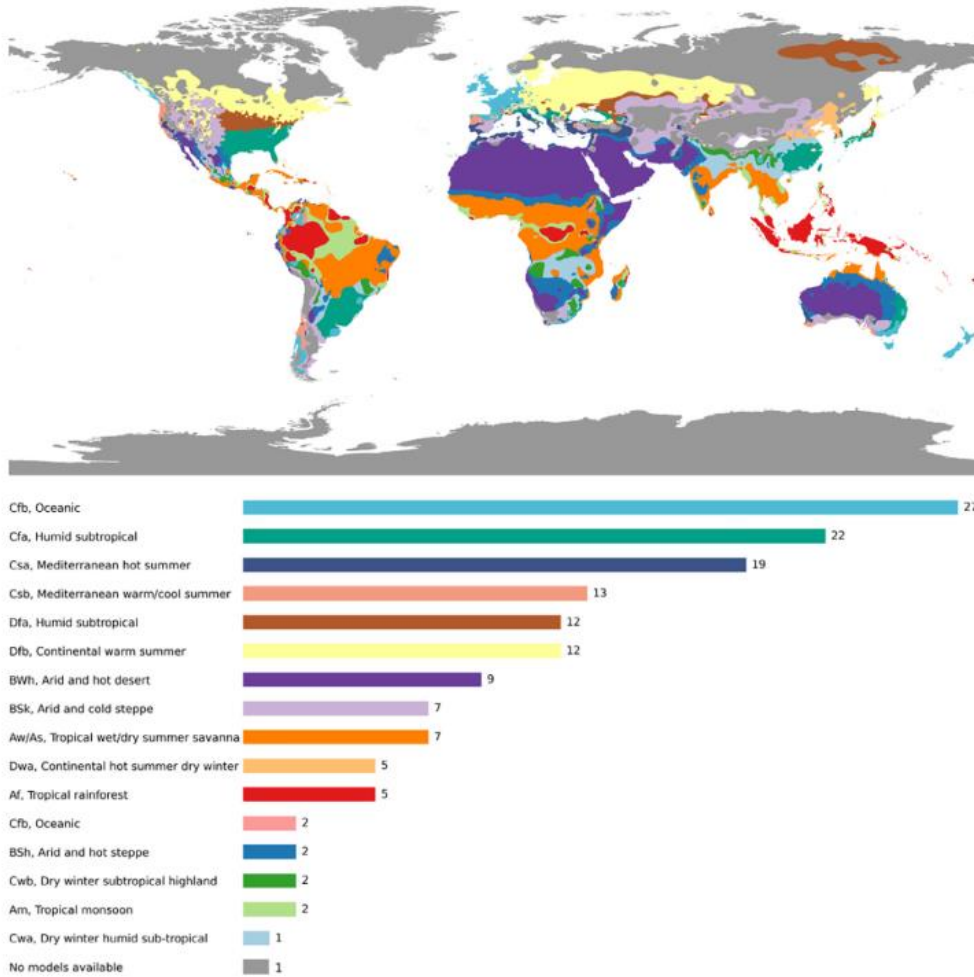
# VEDLEGG

## VEDLEGG 0

Alle casestudiene til Peng et al. delt opp i klimaklassifikasjoner [20]

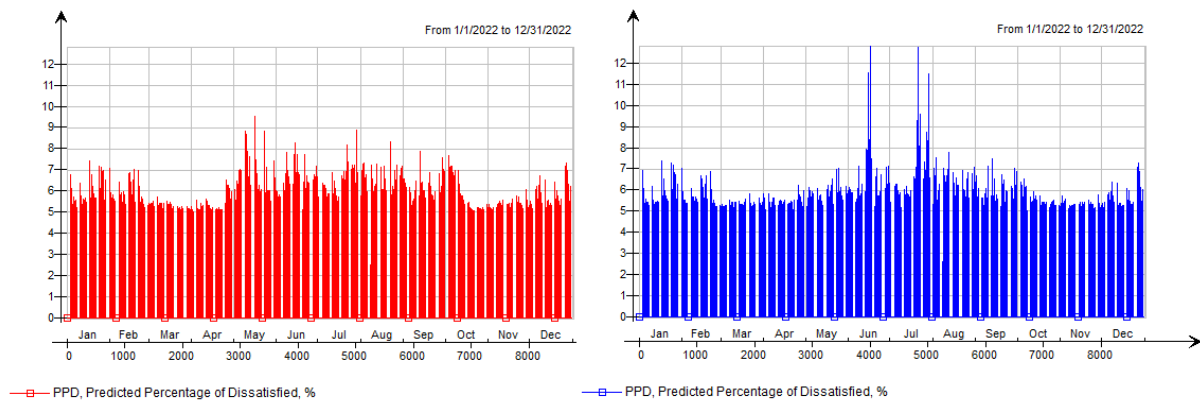
Y. Peng, Y. Lei, Z.D. Tekler et al.

Energy & Buildings 276 (2022) 112509

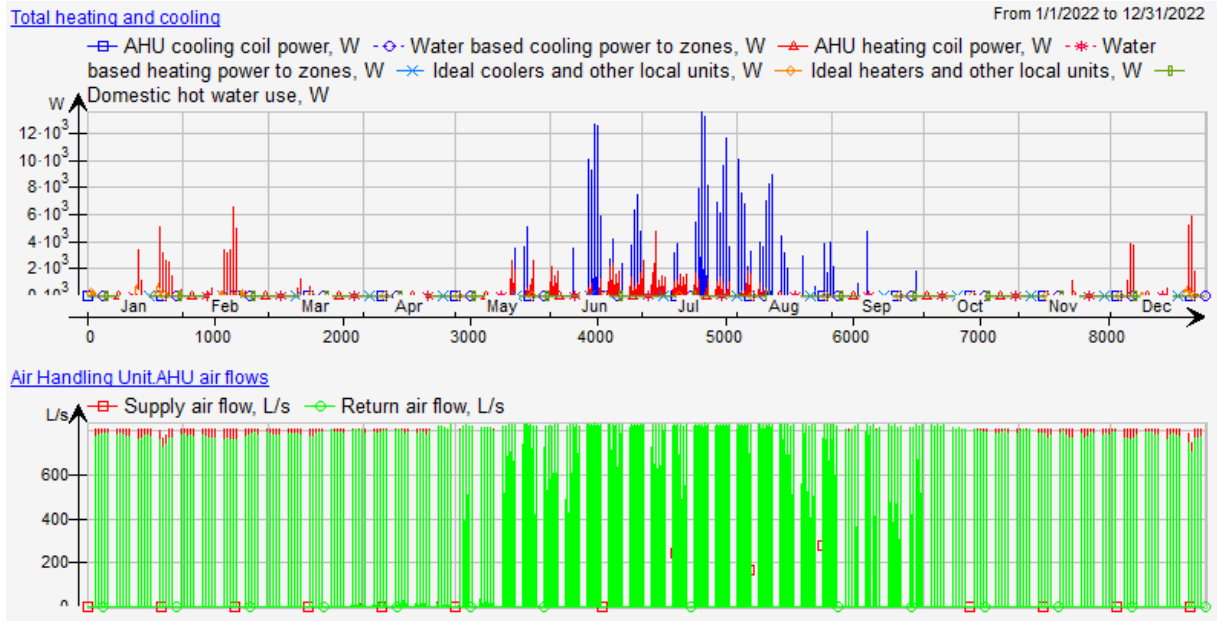


## VEDLEGG 1

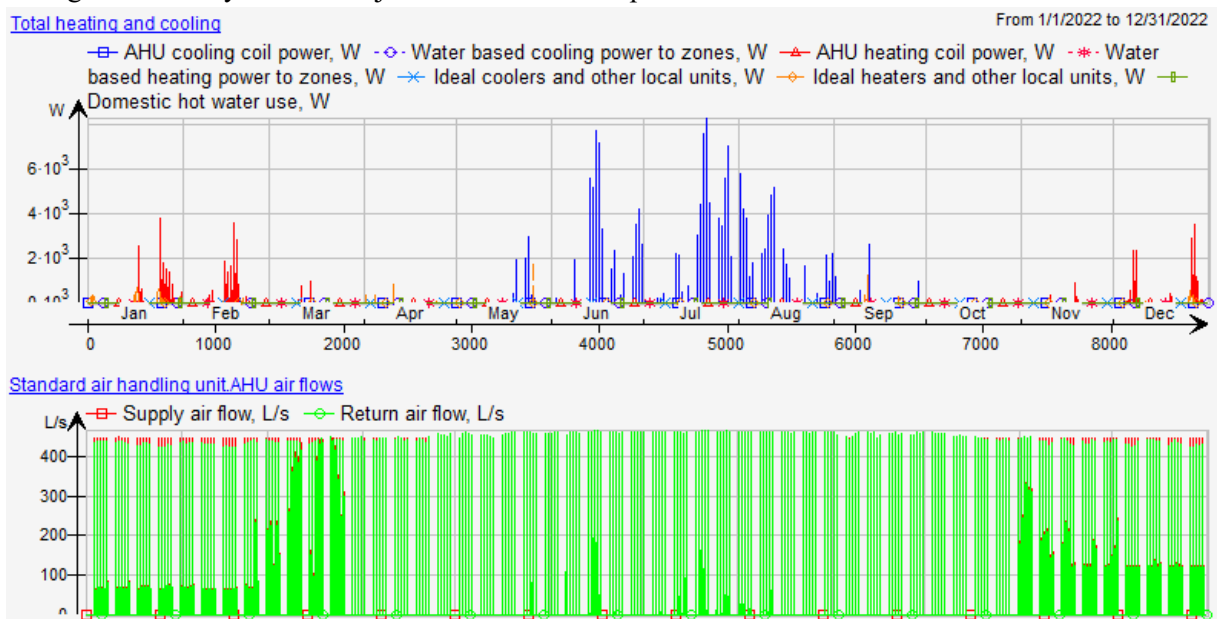
Termisk komfort i PPD, Mekanisk ventilasjon til venstre og hybridventilasjon til høyre



## Energibruk med mekanisk ventilasjon for kontorlandskapet

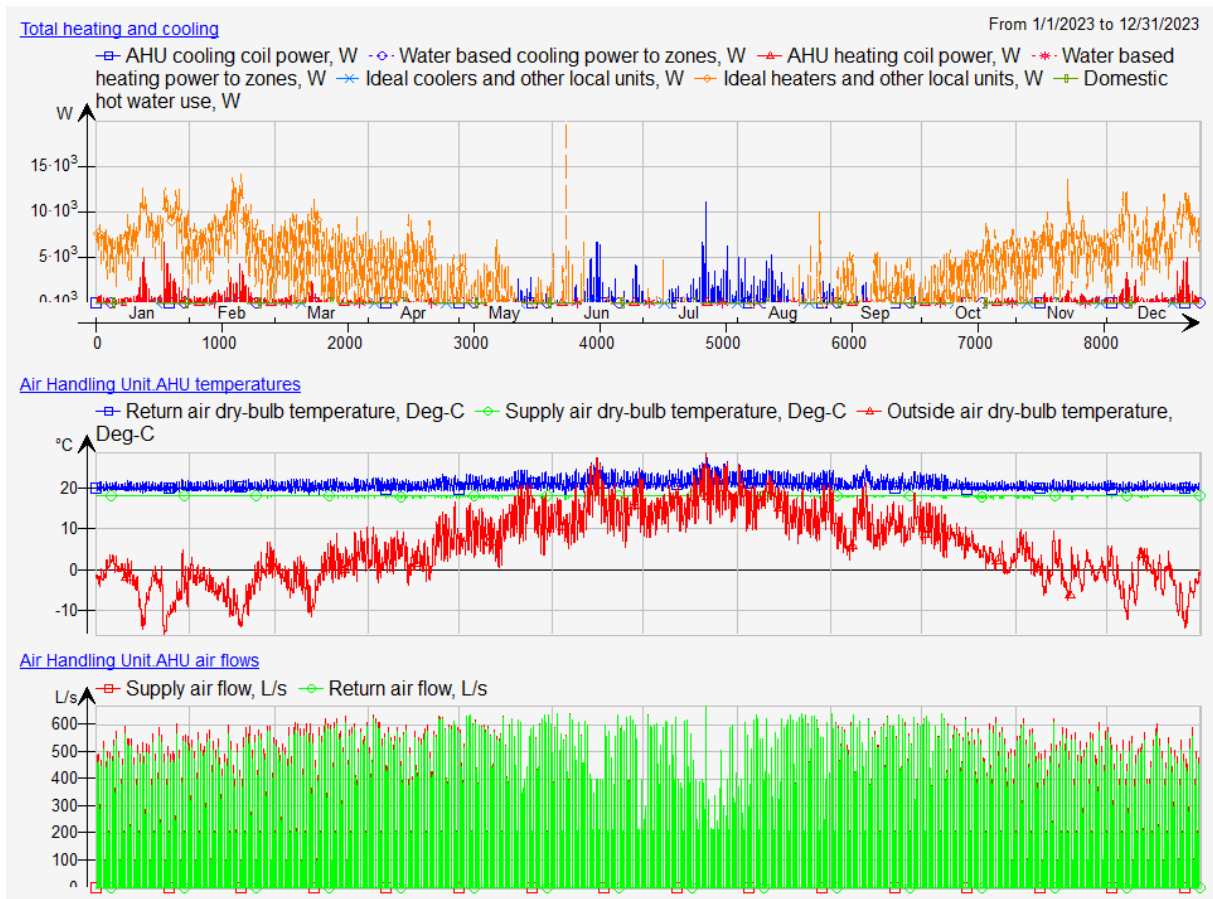


## Energibruk med hybridventilasjon for kontorlandskapet

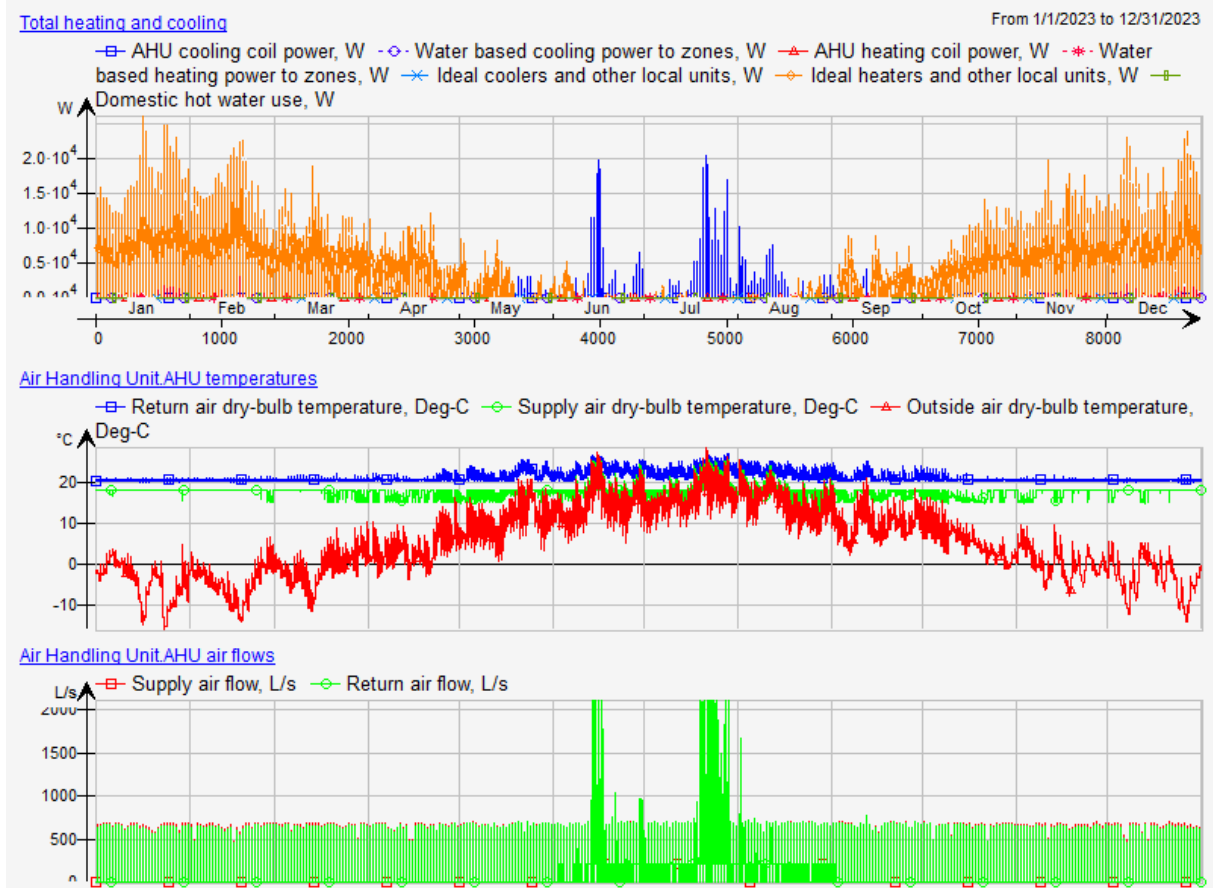


## VEDLEGG 2

Klimahuset simulert med ny kontrollstrategi for hybridventilasjon og nåværende klima



### Klimahuset simulert med fullt mekanisk ventilasjon og nåværende klima



## VEDLEGG 3

Termisk komfort for Klimahuset med hybridventilasjon og mekanisk ventilasjon med fremtidig klimadata

	Historic	2050			2100		
Hybrid	2019	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
h >10% PPD	95.3	246.0	277.0	341.0	263.0	358.0	654.0
% of time above 10% PPD	3.3%	8.4%	9.5%	11.7%	9.0%	12.3%	22.4%
h > category II NS-EN 16798	8	10	8	12	12	14.0	23
Max PPD	32.2%	38.5%	44.4%	46.2%	38.8%	52.8%	63.2%
h >25% PPD	2.73	17.2	23.7	36.2	26	56.2	197
% of time above 25% PPD	0.1%	0.6%	0.8%	1.2%	0.9%	1.9%	6.7%
	Historic	2050			2100		
Mechanical	2019	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
h >10% ppm	205.0	415.0	441.0	535.0	457.0	574.0	885.0
% of time above 10% PPD	7.0%	14.2%	15.1%	18.3%	15.7%	19.7%	30.3%
h > category II NS-EN 16798	5	21	34	40	36	57	161
Max PPD	18.3%	20.0%	19.2%	21.7%	21.2%	24.2%	34.9%
h >25% PPD	0	0	0	0	0	0	3.88
% of time above 25% PPD	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%

## VEDLEGG 4

Energibesparelse for klimahuset med hybridventilasjon kontra mekanisk ventilasjon med fremtidig klimadata

Historic									
Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum					
Mechanical	57.2	2.4	4	63.6					
Hybrid	52.8	1.2	1.2	55.2					
Difference	4.3	1.2	2.8	8.3					
%	7.6%	50.7%	70.0%	13.1%					
2050 RCP 2.6					2100 RCP 2.6				
Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum	Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum
Mechanical	43.1	5.6	4.7	53.4	Mechanical	44.9	6.0	4.8	55.7
Hybrid	39.5	2.6	1.2	43.3	Hybrid	41.2	2.9	1.3	45.4
Difference	3.6	3.0	3.5	10.2	Difference	3.7	3.1	3.5	10.4
%	8.4%	54.0%	74.5%	19.0%	%	8.3%	52.0%	72.9%	18.6%
2050 RCP 4.5					2100 RCP 4.5				
Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum	Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum
Mechanical	40.8	6.5	4.9	52.2	Mechanical	36.9	9.0	5.3	51.2
Hybrid	37.3	3.1	1.3	41.7	Hybrid	33.7	4.4	1.3	39.4
Difference	3.5	3.4	3.6	10.5	Difference	3.2	4.6	4.0	11.7
%	8.6%	51.8%	73.5%	20.1%	%	8.6%	50.8%	75.5%	22.9%
2050 RCP 8.5					2100 RCP 8.5				
Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum	Simulering	Heating	Cooling	Fan	Sum
Mechanical	40.1	8.2	5.1	53.3	Mechanical	27.3	20.2	6.4	53.9
Hybrid	36.6	4.0	1.3	41.9	Hybrid	24.8	11.0	1.6	37.4
Difference	3.4	4.2	3.8	11.4	Difference	2.5	9.2	4.8	16.5
%	8.6%	51.2%	74.5%	21.4%	%	9.2%	45.6%	75.0%	30.6%