

EPT-M-2013-6

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Marianne Algrøy

Høst 2013

Energibruk og inneklima i skoler og barnehager med "mixed mode" ventilasjon
Energy use and indoor climate quality in schools with "mixed mode" ventilation

Bakgrunn

Larvik kommune har ved rehabilitering av skolebygninger og nybygging av barnehage benyttet hybrid ventilasjon. Et mekanisk ventilasjonsanlegg er kombinert med tilluft gjennom automatisk styrte vinduer. Oppgaven går ut på å kartlegge energibruk og inneklima i Brunla skole og å sammenligne resultatene med kjente målestokker for energibruk og inneklima.

Prosjektet gjennomføres i samarbeid med Larvik kommune og SINTEF Energi ved forskningsprosjekt Reduced Energy Consumption in Buildings - Impacts on Indoor Air Quality and Health

Kontaktpersoner hos Larvik kommune: Kristin Borander, 98231496,
Kristin.Borander@larvik.kommune.no

Arbeidet er en videreføring av prosjektoppgaven.

Mål

Målet med oppgaven er å kartlegge energibruk og inneklima i skolebygning med ventilasjon basert på en kombinasjon av mekanisk avtrekksventilasjon og naturlig ventilasjon automatisk styrt av temperatur og luftkvalitet. Det skal gjøres sammenligninger med konvensjonelle løsninger og vurdering i forhold til krav til inneklima og energibruk.

Prosjektoppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Oppdatere litteraturundersøkelsen som ble påbegynt i prosjektoppgaven med mer inngående studium av forskningslitteratur knyttet til "mixed mode" ventilasjon og tilhørende problemstillinger.
2. Lage modeller for beregninger av energibruk, termisk og atmosfærisk inneklima med simuleringsprogrammet IDA ICE. Det lages modell både for løsningen ved Brunla og for en konvensjonell løsning med mekanisk balansert ventilasjon.
3. Starte innsamling av måledata. Dette bør startes så tidlig som mulig i semesteret.
4. Bruk av måledata for å verifisere simuleringer.
5. Utføre beregninger av energi og effektbehov for ventilasjon, oppvarming og evt kjøling. Eventuelt kan også måledata fra Brunla brukes til å kalibrere simuleringsmodellen om ble laget for Solstad barnehage i prosjektoppgaven.
6. Rapportering.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veileder. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosessteknikk.

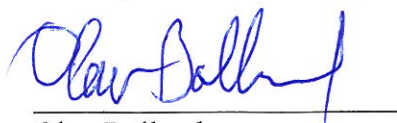
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

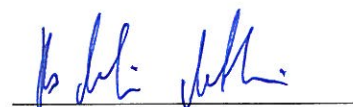
Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- ☐ Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømnings teknisk, varmeteknisk)
☒ Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 6. September 2013



Olav Bolland
Instituttleder



Hans Martin Mathisen
Faglig ansvarlig/veileder

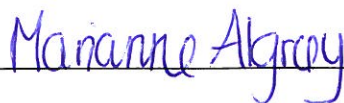
Medveileder: Maria Justo Alonso

Forord

Denne oppgaven er utført ved Institutt for energi- og prosesssteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim, høstsemesteret 2013, og er masteroppgave i sivilingeniørstudiet Energi og Miljø. Professor Hans Martin Mathisen var hovedveileder og Maria Justo Alonso medveileder ved NTNU og Sintef Energiforskning A/S.

Jeg vil benytte anledningen til å takke mine veiledere for hjelp med utarbeidelse av oppgaven og veiledning underveis. Jeg vil også takke Kristin Borander, Seksjonsleder Bygg og utvikling i Larvik kommune, Vidar Henning Hansen, Markedsansvarlig BSI A/S og Arvid Bruflot, vaktmester ved Brunla ungdomsskole.

En stor takk går også til familie og venner for støtte og motivasjon under arbeidet med oppgaven, og til gode venner for en innholdsrik studietid i Trondheim. Til slutt vil jeg også takke Jesper Steine for støtte og tålmodighet, samt for all oppmuntring underveis i arbeidet.



Marianne Algrøy

Trondheim 7.februar 2013

Sammendrag

Oppgaven er en studie av energibruk og inneklima i skoler og barnehager med mixed mode ventilasjon, med fokus på termisk- og atmosfærisk inneklima ved vinduslufting og resulterende energiforbruk. Det er tatt utgangspunkt i Brunla ungdomsskole i Larvik kommune, som er rehabilitert med mixed mode ventilasjon. Ventilasjonsløsningen er basert på en kombinasjon av mekanisk- og naturlig ventilasjon ved bruk av avtrekksvifter og tilluft gjennom automatisk styrte fasadevinduer.

For å undersøke energibruk og inneklima ved Brunla ungdomsskole er befaring og målinger gjennomført. På befaringene ble informasjon om skolens energibruk, samt ventilasjons- og oppvarmingssystem innhentet. Videre ble målinger av ulike inneklimaparametere som CO₂-konsentrasjon, temperatur, lufthastighet og vindusåpning gjennomført. Resultatene fra målingene viser at temperaturen holder seg på et akseptabelt nivå, mens CO₂-nivået er over anbefalt krav store deler av dagen ved full brukerbelastning. Målingene gir ingen indikasjon på trekk i klasserommet, men fra samtale med ansatte antas en foreliggende risiko for trekk om vinteren, spesielt nær vinduer og høyere i rommet der luften tilføres.

Simuleringsmodeller av skolebygningen med mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon er satt opp i simuleringsprogrammet IDA ICE 4.6. Simuleringene er utført for sammenligning av termisk og atmosfærisk miljø, samt energiforbruk. Ved simulering av mixed mode ventilasjon ble ulike reguleringsmessige tiltak benyttet for å optimalisere vindus- og avtrekksstyringen. Avtrekksmengde, settpunkter, størrelse på vindusåpning, driftstid for avtrekk og ulike begrensninger for vindusåpningen med tanke på temperatur og CO₂ ble variert. Energi- og effektberegningene gir et høyere effektbehov for oppvarming ved vinduslufting, da det benyttes vinduer for tilluft som til ulike tider av året står åpne og medfører lavere innetemperaturer. Ved å tillate høyere CO₂-verdier og begrense vindusåpningen unngås store temperaturfall om vinteren som medfører energibesparelser og redusert oppvarmingsbehov i kalde perioder. Effektbehovet reduseres også ved at det ikke benyttes noen annen form for kjøling enn tilluft gjennom vinduer. Dette kan imidlertid medføre en fare for underventilasjon og høye temperaturer om sommeren når temperaturforskjellen mellom inne- og uteluft er liten. Videre styres avtrekket etter en kontrollstrategi som reduserer avtrekk, og dermed energiforbruk til viftedrift, i ugunstige perioder. Simuleringene inneholder

noen usikkerhetsmomenter knyttet til optimalisering av vindus- og avtrekkstyringen som kan ha innvirkning på resultatet. Ved årssimulering har skolebygningen et årlig energibehov på $109,5 \text{ kWh/m}^2$ ved mekanisk balansert ventilasjon, sammenlignet med 105 kWh/m^2 for mixed mode løsningen.

Resultater fra simuleringsmodellen for mixed mode ventilasjon er sammenlignet med måledata. Det er vanskelig å verifisere simuleringer mot målingene da det mangler en fullstendig CFD-beregning for å sette opp modellen tilsvarende løsningen ved Brunla ungdomsskole. Ulikhetene ved simuleringsmodellens vindus- og avtrekksstyring må tas i betraktning, da det oppstår en tydelig forskjell mellom målingene og simuleringene. Værdata benyttet ved simuleringer er fra Osloklimate, mens skolen ligger i Larvik. Dette bidrar til at resultatene fra simuleringene avviker fra målingene utført.

Det er per i dag gjort få studier av mixed mode ventilasjon sin egnethet for norske forhold. Denne rapporten er derfor et bidrag til ytterligere forskning av temaet. Flere lignende studier bør gjennomføres ved ulike geografiske plasseringer og ulike norske værforhold for å få bredere kunnskap om temaet.

Abstract

This paper is a study of energy consumption and indoor air quality in schools and kindergartens with mixed mode ventilation, focusing on thermal and atmospheric indoor climate by window ventilation and resulting energy consumption. The study's starting point is Brunla secondary school in Larvik commune, which is rehabilitated with mixed mode ventilation. The ventilation solution is based on a combination of mechanical and natural ventilation by using exhaust fans and supply air through automatically controlled windows.

To examine energy consumption and indoor climate at Brunla secondary school an inspection and measurements were conducted. From the inspection the school's energy use, as well as information about ventilation and heating system was obtained. Furthermore, measurements of the indoor air quality parameters such as CO₂ concentration, temperature, air velocity and window opening were conducted. Results from the measurements show that the temperature remains at an acceptable level, while CO₂ levels are above the recommended requirements at full user load. The measurement give no indication of draft in the classroom, but from conversations with the staff there is assumed an existing risk of drafts in the winter, especially near the windows and at high levels in the room where air is supplied.

In the simulation program IDA ICE 4.6 mechanically balanced and mixed mode ventilation simulation models of the school building were set up. The simulations are performed for comparison of thermal and atmospheric environment, as well as energy use. By simulating mixed mode ventilation, various regulatory measures are used to optimize window and exhaust control. Exhaust flow, set points, size of the window opening, operating hours for exhaust and various constraints for window opening in terms of temperature and CO₂ were varied. Energy and power calculations give a higher power requirement for heating when using window ventilation, since windows that are open at different times of the year leads to lower indoor temperatures. By allowing higher CO₂ values and limit window opening greater drops in temperature are avoided, resulting in energy savings in cold periods and reduced heating needs. The power requirement is also reduced as there is no use of any other form of cooling than the supply air through windows. However, this may pose a risk of low ventilation and high temperatures in the summer when the temperature difference between indoor and outdoor air is small. The exhaust is controlled by a control strategy that reduces

exhaust, and thus energy consumption for fan operation, in unfavorable periods. The simulations contain some uncertainties related to the optimization of the window and exhaust control that may affect the result. By whole-year energy simulation the school building has an annual energy requirement of 109.5 kWh/m^2 with mechanical ventilation, compared to 105 kWh/m^2 with mixed mode ventilation.

Results from the simulation model for mixed mode ventilation are compared with measured data. It is difficult to verify simulations against measurements as it lacks a complete CFD calculation to set up the model corresponding to the solution at Brunla secondary school. The differences in the simulation model window and exhaust management must be considered as there is a distinct difference between measurements and simulations. Weather data used for the simulations are from an Oslo climate, while the school is located in Larvik. This will further make the results from the simulations differ from the measurements performed.

There are currently few studies of mixed mode ventilation and its suitability for Norwegian conditions. This report is therefore a contribution to further exploration on the topic. More studies should be conducted at different geographical locations and different Norwegian weather conditions to gain wider knowledge on the topic.

Innhold

1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn for valg av tema	1
1.2. Mål for oppgaven.....	2
1.3. Problemstilling.....	2
1.4. Disposisjon	3
1.5. Begrensninger	3
2. Litteraturundersøkelse av mixed mode ventilasjon	5
2.1. Hva er mixed mode ventilasjon?	5
2.1.1. Naturlig ventilasjon	5
2.1.2. Mekanisk ventilasjon.....	6
2.1.3. Hybrid ventilasjon	7
2.1.4. Mixed mode ventilasjon	8
2.2. Hovedprinsipper for mixed mode ventilasjon	8
2.2.1. Sonesystem.....	8
2.2.2. Omkoblingssystem	9
2.2.3. Parallellsystem	9
2.3. Vinduslufting	10
2.3.1. Termisk komfort.....	10
2.3.2. Personlig kontroll	10
2.3.3. Energibruk	11
2.4. Faktorer som påvirker mixed mode ventilasjon	12
2.4.1. Vindustype og åpningsområde	12
2.4.2. Vindusstørrelse, form og plassering.....	13
2.4.3. Atrium	14
2.4.4. Ventilasjonsprinsipper.....	14
2.5. Ulike løsninger for mixed mode ventilasjon i undervisningsbygg	15
2.5.1. Løsning for undervisningsbygg i England	15
2.5.2. Løsning for undervisningsbygg i USA.....	16
2.5.3. Løsning for undervisningsbygg i Norge.....	17
3. Teori og forskning knyttet til inneklimate	19
3.1. Termisk inneklimate	20

3.1.1.	Vurdering av termisk komfort.....	20
3.1.2.	Bekledning og aktivitetsnivå.....	21
3.1.3.	Temperatur	22
3.1.4.	Lufthastighet.....	23
3.1.5.	Luftfuktighet.....	25
3.2.	Atmosfærisk inneklima og luftkvalitet	26
3.3.	Faktorer som påvirker termisk og atmosfærisk miljø.....	27
3.3.1.	Temperatur og produktivitet.....	27
3.3.2.	Temperatur og luftfuktighet	28
3.3.3.	Økt temperatur og luftmengde i klasserom	30
3.3.4.	Økt luftmengde og tilluftsfilter i klasserom	31
3.3.5.	Luftkvalitet	32
3.4.	Diskusjon.....	34
4.	Redegjørelse for ventilasjonsløsningen ved Brunla ungdomsskole.....	37
4.1.	Brunla ungdomsskole	37
4.1.1.	Ventilasjon	38
4.1.2.	Oppvarming.....	40
4.1.3.	Energiforbruk	40
4.2.	Kontrollstrategi og styringssystem	40
4.2.1.	Driftsformer.....	41
4.2.2.	Årstidtilpasset driftsstrategi og kalender.....	42
4.2.3.	Vinduslufting.....	43
4.2.4.	Soneinnstillinger.....	44
5.	Metode for målinger	45
5.1.	Planlegging og utføring av målinger	45
5.1.1.	Klasserom 101	46
5.1.2.	Sensorer i klasserom og værstasjon	46
5.1.3.	Beskrivelse av målinger	47
5.2.	Beskrivelse av måleutstyr og plassering.....	48
5.2.1.	CO ₂ -konsentrasjon	48
5.2.1.	Temperatur	49
5.2.2.	Vindusåpning	50
5.2.3.	Luftmengde	50

5.2.4.	Lufthastighet.....	51
5.2.5.	Unøyaktighet ved målinger	52
6.	Resultater og diskusjon fra målinger	53
6.1.	Tilstedeværelse, bekledning og aktivitetsnivå.....	53
6.2.	Temperatur og CO ₂ -sensor	54
6.3.	CO ₂ -konsentrasjon og temperatur	55
6.4.	Temperatur i oppholdssone	57
6.5.	Vindusåpning.....	59
6.6.	Lufthastighet.....	61
6.7.	Luftmengde.....	63
6.8.	Spjeldåpning	63
7.	Simuleringer i IDA ICE	65
7.1.	Simulering av mixed mode- og konvensjonell ventilasjon	65
7.1.1.	Simuleringsmodellene og de ulike ventilasjonsscenarioene	65
7.1.2.	Beliggenhet og utforming.....	66
7.1.3.	Bygningskropp	68
7.1.4.	Brukertetthet og driftstid	68
7.1.5.	Interne laster	69
7.1.6.	Øvrig inndata for simuleringsmodellen.....	69
7.2.	Simuleringsmodell for klasserom med vindus- og avtrekksstyring	70
7.2.1.	Oppbygging av kontrollstrategi for vindu	70
7.2.2.	Oppbygging av kontrollstrategi for avtrekk	71
7.3.	Mixed mode ventilasjon	73
7.3.1.	Settpunkter, ventilasjon.....	73
7.4.	Mekanisk balansert ventilasjon	74
7.4.1.	Settpunkter, ventilasjon.....	74
8.	Resultater og diskusjon fra simulering.....	75
8.1.	Simuleringsmodell for klasserom med vindusstyring	76
8.2.	Simuleringsmodell for klasserom med avtrekksstyring	78
8.3.	Mixed mode- og mekanisk balansert ventilasjon	80
8.3.1.	Energi- og effektbehov ved årssimulering	80
8.3.2.	Scenario 1: Termisk og atmosfærisk komfort, sommersimulering	83
8.3.3.	Scenario 2: Termisk og atmosfærisk komfort, vintersimulering.....	85

9. Bruk av måledata for å verifisere simuleringer.....	87
10. Konklusjon.....	91
Forslag til videre arbeid.....	94
Referanser.....	95
Vedlegg 1: Beskrivelse av ulike bygg ved Brunla ungdomsskole	1
Vedlegg 2: Energiforbruk.....	2
Vedlegg 3: Ulike driftsformer	3
Vedlegg 4: Risikovurdering, feltmålinger.....	5
Vedlegg 5: Datablad for sensor benyttet i klasserom.....	6
Vedlegg 6: Værdata fra SD-anlegget ved skolen for 8.oktober	7
Vedlegg 7: Plassering av målepunkter	8
Vedlegg 8: Lufthastighet.....	9
Vedlegg 9: Spjeldåpning	10
Vedlegg 10: Plantegning av C-bygning, 1. etasje	11
Vedlegg 11: Plantegning av C-bygning, 2. etasje	12
Vedlegg 12: Datablad for nye vinduer ved Brunla ungdomsskole	13
Vedlegg 13: Verdier for ulike kuldebroer i simuleringsmodellene.....	14
Vedlegg 14: Sommer- og vintersimulering, mixed mode ventilasjon	15
Vedlegg 15: Sommer- og vintersimulering, mekanisk balansert ventilasjon.....	16
Vedlegg 16: Utetemperatur ved sommer- og vintersimulering.....	17
Vedlegg 17: Termisk og atmosfærisk komfort ved sommer- og vintersimulering, mekanisk balansert ventilasjon	18
Vedlegg 18: Termisk og atmosfærisk komfort ved sommer- og vintersimulering, mixed mode ventilasjon	20

Figurer

Figur 1: Fra venstre: Tegning fra Hans Martin Mathisen (Norges Astma- og Allergiforbund (NAAF), SINTEF og Husbanken) og prinsippet for naturlig ventilasjon (Gjerstad et al., 2007)	6
Figur 2: Fra venstre: Avtrekksventilasjon og mekanisk balansert ventilasjon (Gjerstad et al., 2007).....	7
Figur 3: Sonesystem (CBE, 2005).....	9
Figur 4: Omkoblingssystem (CBE, 2005).....	9
Figur 5: Parallellsystem (CBE, 2005)	9
Figur 6: Ulike konfigurasjoner ved fasadeutforming (Roetzel et al., 2010)	13
Figur 7: Fra venstre: Kryssventilasjon med skorsteinseffekt, kryss- og oppdriftsventilasjon i atrium, samt ensidig ventilasjon.....	15
Figur 8: Illustrasjon av ventilasjonsprinsippet ved Queens Building i England (Islington, 2012).....	16
Figur 9: Illustrasjon av ventilasjonsprinsippet ved Ash Creek Intermediate School (Boora Architects)	17
Figur 10: Fra venstre: Illustrasjon av løsningen for rehabiliterte bygg og løsningen for nybygg	18
Figur 11: Forholdet mellom PMV og PPD (Byggforsk byggdetaljer, 1999).....	21
Figur 12: Optimal operativ temperatur ved ulik bekledning og aktivitetsnivå som gir PPD < 10 % (Byggforsk byggdetaljer, 1999)	22
Figur 13: Kombinasjon av gjennomsnittlig lufthastighet, lufttemperatur og turbulensintensitet som gir en gjennomsnittlig trekkvurdering på 15 % (Byggforsk byggdetaljer, 1999).....	24
Figur 14: Sammenheng mellom temperatur og arbeidsytelser.....	27
Figur 15: Lineær korrelasjon mellom akseptabilitet og entalpi for fem luftprøver;	28
Figur 16: Effekt av frisklufttilførsel på arbeidsevne gjennom 8-timers arbeidsdag (Park & Yoon, 2011).....	29
Figur 17: Utførelse av skolearbeid som en funksjon temperatur i klasserommet	30
Figur 18: Utførelse av skolearbeid som en funksjon av tilførselshastighet på uteluft	31
Figur 19: Hovedbygningen ved Brunla ungdomsskole.....	37
Figur 20: Fra venstre: Automatisk styrt vindu som benyttes for vinduslufting og værstasjonen på taket	38

Figur 21: Fra venstre: Overstyringsknapp og plassering av sensor i klasserom 101	39
Figur 22: Fra venstre: Vinduer og avtrekksventiler i klasserom 101	39
Figur 23: Fra venstre: KIMO AQ 200 og plassering av måleutstyr ved avtrekksventil	48
Figur 24: Fra venstre: Plassering av temperaturloggere ved avtrekk, vindu og i klasserommet	49
Figur 25: Måling av vindusåpning ved hjelp av Mitek måler	50
Figur 26: TSI Accubalance Air Capture Hood 8375.....	50
Figur 27: Måling av lufthastighet i klasserom og avtrekkskanal	51
Figur 28: Personer til stede i klasserom under målinger	53
Figur 29: CO ₂ -konsentrasjon målt ved avtrekk og CO ₂ -konsentrasjon fra sensor.....	55
Figur 30: Temperatur målt ved avtrekk og temperatur fra sensor.....	57
Figur 31: Temperaturvariasjon ved stolpe 1.....	57
Figur 32: Temperaturvariasjon ved stolpe 2.....	58
Figur 33: Temperaturvariasjon ved vindu	59
Figur 34: Vindusåpning og temperaturvariasjon.....	59
Figur 35: Vindusåpning og variasjon i CO ₂ -konsentrasjon	60
Figur 36: Lufthastighet målt i avtrekkskanalen fra klasserom 101	61
Figur 37: Luftmengde i avtrekkskanal og vindusåpning i klasserom 101	63
Figur 38: Spjeldåpning og avtrekksluftmengde	64
Figur 39: Spjeldåpning og vindusåpning	64
Figur 40: Plantegning for 1.etasje i IDA-ICE	66
Figur 41: 3D-presentasjon av simuleringsmodellen for hovedbygget laget i IDA ICE.....	67
Figur 42: Skyggeområde på vestsiden av bygningen.....	67
Figur 43: Driftstid etter personbelastning	69
Figur 44: Driftstid for utstyr og belysning	69
Figur 45: 3D-presentasjon av simuleringsmodellen for et klasserom laget i IDA ICE	70
Figur 46: Kontrollstrategi for åpning av vindu	70
Figur 47: Kontrollstrategi for avtrekk	72
Figur 48: Driftstid for avtrekksanlegg.....	73
Figur 49: CO ₂ -nivå i sonen.....	76
Figur 50: Temperatur i sone, utetemperatur og settpunkt for utetemperatur	76
Figur 51: Signaler for åpning av vindu	77
Figur 52: Vindusåpning.....	77
Figur 53: Åpningssignaler fra kontrollstrategien for avtrekk.....	78

Figur 54: Luftmengde tilført sonen	79
Figur 55: Termiske forhold i klasserom 101 ved sommersimulering	83
Figur 56: Atmosfæriske forhold i klasserom 101 ved sommersimulering	83
Figur 57: Termiske forhold i klasserom 101 ved vintersimulering	85
Figur 58: Atmosfæriske forhold i klasserom 101 ved vintersimulering	85
Figur 59: CO ₂ -konsentrasjon ved simulering sammenlignet med målinger	88
Figur 60: Temperaturvariasjon ved simulering sammenlignet mot målinger	89
Figur 61: Vindusåpning ved simulering sammenlignet med målt åpning på vinduet.....	90

Tabeller

Tabell 1: Evaluering av ulike vindustyper og egenskaper som påvirker ventilasjonseffektiviteten (Roetzel et al., 2010).....	12
Tabell 2: Predicted Mean Vote (Gjerstad et al., 2007).....	20
Tabell 3: Anbefalte romtemperaturer for skoler og barnehager (Byggforsk byggdetaljer, 1999)	22
Tabell 4: Maksimale lufthastigheter i skoler og barnehager (Byggforsk byggdetaljer, 1999).	23
Tabell 5: Krav til relativ fuktighet (Byggforsk byggdetaljer, 2000)	25
Tabell 6: Ulike driftsformer som kan benyttes (WindowMaster A/S, 2004).....	41
Tabell 7: Fra venstre: Romforhold i klasserom 101 og timeplan tirsdag 8. oktober.....	46
Tabell 8: Kalibrering og unøyaktighet knyttet til måleinstrumenter	52
Tabell 9: Målefeil	52
Tabell 10: Lufthastighetsmålinger, normal driftsform	61
Tabell 11: Lufthastighetsmålinger, vindu i full åpning	62
Tabell 12: U-verdier for bygningskonstruksjoner benyttet ved simulering	68
Tabell 13: Ulike scenarioer for avtrekkssystemet	72
Tabell 14: Levert energi ved årssimulering av mixed mode ventilasjon	80
Tabell 15: Levert energi ved årssimulering av mekanisk balansert ventilasjon.....	81

Terminologi

Her følger en kort forklaring på noen av de viktigste begrepene og uttrykkene som benyttes i oppgaven.

Atmosfærisk inneklima	Omfatter luftkvalitet og luftbårne forurensninger.
Bekledningens isolerende effekt (clo)	1 clo tilsvarer $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$, som er isolasjon nødvendig for å holde en sittestillende person (aktivitetsnivå på 1 met) komfortabel ved 21°C , 50 % RF og 0,1 m/s.
Bruksareal (BRA)	Summen av arealet i et bygg som ligger innenfor ytterveggene (innvendige skillevegger inngår).
Byggteknisk forskrift (TEK)	Forskrift til den norske plan- og bygningsloven.
Computational Fluid Dynamics (CFD)	Fellesbetegnelse for beregnings- og analyseverktøy for simulering av gass- og væsketransport (fluider).
C_p-verdier	Vindtrykkskoeffisient over en bygning.
Effektbehov	Behovet som trengs for å dekke det totale varmetapet fra et rom.
Inneklima	Definert som termisk-, atmosfærisk-, akustisk-, aktinisk- og mekanisk miljø.
Innemiljø	Definert som inneklima, samt estetisk- og psykososialt miljø.
Isolasjonsgrad	Termisk motstand mellom hudoverflate og bekledningens utvendige overflate.
Konvensjonell ventilasjon	Mekanisk balansert ventilasjon.
Levert energi	Sum av energi, uttrykt per energivare, levert over bygningens systemgrenser for å dekke bygningens samlede energibehov inkludert systemtap som ikke gjenvinnes.
Luftkvalitet	Inneluftens konsentrasjon av ulike forurensningskomponenter.
Metabolisme (met)	Energiomsetning i kroppen som generer varme. 1 met tilsvarer 58 W/m^2 kroppsoverflate (stillesittende, avslappet person).
Netto energibehov	Beregnete mengde energi nødvendig for drift av bygningen.
Norsk Standard (NS)	Benevnelse på standarder fastsatt og utgitt av Standard Norge.
Oppholdssone	En oppholdssone begrenses horisontalt av gulvet og et plan 1,8 meter over gulvet. Vertikalt begrenses sonen av loddrette plan parallelle med rommets vegger, i en avstand av 0,6 meter.

Oppvarmet del av bruksareal (BRA)	Andel bruksareal som tilføres varme fra bygningens varmesystem og eventuelt kjøling fra bygningens kjølesystem, og som er omsluttet av bygningens klimaskjerm.
Parts per million (ppm)	Enhet for angivelse av konsentrasjon. En ppm er lik en enhet per million, altså en milliondel.
SD-anlegg	Sentralt driftskontrollanlegg av blant annet oppvarming, kjøling og ventilasjon.
SFP-faktor	Et mål på energieffektiviteten til ventilasjonsanlegget, angir hvor mye elektrisk vifteenergi som brukes for å distribuere luft i anlegget i forhold til mengden luft transportert.
Variable Air Volume (VAV)	Styringsprinsipp ved ventilasjon (variabel luftmengde).
Varmegjennomgangs-koeffisient (U-verdi)	Varmestrømstetthet gjennom konstruksjonen i stasjonær tilstand når temperaturforskjellen er 1 K mellom lufta på de to sidene av konstruksjonen. Angis i enheten W/m^2K .
Vindu med glidningshengsling	Vindu som er hengslet på midten, åpning både i topp og bunn.
Termisk inneklima	Omfatter parametere som har innflytelse på menneskets varmebalanse og termiske komfort. Disse parameterne er miljøfaktorene lufttemperatur, strålingstemperatur, luftfuktighet og lufthastighet, samt personfaktorene aktivitetsnivå og bekledning.
Trekk	Defineres som lokal avkjøling. Kan oppstå ved en kombinasjon av lufthastighet og temperatur eller stråling til kalde flater.
Relativ luftfuktighet	Uttrykker brøkdelen fuktighet som luften inneholder ved en bestemt temperatur, i forhold til hva den maksimalt kan inneholde ved samme temperatur. Angis i prosent.

1. Innledning

Tema for studien er energibruk og inneklima i skoler og barnehager med mixed mode ventilasjon. Oppgaven er tilknyttet prosjektet e-CONIAQ (Reduced Energy Consumption in Buildings – Impacts on Indoor Air Quality and Health) som ble startet opp av SINTEF Energiforskning AS i 2009. Et av delprosjektene har vært å undersøke ventilasjonsløsninger som benyttes i Larvik kommune ved rehabilitering og nybygging av skoler og barnehager.

1.1. Bakgrunn for valg av tema

Eksisterende skoler og barnehager har ofte utilstrekkelig ventilasjon. Den vanligste måten å ventilere yrkesbygg, inkludert skoler, er bruk av mekanisk balansert ventilasjon hvor kjøling og energibruk til vifter står for en stor andel av energiforbruket (Dokka et al., 2001). Oppgradering av ventilasjonssystemer krever ofte betydelige investeringer, særlig hvis det samtidig legges inn krav om redusert energibruk. Dårlig innemiljø kan føre til sykdommer og plager, hvor barn og unge i utvikling er særlig sårbare (Arbeidstilsynet, 2013). Inneklima påvirker helse, læringsmiljø og trivsel. Det er uttrykt et ønske fra myndighetene om å forbedre inneklimaet i skoler og barnehager, samt å redusere energiforbruket. I jakten på attraktive og kostnadseffektive alternativ til mekanisk ventilasjon har naturlig- og hybrid ventilasjon vært fremtredende i nyere tid. Mixed mode ventilasjon kombinerer naturlig ventilasjon ved vinduslufting og mekanisk ventilasjon. Denne type løsning med manøvrerbare fasadeelementer utformet og styrt for å nyttiggjøre mulighetene for gjennomlufting, representerer et område av betydelig interesse. Løsningen muliggjør bedre luftkvalitet via frisk luft gjennom vinduer, samt «gratis» ventilasjon og kjøling.

I Larvik kommune er det forsøkt en forenklet ventilasjonsmetode hvor vinduslufting er satt i system. Hybrid ventilasjon med oppgradert avtrekksanlegg samkjørt med motorstyrt åpning av fasadevinduer utgjør et mixed mode ventilasjonssystem. Løsningen styres via lokale luftkvalitetsmålere i rom og en utendørs værstasjon. Målet med mixed mode ventilasjon er å maksimere termisk komfort for å sikre et godt inneklima og samtidig unngå betydelig energibruk og høye driftskostnader. Lignende løsninger kan også benyttes i nybygg.

1.2. Mål for oppgaven

Målet med oppgaven er å kartlegge energibruk og inneklimate i skolebygninger med ventilasjon basert på en kombinasjon av mekanisk avtrekksventilasjon og naturlig ventilasjon automatisk styrt av temperatur og luftkvalitet. Sammenligninger av løsningen med konvensjonell mekanisk balansert ventilasjon og vurdering av krav til inneklimate og energibruk vil utføres. Oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven gjennomført våren 2013 hvor Solstad barnehage, som er nybygd med mixed mode ventilasjon, ble undersøkt. Arbeidet fra prosjektoppgaven videreføres her ved studie, befaring, målinger og simulering av Brunla ungdomsskole som er rehabilitert med mixed mode ventilasjon. Oppgavens mål er å kartlegge energibruk og inneklimate ved Brunla ungdomsskole og sammenligne resultatene med kjente målestokker for energibruk og inneklimate.

1.3. Problemstilling

Tema for studien er energibruk og inneklimate i skoler og barnehager med mixed mode ventilasjon. På bakgrunn av dette er følgende problemstilling formulert: *Hvordan er det mulig å oppnå tilfredsstillende termisk inneklimate og luftkvalitet ved vinduslufting, og hvilke konsekvenser har vinduslufting på energibruk?*

Problemstillingen retter fokus mot vinduslufting og opplevelse av termisk og atmosfærisk komfort ved ventilasjonsprinsippet mixed mode. For å besvare problemstillingen er det tatt utgangspunkt i relevant teori og forskning knyttet til inneklimate og energibruk. I tillegg er det utført målinger av inneklimate og energibruk ved Brunla ungdomsskole. Videre er det utført simuleringer av mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon for å beregne og sammenligne energibruk, termisk og atmosfærisk inneklimate. Måledataene benyttes for verifisering av simuleringer.

1.4. Disposisjon

I kapittel 2 er en litteraturundersøkelse knyttet til mixed mode ventilasjon og vinduslufting utført. Konseptet mixed mode ventilasjon forklares og hovedprinsipper for ventilasjonsløsningen presenteres. Deretter blir faktorer som påvirker mixed mode ventilasjon og ulike ventilasjonsløsninger for undervisningsbygg sett nærmere på. I kapittel 3 vil teori knyttet til inneklima presenteres, med hovedvekt på termisk- og atmosfærisk miljø, men også faktorer som påvirker termisk og atmosfærisk miljø. Deretter rettes fokus mot ventilasjonsløsningen benyttet ved Brunla ungdomsskole. Det blir gitt en beskrivelse av skolen som er rehabilitert med mixed mode ventilasjon. Videre følger en beskrivelse av kontrollstrategi og styringssystem som benyttes. I kapittel 5 blir metode for inneklimatemålinger ved Brunla ungdomsskole forklart. Resultater blir lagt frem og diskutert i kapittel 6. I kapittel 7 er simuleringsmodeller for mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon satt opp ved hjelp av simuleringsprogrammet IDA ICE 4.6. Resultatene fra simuleringer av energi- og effektbehov, samt inneklima, presenteres og diskuteres i kapittel 8. Måledata benyttet for å verifisere simuleringene mot målinger er fremstilt i kapittel 9. Kapittel 10 avslutter og oppsummerer oppgaven ved konklusjon knyttet til mixed mode som ventilasjonsløsning.

1.5. Begrensninger

Energiforbruk for Brunla ungdomsskole ble forsøkt hentet inn ved befaring. Skolen har imidlertid byttet oppvarmingssystem og installert et pelletsanlegg som gjør det vanskelig å hente ut eksakt energi- og effektbehov. I tillegg har Larvik kommune byttet strømlieferandør flere ganger de siste årene, slik at statistikk over energi- og effektbehov for skolen ikke lenger eksisterer.

Oppgaven ble automatisk begrenset da tiden for utregning av energi og effektbehov ved simuleringer ikke strakk til. I oppgaveteksten står det at måledata fra Brunla eventuelt kan brukes til å kalibrere simuleringsmodellen som ble laget for Solstad barnehage i prosjekt-oppgaven. Dette ble det dessverre ikke tid til da simuleringsmodellen for mixed mode ventilasjon var svært omfattende.

2. Litteraturundersøkelse av mixed mode ventilasjon

Målet med dette kapittelet er å undersøke mixed mode ventilasjon med fokus på energibruk og inneklima. Innledningsvis vil mixed mode ventilasjon og hovedprinsipper for løsningen forklares. Deretter vil ulike faktorer knyttet til den naturlige delen av mixed mode ventilasjon og vinduslufting undersøkes. Løsninger for mixed mode ventilasjon benyttet i ulike land vil videre presenteres, hvor løsningen for Norge tar utgangspunkt i rehabiliterte og nybygde undervisningsbygg i Larvik kommune.

2.1. Hva er mixed mode ventilasjon?

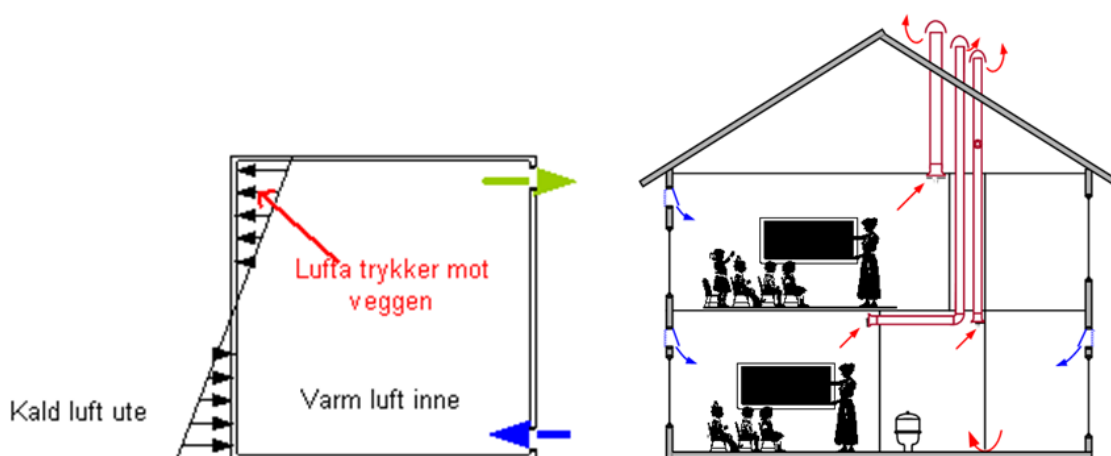
Center for the Built Environment (2005) forklarer mixed mode ventilasjon som en variant av hybrid ventilasjon som kombinerer effektiv kjøling og naturlig- og mekanisk ventilasjon. Mixed mode ventilasjon kombinerer naturlig ventilasjon ved hjelp av manøvrerbare vinduer og mekanisk ventilasjon som kan omfatte distribusjonssystemer med mulighet for kjøling. I løpet av de siste 10 årene har det vært et økende antall kontorbygg og skoler med en vellykket integrering av naturlig ventilasjon og klimaanlegg, spesielt i Europa, Japan og USA.

2.1.1. Naturlig ventilasjon

Ved naturlig ventilasjon benyttes naturlige drivkrefter som oppdrift og vind, samt lavt trykkfall i luftveier for tilførsel av frisk luft. Oppdrift oppstår fordi varm luft har lavere tetthet enn kald luft. Ved tilførsel av kald uteluft vil oppdriftskraften føre til en strømning gjennom bygningen. Dette gjennomføres ofte ved åpninger oppe og nede i veggene på bygningen. Oppdriftseffekten vil øke med økt høydeforskjell og temperaturforskjell. Trykkforskjeller grunnet vind gir også luftgjennomstrømning ved at det dannes overtrykk på lo-siden og undertrykk på le-siden av bygget (Gjerstad et al., 2007).

Installasjoner som benyttes kan variere fra enkle løsninger med manuelle ventiler i yttervegg supplert med vinduslufting, til mer avanserte løsninger med forvarming av ventilasjonsluft og automatikk for styring av luftmengder (ibid.). Naturlige ventilasjonsanlegg er ofte enklere og mer robuste enn mekaniske anlegg og har vanligvis lavere drifts- og vedlikeholdskostnader. Brukerpåvirkningen er i de fleste tilfeller bedre enn ved mekaniske ventilasjonsanlegg, blant annet fordi åpning av vinduer eller ventiler i fasaden ofte er en viktig del av ventilasjonssystemet (Dokka et al., 2001). En ulempe med naturlig ventilasjon er at man har

liten kontroll over luftmengdene, noe som kan medføre over- eller underventilasjon. Dette kan videre medføre både periodevis dårlig luftkvalitet og lav termisk komfort. Naturlig ventilasjon gir heller ingen mulighet for varmegjenvinning av avtrekksluft. I kalde klima, som for Norge, er det derfor nødvendig å tilføre store mengder energi til forvarming av tilluften. Da naturlig ventilasjon utføres med korte føringsveier og enkle komponenter for å holde luftmotstanden lav kan det være vanskelig å hindre spredning av lyd, brann og røyk mellom rom og gjennom fasaden (ibid.). Figur 1 viser prinsippet for naturlig ventilasjon. Frisk uteluft strømmer inn gjennom ventiler over vindu og avtrekksluft stiger opp gjennom kanaler og trekkes av på taket, grunnet trykkforskjeller som forårsakes av termisk oppdrift.

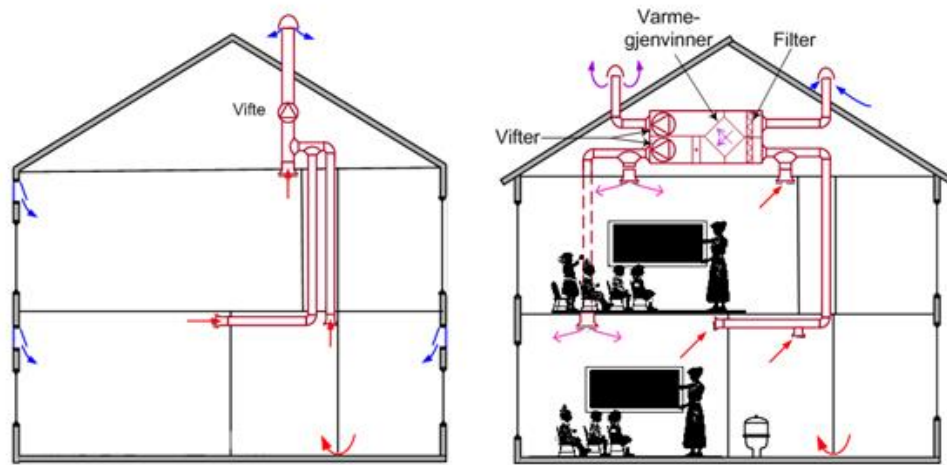


Figur 1: Fra venstre: Tegning fra Hans Martin Mathisen (Norges Astma- og Allergiforbund (NAAF), SINTEF og Husbanken) og prinsippet for naturlig ventilasjon (Gjerstad et al., 2007)

2.1.2. Mekanisk ventilasjon

Ved mekanisk ventilasjon benyttes elektrisk drevne vifter for å skape drivtrykk for luften i bygget, som gjør denne type ventilasjon uavhengig av forholdet mellom innendørs- og utendørsforhold. Figur 2 viser to ulike strategier for mekanisk ventilasjon, eksempelvis avtrekksventilasjon og mekanisk balansert ventilasjon. Avtrekksventilasjon består av en vifte som driver avtrekksluft ut av bygningen, mens frisk luft strømmer inn gjennom åpninger i yttervegg. Mekanisk balansert ventilasjon er i dag den vanligste ventilasjonsmetoden i yrkesbygg og skoler (Gjerstad et al., 2007). Løsningen forklares ved at det tilføres like mye luft som det trekkes ut. Fordelen med denne ventilasjonsløsningen er at den gir mulighet for styring av luftskifte, filtrering og forvarming av tilluft, samt varmegjenvinning av avtrekksluften. I balanserte system kan ventilasjonen lettere brukerstyres, tilpasset etter behov og ønsket temperatur. Balanserte systemer består av luftbehandlingsaggregat, som kan være relativt komplekse og kostbare å installere og drifte. Krav om økte luftmengder gjør at

ventilasjonsanlegg står for en stor andel av drifts- og energikostnader, samt totale byggekostnader i skole- og kontorbygninger (Dokka et al., 2001).



Figur 2: Fra venstre: Avtreksventilasjon og mekanisk balansert ventilasjon (Gjerstad et al., 2007)

2.1.3. Hybrid ventilasjon

Ved hybrid ventilasjon benyttes en kombinasjon av mekanisk- og naturlig ventilasjon der positive sider ved respektive system utnyttes. Denne type ventilasjon er vifteassistert naturlig ventilasjon, hvor en i perioder med lite naturlige drivkrefter kan benytte hjelpevifter for å kontrollere luftmengdene. Ved hybrid ventilasjon kombineres mekaniske og naturlige drivkrefter til et to-modus system der driftsmodus varierer etter sesongen, og innen enkelte dager (Heiselberg, 2002). Målet med hybrid ventilasjon er å minimere energibruk, og samtidig opprettholde akseptabel luftkvalitet og termisk komfort. Ved hybrid ventilasjon utgjør bygningskroppen mye av luftføringsveiene og det brukes derfor mindre konvensjonelle ventilasjonsinstallasjoner. Forandringer i bygningskroppen kan eksempelvis være større romvolum per person, en bygningsform tilpasset luftbevegelser, avanserte fasade- og vindusløsninger, inntakskulverter i grunnen, avtrekkstårn og solskorsteiner. Disse endringene fører til at ventilasjonsløsningen vil ha betydelig innflytelse på den arkitektoniske utformingen av bygningen og investeringen vil i større grad overføres fra mekaniske installasjoner til investeringer i bygningskroppen (Dokka et al., 2001).

2.1.4. Mixed mode ventilasjon

Som nevnt innledningsvis kan mixed mode ventilasjon forklares som en variant av hybrid ventilasjon som benytter naturlig ventilasjon ved hjelp av manøvrerbare vinduer og mekanisk ventilasjon som kan omfatte distribusjonssystemer med mulighet for kjøling. Mixed mode ventilasjon utgjør dermed et to-modus system som benytter både passive og aktive funksjoner på forskjellige tider av døgnet eller etter årstid. Målet med løsningen er å optimalisere termisk komfort og luftkvalitet, samt minimere energibruk og driftskostnader (Brager et al., 2000).

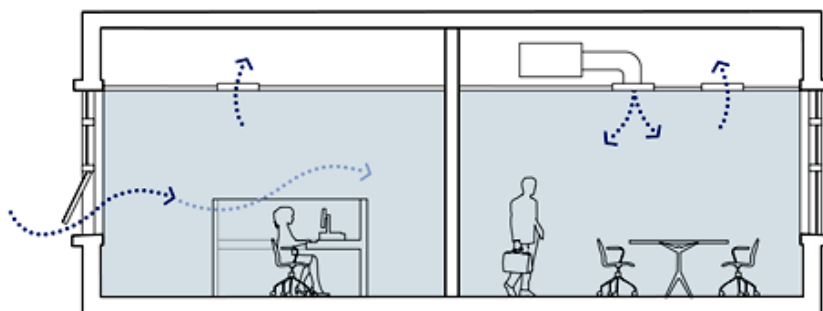
Et godt utformet mixed mode system har avanserte kontrollsystemer som gjør bygningen i stand til å veksle mellom naturlig- og mekanisk ventilasjon. Naturlig ventilasjon benyttes i perioder av døgnet eller året når det er mulig, mens mekanisk ventilasjon kan supplere i tilfeller hvor naturlig ventilasjon ikke er tilstrekkelig (CBE, 2005). Dersom kontrollsystemet er riktig utformet og drevet kan dette gi redusert energiforbruk ved at bygninger minimerer bruk av mekanisk kjøling og ventilasjon gjennom store deler av året, med tilhørende reduksjon i forurensning, klimagassutslipp og driftskostnader (Brager et al., 2000). Løsningen gir også større ventilasjonsfleksibilitet som gjør mekaniske anlegg periodevis overflødige. Dette kan resultere i lengre levetid for systemet og et mindre mekanisk system som er bedre tilpasset bygningen (CBE, 2005).

2.2. Hovedprinsipper for mixed mode ventilasjon

Det finnes ingen standard løsning for mixed mode ventilasjon, da løsninger tilpasses ulike bygg individuelt. Ifølge CBE (2005) finnes likevel tre hovedprinsipper som beskriver integrering av naturlig og mekanisk ventilasjon; sone-, omkobling- og parallellsystem.

2.2.1. Sonesystem

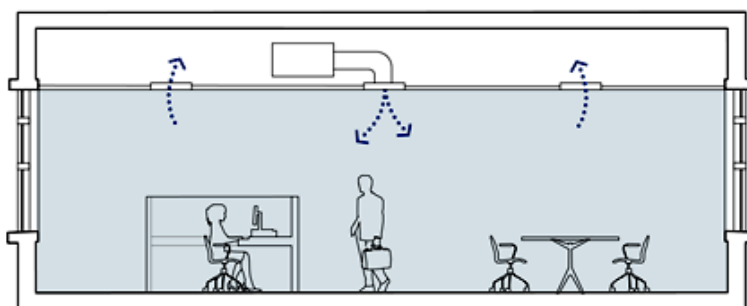
Sonesystemet baseres på inndeling i soner med ulik ventilasjonsstrategi, som vist i Figur 3. Dette prinsippet gir mulighet for å anvende naturlig- og mekanisk ventilasjon i ulike deler av bygget, og til å bytte mellom ventilasjonsløsningene etter behov. For eksempel ved naturlig ventilerte skolebygg med vinduer som kan åpnes, hvor det også kan benyttes ventilasjonssystem med kanaler, eller at det tilføres supplerende mekanisk kjøling i rom med spesielle behov.



Figur 3: Sonesystem (CBE, 2005)

2.2.2. Omkoblingssystem

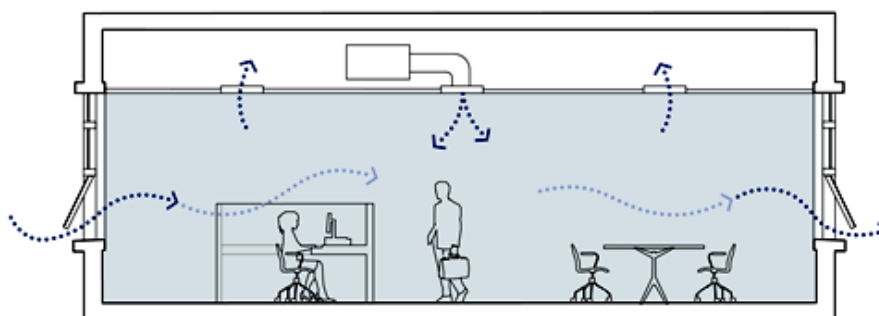
Omkoblingssystem blir stadig vanligere ved bruk av mixed mode ventilasjon. Prinsippet gjør bygningens kontrollstrategi i stand til å skifte mellom naturlig- og mekanisk ventilasjon etter behov, på sesongmessig- eller daglig basis, se Figur 4. Bygningens automasjonssystem bestemmer modus for drift basert på utetemperatur, bevegelsessensor, vindussensor, eller innstilte kommandoer. Et eksempel er bruk av sensorer som indikerer om vinduer er åpne.



Figur 4: Omkoblingssystem (CBE, 2005)

2.2.3. Parallellsystem

Parallellsystem kjører mekaniske og naturlige systemer parallelt i samme rom, som vist i Figur 5. Det mekaniske ventilasjonssystemet kan supplere, eller tjene som bakgrunns-ventilasjon, samtidig som brukerne står fritt til å åpne vinduer etter individuelle preferanser. For eksempel kan mixed mode systemer i en skolebygning minimere bruken av VAV-system, når sensorer indikerer et åpent vindu.



Figur 5: Parallellsystem (CBE, 2005)

2.3. Vinduslufting

Naturlig ventilasjon i sin enkleste form er vinduslufting hvor frisk luft distribueres gjennom åpning av vinduer. Ved denne type ventilasjon har vinduer samme funksjon som tilluftsorgan ved mekanisk ventilasjon, og strømmingen gjennom vinduet er dermed den dominerende strømmingen i rommet. Ved vinduslufting har brukerne mindre kontroll over luftmengder enn ved konvensjonelle ventilasjonsanlegg, noe som kan føre til over- eller underventilasjon. Dette kan også føre til periodevis dårlig luftkvalitet og dårlig termisk komfort med tanke på temperatur og trekk (Heiselberg, 2001). Termisk miljø i bygninger med manøvrerbare vinduer er vanligvis mindre forutsigbart enn forhold i konvensjonelle bygninger, men nødvendigvis ikke mindre komfortable (Brager, 2000).

2.3.1. Termisk komfort

Brager et al. (2004) har utviklet og analysert en database fra feltforsøk om termisk komfort gjennomført i bygninger som enten var naturlig ventilert (brukerkontrollerte manøvrerbare vinduer) eller mekanisk ventilert (brukerne hadde ikke kontroll over miljø). Et viktig funn var at brukerne av naturlig ventilerte bygninger aksepterte, og foretrakk, et betydelig bredere spekter av temperaturer i forhold til brukerne av mekanisk ventilerte bygninger. Ved naturlig ventilasjon fulgte innnetemperaturen sesongmessige endringer i utetemperaturen og falt til tider utenfor konvensjonelle standarder for komfort. Disse forskjellene kunne ikke redegjøres for ved konvensjonell termisk komfortteori. Årsaken til avviket kan forklares ved bruk av naturlig ventilasjon som gir brukere større grad av termisk kontroll enn klimatiserte bygninger, og at følelsen av kontroll fører til en endring i forventning, samt større toleranse for temperaturfluktuasjoner (ibid.).

2.3.2. Personlig kontroll

Brager et al. (2004) utførte også en feltstudie i en naturlig ventilert bygning, med personlig kontroll over manøvrerbare vinduer, for å undersøke termisk miljø og brukertilfredshet. Resultatene viste at brukerne opplevde tilnærmet likt termisk miljø, uavhengig av personlig kontroll over driftsvinduer, selv om reaksjonen deres var svært forskjellig. Ideell komfort temperatur for brukerne med større grad av kontroll var mye nærmere temperaturen de faktisk opplevde. Dette gir støtte til at termiske preferanser ikke bare er basert på konvensjonelle varmbalansefaktorer, men også forskyvning av forventninger som følge av høyere grad av kontroll over eget miljø. Det er derfor viktig at bygninger utformes slik at brukerne kan være aktive deltakere ved regulering av innneklima, og ikke bare passive mottakere.

Ifølge Brager et al. (2000) vil større grad av personlig kontroll tillate brukerne å tilpasse termisk miljø etter personlig preferanse, og samtidig resultere i et bredere akseptert temperaturområde i bygningen. Flere forskere og psykologer har slått fast at brukere er mer tolerante overfor endringer i termisk miljø når de er utstyrt med et minstemål av personlig kontroll (Brager et al., 2004). Ifølge Brager & de Dear (1998) vil menneskelig reaksjon på sensorisk stimuli endres når en person har kontroll over stimulus. En beslektet forklaring er at brukere aksepterer variasjon fra en kjent kilde som har forutsigbar oppførsel (Bordass et al., 1994). Mixed mode ventilasjon tilbyr dermed brukerne høyere grad av kontroll over lokale termiske ventilasjonsforhold, økt brukertilfredshet og redusert potensial for inneklimate problemer (CBE, 2005).

2.3.3. Energibruk

En av hovedutfordringene med mixed mode ventilasjon er å finne en løsning hvor naturlig ventilasjon brukes mest mulig, mens mekanisk ventilasjon oppfyller krav der naturlig ventilasjon ikke er tilstrekkelig (Brager et al., 2000). Et godt utført og velloperende mixed mode system kan redusere behovet for mekanisk ventilasjon og kjøling gjennom store deler av året. Ventilasjon ved hjelp av kald uteluft kan redusere energibruken i et næringsbygg med 15 til 80 prosent avhengig av klima, kjølebehov og bygningstype (ibid.). For noen mixed mode systemer kan driftsforholdene avvike noe fra sin opprinnelige hensikt, for eksempel kan en bygning opprinnelig designet for sesongmessig overgang mellom klimaanlegg og naturlig ventilasjon benytte begge systemer samtidig. Ved å benytte naturlig og mekanisk ventilasjon i parallell kan energiforbruket bli høyt, og resultere i unødvendig energibruk, dersom klimaanlegg og naturlig ventilasjon kommer i «konflikt» med hverandre. Mixed mode systemer kan dermed gi «det verste av begge løsninger» dersom klimaanlegg og naturlig ventilasjonssystemer ikke er koordinert effektivt og forståelig for bruker, operatør, og kontrollsystem (ibid.).


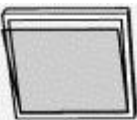
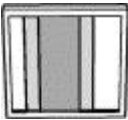

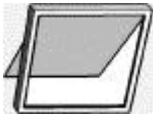
2.4. Faktorer som påvirker mixed mode ventilasjon

I dette kapittelet vil ulike faktorer knyttet til den naturlige delen av mixed mode ventilasjon og vinduslufting presenteres. Utnyttelse av naturlig ventilasjon i bygninger avhenger av vind og termisk oppdrift, eller en kombinasjon av begge. Det finnes en rekke muligheter for å dra nytte av de naturlige drivkreftene for å fremme ulike ventilasjonsprinsipper. Utnyttelsen av naturlig ventilasjon i moderne bygninger er ofte knyttet til en mekanisk drivkraft som bistår naturlige drivkrefter i perioder med utilstrekkelig ventilasjon. Dette er demonstrert i både nye og eldre bygninger som utnytter naturlige drivkrefter for ventilasjon.

2.4.1. Vindustype og åpningsområde

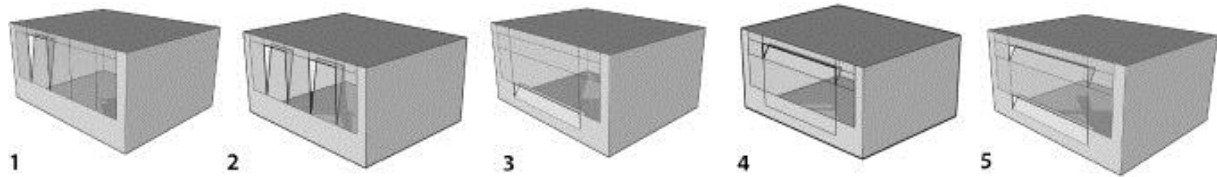
Ved vinduslufting finnes et bredt spekter av muligheter med hensyn til valg av størrelse, plassering og type vindu. Ulike vindustyper har ulike egenskaper med hensyn til beskyttelse mot vær, luftveksling og endring av åpningsområde. Ifølge Roetzel et al. (2010) vil valg av vindu i hovedsak være en arkitektonisk beslutning, sterkt påvirket av klima. Ved moderat klima foretrekkes vinduer som beskytter mot vind og regn, for eksempel bunnhengslede vinduer. I varme klima kan derimot størrelse på åpningsområde og mulighet for justering være viktigere. Valg av åpningsområde er avgjørende for resulterende luftveksling og brukeratferd. Noen vindusåpninger kan justeres trinnløst eller ved ulike trinn som for eksempel skyve-, side- eller topphengte vinduer. Andre vinduer, eksempelvis bunnhengslede vinduer, er vanligvis enten åpnet til en fast vinkel, eller lukket. Tabell 1 gir oversikt over egenskaper for ulike vindusåpninger med beskrivelse av symboler: - dårlig, O medium, + god.

Tabell 1: Evaluering av ulike vindustyper og egenskaper som påvirker ventilasjonseffektiviteten (Roetzel et al., 2010)

Egenskaper for ulike vindustyper når åpnet til en typisk åpningsvinkel	Sidehengt, åpning mot innsiden 	Bunnhengt, åpning mot innsiden 	Glidningsåpning, åpen rute dekker alltid en del av vinduet 	Horisontal dreining, nedre del åpner til utsiden 	Topphengt, åpning mot utsiden 
Beskyttelse mot vær	-	+	-	O	O
Maksimal luftveksling	+	-	O	+	O
Justering av åpningen	+	-	+	+	+

2.4.2. Vindusstørrelse, form og plassering

Kunnskap om mixed mode fasadedesign og påvirkning på ventilasjonseffektivitet er begrenset. Imidlertid viser flere studier at størrelse og plassering av ventilasjonsåpninger gir et betydelig potensial for optimalisering av luftskifte. Richter et al. (Roetzel et al., 2010) utførte simuleringer der han sammenlignet ulike vinduskonfigurasjoner og resulterende luftskifte for et kontor, som vist i Figur 6.



Figur 6: Ulike konfigurasjoner ved fasadeutforming (Roetzel et al., 2010)

Resultatene viser at størrelse og plassering av vinduer i fasaden har betydelig innflytelse på luftskifte. Ved å fordele fasadens totale åpningsareal over flere strategisk plasserte vinduer kan luftstrømning og luftskifte økes. Denne virkningen kan forsterkes ved hjelp av justerbare vindusåpningstyper. Konklusjonen var at mulighet for optimalisering er et spørsmål om fasadedesign, som kan resultere i økt ventilasjonseffektivitet og opplevde brukerkontroll. Hall (Roetzel et al., 2010) undersøkte effekten av ventilasjon for bunnhengslede vinduer i et kontor og rapporterte om sterk avhengighet mellom luftveksling og temperaturforskjell mellom inne- og utetemperatur, vindstyrke og retning, vindusstørrelse og plassering i fasaden, dybden til vindusramme, plassering av radiatorer, vindusdekorasjon og brukeratferd.

Herkel et al. (2008) utførte en feltstudie på vindusåpningsatferd i en naturlig ventilert bygning i Tyskland. Fasaden bestod av store vippe- og svingvinduer og mindre bunnhengslede vinduer plassert høyt på vegg. Brukeratferden viste små forskjeller for de ulike vindustypene, men vinduer plassert høyt ble åpnet sjeldnere og holdt åpne lengre enn de store vinduene. Ved høye utetemperaturer (over 20 °C) benyttet brukerne de små vinduene mer enn de store. Disse forskjellene i brukeratferd kan være relatert til luftstrømningsmønstre og resulterende trekkfornemmelse for brukerne. Dette samsvarer med funnene til Spindler & Norford (2009) som også antyder at vindusåpningsatferd er påvirket av lufthastighet på arbeidsplassen.

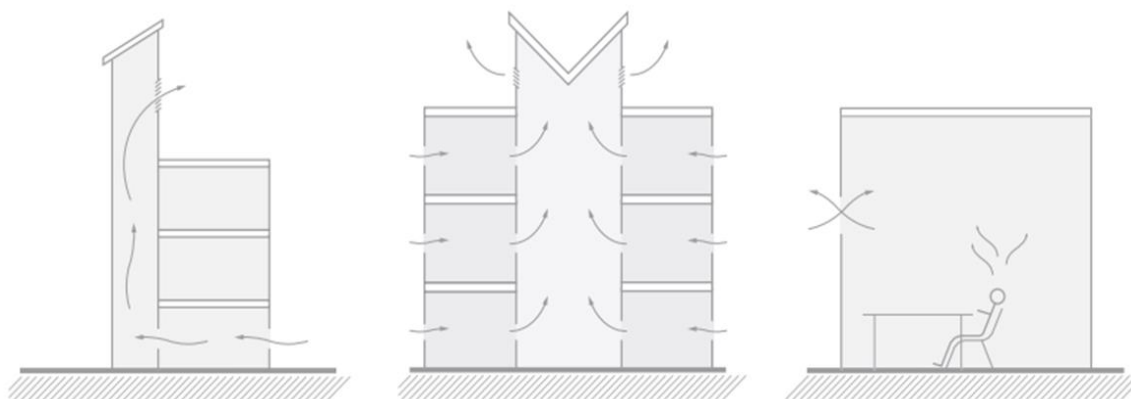
2.4.3. Atrium

Et atrium er et åpent parti med glasstak og eventuelt glassfasade, vanligvis sentrert i midten av en bygning som gir dagslys til de omkringliggende bygningsarealer. Et atrium kan benyttes til flere formål, eksempelvis som rekreasjonsområde, hage eller kantine (Kleiven, 2003). Både termisk oppdrift og vind er viktige drivkrefter for et atrium som benytter naturlig ventilasjon. Høy innetemperatur i forhold til utetemperatur gir en betydelig oppdriftseffekt. Vindfangere eller avtrekkshetter kan benyttes i tilknytning til atrium for å utnytte vind, og skorsteiner kan bedre utnyttelsen av både vind og termisk oppdrift. Vindtrykkforskjeller rundt bygningen og på motsatte side av atrium kan også benyttes ved strategisk plassering av vinduer eller andre luftstrømsåpninger, men dette krever et avansert kontrollsystem som tilpasses vindretning og vindhastighet. Fordeler med atrium er at de muliggjør åpning av vinduer i rom som vender mot atrium uavhengig av vind og utendørstemperatur, samt reduserer støy fra omgivelser. Et atrium kan brukes som tillufts- og avtrekksenhet eller en kombinasjon av begge. Ved lufttilførsel tilbyr atrium forvarming av tilluft på solfylte dager. På kalde dager vil overflatetemperaturer på vinduer mot atrium ha høyere temperatur enn vinduer vendt direkte mot omgivelsene. På denne måten motvirkes kaldras og termisk ubehag grunnet asymmetrisk stråling. Derimot kan høye temperaturer være et problem på varme dager og støy kan overføres mellom tilstøtende rom (ibid.).

2.4.4. Ventilasjonsprinsipper

Ved naturlig ventilasjon finnes ulike ventilasjonsprinsipper for utnyttelse av naturlige drivkrefter. Heiselberg (2002) beskriver tre ventilasjonsprinsipper med navn etter plassering av åpning i yttervegg; ensidig-, kryss- og oppdriftsventilasjon. Ved å benytte manøvrerbare vinduer kan ensidig ventilasjon utnyttes ved en eller flere åpninger på samme vegg. Drivkraften for ventilasjon er hovedsakelig termisk oppdrift, men også vind. Luften strømmer som regel inn i vinduets nederste del, og ut vinduets øverste del. Luftvekslingen avhenger av form på åpningen; høye åpninger påvirkes mer av temperaturforskjell enn lave åpninger, og brede åpninger mer enn små og smale åpninger. Ved åpning i to eller flere fasader vil det oppstå kryssventilasjon i rommet. Kryssventilasjon drives hovedsakelig av vind, gjennom utnyttelse av forskjell mellom vindtrykk på flater hvor åpninger er plassert. Vinden trekkes inn gjennom vinduer på lo-fasade, og ut gjennom vinduer på motstående side, le-fasade. Ved å øke høydeforskjellen mellom inn- og utløpsåpninger ved kryssventilasjon, vil termisk oppdrift øke. Økt trykkforskjell i ventilasjon vil resultere i oppdriftsventilasjon. Ved oppdriftsventilasjon benyttes åpninger for å trekke inn frisk luft på et lavt nivå, som igjen

trekkes ut på et høyt nivå. Ved bruk av atrium kan oppdriftsventilasjon utnyttes, der fleretasjes rom benyttes for å ventilere tilhørende rom (ibid.). Figur 7 illustrerer ulike ventilasjonsprinsipper og utnyttelse av atrium for oppdriftsventilasjon.



Figur 7: Fra venstre: Kryssventilasjon med skorsteinseffekt, kryss- og oppdriftsventilasjon i atrium, samt ensidig ventilasjon
(The Carbon Trust, 2012)

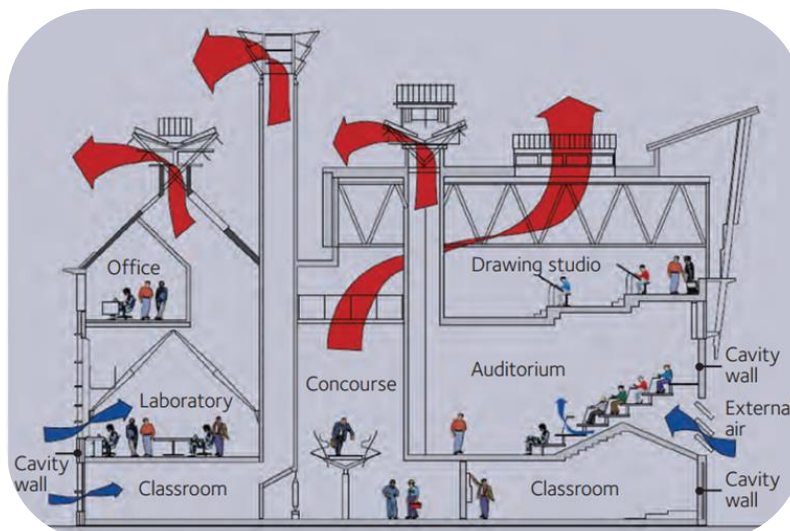
2.5. Ulike løsninger for mixed mode ventilasjon i undervisningsbygg

Som nevnt finnes ulike løsninger for utnyttelse av vinduslufting. Oppgaven tar videre for seg hvordan ulike mixed mode løsninger benyttes i undervisningsbygg i Norge og andre land. Utgangspunktet er et universitet i England og en skole i USA. For norske forhold vil nybygget Solstad barnehage og rehabiliterte Brunla ungdomsskole i Larvik presenteres. Det er satt opp to modeller for løsningen i Larvik; en modell for rehabiliterte bygg og en for nybygg.

2.5.1. Løsning for undervisningsbygg i England

Queens Building ved De Montfort universitet i England er et eksempel på en bygning som benytter et mixed mode system med passiv oppdriftsventilasjon, som vist i Figur 8. Bygningen er godt isolert og har store områder med eksponert termisk masse og stor takhøyde for å fremme naturlig ventilasjon og dagslys. Frisk luft strømmer inn i bygningen gjennom lavt plasserte åpninger eller ventilasjonsrister, varmes opp og stiger før den trekkes ut gjennom vertikale sjakter og ventiler i mønet. Inntaksluften varmes opp ved hjelp av rørvarmevekslere bak åpningene for å unngå kaldt trekk. Vifter montert i forhøyninger i auditorium bidrar til ventilasjon på varme og vindstille dager. Motoriserte spjeld i forhøyninger og ved luftinntak skal hjelpe til å opprettholde lav lufttemperatur og CO₂-nivå. Om sommeren benyttes uteluft for å avkjøle bygningens termiske masse i løpet av natten. Om vinteren benyttes ventiler for passiv ventilasjon som enten kan lukkes helt eller delvis. Videre benyttes et varmegjenvinningssystem til å trekke ut varme fra varm og fuktig avtrekksluft for

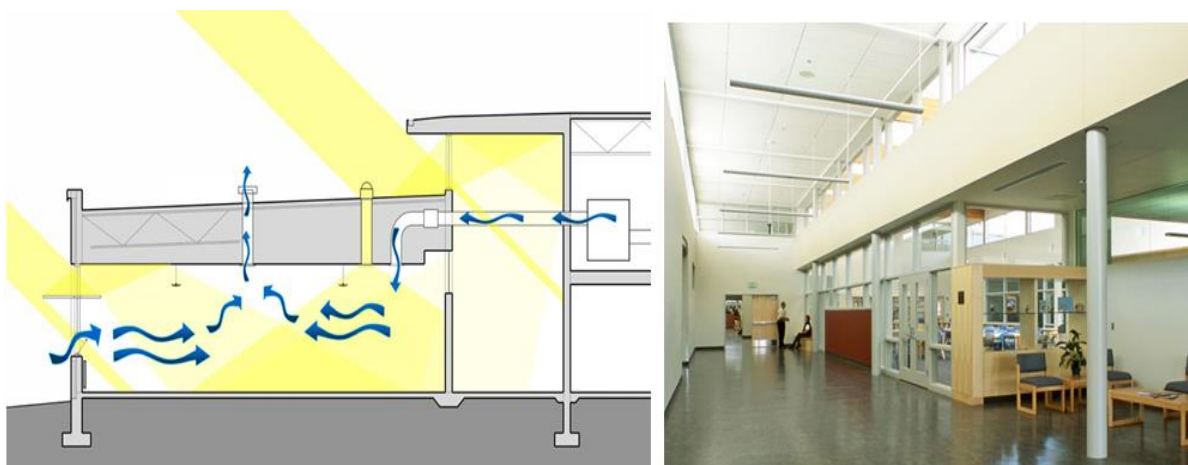
å forvarme kald og tørr uteluft. En strategisk utforming av åpninger og roterende vindfangere benyttes for å sikre at vindretningen ikke forårsaker reversert strømming i bygget (Islington, 2012).



Figur 8: Illustrasjon av ventilasjonsprinsippet ved Queens Building i England (Islington, 2012).

2.5.2. Løsning for undervisningsbygg i USA

Ash Creek Intermediate School i Oregon er et eksempel på en skolebygning som benytter mixed mode ventilasjon. Skolebygningen ble bygget i 2002 og utnytter passiv solenergi for å maksimere solvarme fra dagslys til oppvarming. For å fremme naturlig ventilasjon og dagslys benyttes innvendige og utvendige glassflater, gode planløsninger og eksponert termisk masse. Klasserommene har manøvrerbare vinduer og ventiler ved taknivå, som resulterer i utnyttelse av kryssventilasjon. Oppdriftsventilasjon ved hjelp av takventiler gir naturlig ventilasjon, med støtte fra VAV-vifter. Den naturlige ventilasjonen kan enkelt kontrolleres og gir større opplevelse av friskluft for elever og ansatte. Den naturlige ventilasjonsstrategien medfører at få deler av skolen trenger mekanisk ventilasjon og kjøling. Vinduene ved skolen er strategisk plassert for å utnytte dagslys mest mulig optimalt. Hvert klasserom åpner mot korridorer og fellesområder, der taket er hevet over høyden av klasserommene, som vist i Figur 9. Vinduene i fellesområdene sørger dermed for naturlig lys og tilluft som utnyttes i tilstøtende områder. Belysningen ved skolen er utstyrt med dimmere, og styres av bevegelsessensorer og dagslyssensorer i hver sone tilknyttet fotoceller på taket. Ved oppvarmingsbehov benyttes et kjelsystem med høy virkningsgrad og vannbårne veggpaneler (The Oregon Office of Energy, 2002).



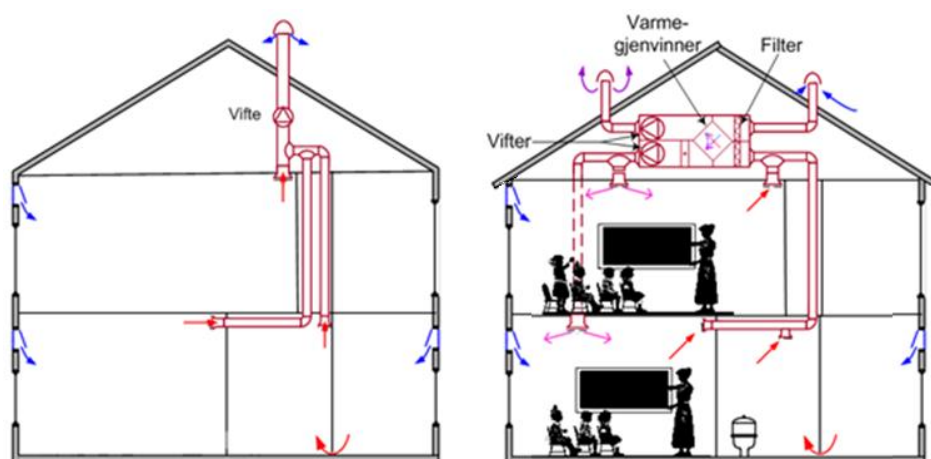
Figur 9: Illustrasjon av ventilasjonsprinsippet ved Ash Creek Intermediate School (Boora Architects)

2.5.3. Løsning for undervisningsbygg i Norge

Løsningen for rehabiliterte bygg i Larvik er basert på utnyttelse av naturlige drivkrefter ved aktiv vinduslufting. Luften tilføres bygget via høytsittende automatisk styrte vinduer. I perioder hvor naturlige drivkrefter ikke er tilstrekkelige eller i perioder med høy belastning, forbedres trykkforskjeller ved hjelp avtrekksvifter. Løsningen har mye til felles med mixed mode prinsippet parallellsystem hvor mekaniske og naturlige systemer benyttes parallelt. Avtrekkssystemet supplerer naturlige drivkrefter ved bruk av VAV-system styrt etter sensorer for interne og eksterne faktorer. De interne faktorene er CO₂, temperatur og luftfuktighet, mens de eksterne faktorene er utetemperatur, vindhastighet og vindretning. En trykkgføler i avtrekkskanalen regulerer VAV-spjeld i hvert rom separat. I oppvarmingsperioden benyttes radiatorer med styrt assistanse fra motoriserte fasadevinduer. Utenfor oppvarmingsperioden ventileres bygget ved hjelp av passiv ventilasjon ved kontrollerte fasadevinduer. Fasadevinduene gir kjøling til bygget ved bruk av passiv nattkjøling eller et luftskifte før bygget tas i bruk. Varmegjenvinning anses ofte som nødvendig for rehabiliterte undervisningsbygg ettersom de har stor personbelastning og dermed stort varmeoverskudd.

Løsningen for nybygg benytter to autonome ventilasjonssystemer, et rent naturlig system med automatisk styrte vinduer og et mekanisk balansert system med mulighet for varmegjenvinning og kjøling. Ventilasjonsløsningen er basert på utnyttelse av naturlige drivkrefter ved tilførsel av tilluft via høytsittende åpninger i fasaden eller atrium. Løsningen har mye til felles med mixed mode prinsippet sonesystem hvor det er mulig å anvende naturlig og mekanisk ventilasjon i parallell, bytte mellom ventilasjonsstrategi etter behov, eller benytte ulike ventilasjonsstrategier i ulike deler av bygget. Det er også mulig å benytte

naturlige føringsveier for ventilasjonen, hvor tilluft- og avtrekksvifter supplerer naturlige drivkrefter. I oppvarmingsperioden benyttes varmluftsoppvarming via ventilasjon eller radiatorer med styrt assistanse fra motoriserte fasadevinduer. Løsningen reduserer dermed behovet for mekanisk tilluft i vinterperioden og åpner for mindre mekaniske anlegg og reduserte kanalføringer. Utenfor oppvarmingsperioden kan både aktive og passive kjølestrategier benyttes. Figur 10 viser en illustrasjon av løsningen for rehabiliterte bygg og nybygg i Larvik.



Figur 10: Fra venstre: Illustrasjon av løsningen for rehabiliterte bygg og løsningen for nybygg (basert på tidligere modeller)

3. Teori og forskning knyttet til inneklima

Formålet med dette kapittelet er å gi en oversikt over ulike parameteres påvirkning på inneklima i skole- og barnehagebygninger. I prosjektoppgaven ble begrepene termisk- og atmosfærisk miljø undersøkt, disse begrepene vil utdypes her. Videre vil sammenhenger mellom inneklima og helseeffekter forklares.

Begrepet inneklima er definert av Verdens helseorganisasjon (WHO) til å omfatte termisk-, atmosfærisk-, akustisk-, aktinisk- og mekanisk miljø. Begrepet innemiljø omfatter i tillegg til hovedelementene ovenfor, estetisk miljø og psykososialt miljø (Gjerstad et al., 2007). Menneskets opplevelse av inneklima er subjektivt og varierer avhengig av tid på døgnet, året, samt med kjønn, alder og helsetilstand. Dårlig innemiljø kan føre til sykdom og plager, hvor barn og unge i utvikling er særlig sårbare (Arbeidstilsynet, 2013). I 2006 utførte Statistisk Sentralbyrå en arbeidsmiljøundersøkelse som viste at undervisningssektoren har mest klager på dårlig innemiljø (Bakke, 2009). Ifølge en undersøkelse av Barneombudet i 2007 kom det frem at mer enn 40 prosent av skolebygninger ikke er godkjent etter gjeldende forskrifter (ibid.). Senere rapporter om innemiljø i skoler og barnehager bekrefter at forholdene ikke har blitt bedre, snarere tvert om.

I dag oppholder mange mennesker seg innendørs store deler av døgnet. Inneklima har derfor stor innvirkning på helse, trivsel og prestasjonsevne. Ifølge Fanger (2006) blir innendørs-luftkvalitet definert etter hvorvidt menneskelige krav blir oppfylt. Individuelle behov må derfor oppfylles i rimelig grad for å få et godt inneklima. Det er et overordnet ønske å kunne oppholde seg i en bygning uten å rammes av ubehag og sykdom. Videre bør inneluft stimulere til arbeid og fremme økt produktivitet og læring. Dagens ventilasjonsstandarder og retningslinjer tar ikke hensyn til produktivitet og læring, og kravene til akseptabel luftkvalitet er for lav (Fanger, 2006). Dette kan medføre at følsomme personer kan oppfatte luften som uakseptabel, mens mindre sensitive personer kan oppfatte luften som akseptabel. Med dagens krav er det ikke overraskende at feltstudier fra bygninger der ventilasjonsstandarder er oppfylt, viser høy prosentandel av misfornøyde personer. Nyere studier viser at forbedring av innendørs luftkvalitet med en faktor på 2-7, sammenlignet med eksisterende standarder, øker produktiviteten betydelig for læring, samtidig som risiko for allergiske symptomer og astma reduseres (ibid.).

3.1. Termisk inneklima

Termisk inneklima omfatter parametere som har innflytelse på menneskets varmebalanse og termiske komfort. Disse parameterne er miljøfaktorene lufttemperatur, strålingstemperatur, luftfuktighet og lufthastighet, samt personfaktorene aktivitetsnivå og bekledning.

3.1.1. Vurdering av termisk komfort

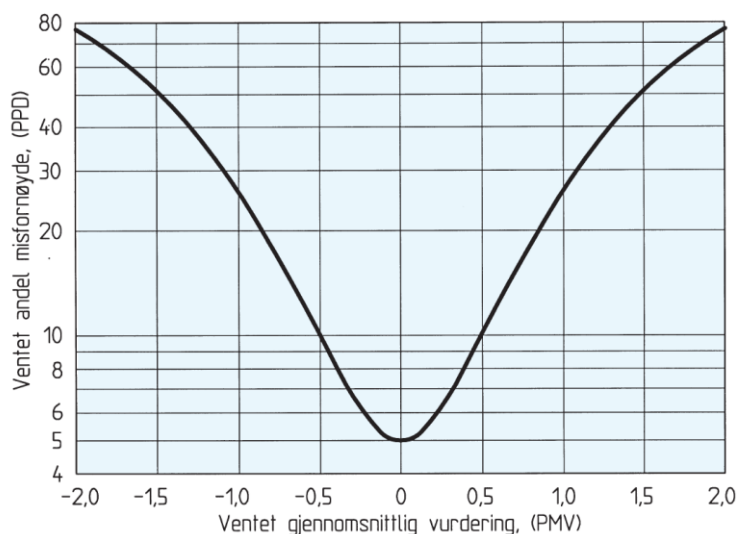
Termisk komfort defineres som en sinnstilstand der man uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelsene (Gjerstad et al., 2007). For at inneklima kan betegnes som godt er det en forutsetning at den enkelte opplever termisk komfort med omgivelsene. Indeksen Predicted Mean Vote (PMV) vist i Tabell 2 er en syvpunktskala som angir forventet middsverdi av tilbakemeldinger fra en gruppe mennesker i samme omgivelser, basert på kroppens varmebalanse. Indeksene uttrykker et kvantifisert mål på kroppens termiske tilstand. Vurdering 0, nøytral, betyr at man ikke ønsker omgivelsene varmere eller kaldere. Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) angir et kvantitativt anslag over prosentandel misfornøyde med termiske omgivelser ved et gitt tilfelle av aktivitet og bekledning. PPD baseres på PMV, hvor andel misfornøyde regnes å være de som vurderer termisk opplevelse som +3, +2, -2 og -3 fra syvpunktsskalaen for PMV (ibid.).

Tabell 2: Predicted Mean Vote (Gjerstad et al., 2007)

+3	Hett
+2	Varmt
+1	Lett varmt
0	Nøytral
-1	Lett kjølig
-2	Kjølig
-3	Kaldt

Sammenhengen mellom PMV og PPD vist i Figur 11 gir et anslag for hvor stor andel av en større gruppe som vil være misfornøyd med termisk komfort ved et gitt tilfelle. En PMV verdi på 0 resulterer i en PPD verdi på 5 prosent, som tyder på at det ikke finnes klimatiske forhold som tilfredsstiller alle brukerne samtidig. Dermed vil det alltid være en prosentandel som er misfornøyd med de termiske omgivelsene. Det er likevel mulig å oppnå termiske omgivelser som blir godt mottatt av flertallet av brukerne. Anbefaling i NS EN ISO 7730 (2005) er PMV verdier i området -0,5 til +0,5 som resulterer i PPD verdi under 10 prosent. Termisk nøytralitet er nødvendig for å oppnå termisk komfort, men er ikke alltid tilstrekkelig. Lokal

termisk ubehag kan forekomme selv om kroppen er i en termisk nøytral tilstand. Årsaker til dette kan være trekk, strålingsasymmetri eller store temperaturforskjeller mellom hode og ankler (Gjerstad et al., 2007).



Figur 11: Forholdet mellom PMV og PPD (Byggforsk byggdetaljer, 1999)

3.1.2. Bekledning og aktivitetsnivå

Termisk komfort er personavhengig og påvirkes av bekledning og aktivitetsnivå. Metabolismen avhenger av fysisk aktivitet og angis i enheten W/m^2 kroppsoverflate, eller i den relative enheten met. 1 met tilsvarer $58 W/m^2$ kroppsoverflate for en stillesittende og avslappet person (Gjerstad et al., 2007). Aktivitetsnivået i skoler er som regel rolig (1,2 met). For barnehager er aktivitetsnivået noe høyere, da lek og fysisk aktivitet preger hverdagen (1,4 met). Bekledningens isolerende effekt har stor betydning for varmeutveksling og isolasjonsgraden angis i enten m^2K/W eller i den relative enheten clo. 1 clo tilsvarer $0,155 m^2K/W$, som er isolasjon nødvendig for å holde en sittestillende person (aktivitetsnivå på 1 met) komfortabel ved $21\text{ }^{\circ}C$, 50 % relativ luftfuktighet og lufthastighet $0,1\text{ m/s}$ (ibid.). For skoler og barnehager benyttes normal innendørs sommerbekledning (0,5 clo) og vinterbekledning (1,0 clo) ved beregning av termisk komfort.

3.1.3. Temperatur

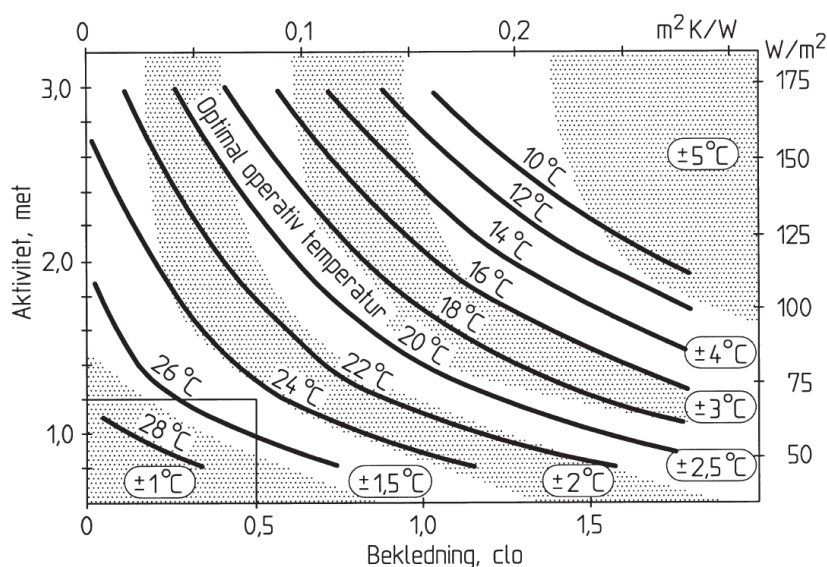
Lufttemperatur er vanligste parameter i beskrivelse av termiske omgivelser, og er essensiell for termisk komfort. Kravene til termisk inneklima er gitt i TEK10 § 13-4 med anbefalinger i veiledningen. Det anbefales at lufttemperaturen holdes under 22 °C ved oppvarmingsbehov. Overskridelse av maksimalgrensen på 26 °C bør kunne aksepteres i varme sommerperioder med utelufttemperatur over den som overskrides med 50 timer i et normalår (TEK10). Uten spesielle strålingskilder i rommet kan tørrkuletemperaturen legges til grunn. Med store strålingskilder er det mer hensiktsmessig å bruke operativ temperatur. Operativ temperatur er et temperaturmål som kombinerer effekten av lufttemperatur og strålingsutveksling med omgivende flater (Gjerstad et al., 2007). Tabell 3 viser anbefalinger til operativ temperatur innendørs for skole og barnehage.

Tabell 3: Anbefalte romtemperaturer for skoler og barnehager (Byggforsk byggdetaljer, 1999)

	Kategori	Operativ temperatur (°C)	
		Sommer	Vinter
Skole	1	24,5 ± 0,5	22,0 ± 1,0
	2	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
	3	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0

	Kategori	Operativ temperatur (°C)	
		Sommer	Vinter
Barnehage	1	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0
	2	23,5 ± 2,0	20,0 ± 2,5
	3	23,5 ± 2,5	20,0 ± 3,5

Optimal operativ temperatur gir en ventet gjennomsnittlig vurdering PMV lik null (PPD = 5 %). Figur 12 viser en gitt situasjon med bekledning 0,5 clo og aktivitetsnivå 1,2 met, som resulterer i en optimal operativ temperatur rundt 24,5 °C. En PPD verdi under 10 prosent tillater et avvik på optimal operativ temperatur på ± 1,5 °C.



Figur 12: Optimal operativ temperatur ved ulike beklædning og aktivitetsnivå som gir PPD < 10 % (Byggforsk byggdetaljer, 1999)

Termisk stråling oppstår ved temperaturforskjeller mellom flater eller legemer, eksempelvis vegg og mennesker. En kald overflate vil absorbere varme fra omgivende flater med høyere temperatur, mens varme overflater vil utstråle varme til kalde flater. Dette er også tilfelle for en person og dens omgivelser (Gjerstad et al., 2007). I tillegg til tilfredsstillende temperatur i rommet, må det påses at den vertikale temperaturgradienten i oppholdssonen ikke blir for høy. Ved asymmetrisk eller ensidig temperaturstråling vil enkelte føle ubehag grunnet lokale under- eller overtemperaturer fra kalde vinduer, varme tak eller kalde gulv (ibid.). Lufttemperaturforskjell over 3-4 °C mellom føtter og hode vil gi uakseptabelt ubehag, likeså daglig eller periodisk temperaturvariasjon utover omlag 4 °C (TEK10).

3.1.4. Lufthastighet

Luftbevegelser påvirker konvektiv varme- og masseutveksling mellom en person og omgivelsene. Dette har innvirkning på termisk komfort og lokal termisk ubehag. Den vanligste årsaken til klager på termiske komfort i kontorbygg er trekk (Allard et al., 1998). Trekk defineres som uønsket, lokal, konvektiv avkjøling av legemet. Det skilles mellom strålingstrekk og konvektiv trekk. Strålingstrekk skyldes for stor strålingsasymmetri, mens konvektiv trekk har sammenheng med relative luftbevegelser, temperatur og fuktighet. Konvektiv trekk påvirker termisk opplevelse av inneklima (Gjerstad et al., 2007).

Det er først og fremst naken hud som er følsom for trekk. Trekkplager er derfor normalt konsentrert til ansikt, nakke, hender og nedre del av bena. Trekk kan skyldes ventilasjonsanlegg som skaper for stor luftbevegelse, kaldras fra avkjølte flater som vinduer, eller luftlekkasjer i bygningskroppen (Byggforsk byggdetaljer, 1999). Ifølge Arbeidstilsynet (2012) bør ikke lufthastigheten overstige 0,15 m/s på arbeidsplasser med fysisk lett arbeid, som i skolebygninger. Tabell 4 viser anbefalinger for maksimal lufthastighet i skoler og barnehager.

Tabell 4: Maksimale lufthastigheter i skoler og barnehager (Byggforsk byggdetaljer, 1999)

	Kategori	Maksimal lufthastighet (m/s)	
		Sommer	Vinter
Skole	1	0,18	0,15
	2	0,22	0,18
	3	0,25	0,21

	Kategori	Maksimal lufthastighet (m/s)	
		Sommer	Vinter
Barnehage	1	0,16	0,13
	2	0,20	0,16
	3	0,24	0,19

For å avgjøre om luftstrømninger i et rom oppleves som trekk er det nødvendig å vite lufthastighet og turbulensintensitet. Luftbevegelser i ventilerte oppholdsrom er vanligvis turbulente, hvor hastighet svinger hurtig og tilfeldig på kort tid, noe som lettere fører til ubehag enn laminære hastigheter ved samme lufthastighet og temperatur. Turbulensintensitet i rom med omrøringsventilasjon er normalt i området 30 – 60 prosent og noe lavere i rom uten mekanisk ventilasjon eller fortrengningsventilasjon (Gjerstad et al., 2007).

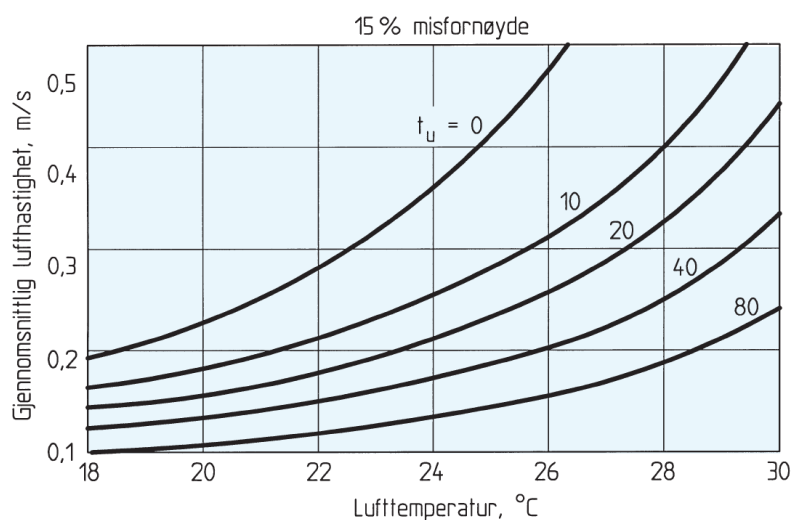
I en undersøkelse av Fanger (Gjerstad et al., 2007) ble sammenhengen mellom turbulensintensitet og trekkrisiko undersøkt. Resultatene viser at fluktuasjoner har en vesentlig innflytelse på trekkfornemmelse. På bakgrunn av forsøkene er det satt opp en modell som angir forventet prosentandel utilfredse mennesker grunnet trekk, som en funksjon av lufttemperatur (t_a), middellufthastighet (\bar{v}) og turbulensintensitet (T_u). Utilfredshetsprosenten, PD (percentage dissatisfied), er gitt ved Formel (1).

$$PD = (34 - t_a)(\bar{v} - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot \bar{v} \cdot T_u + 3,14) [\%] \quad (1)$$

For $\bar{v} < 0,05$ m/s settes $\bar{v} = 0,05$ m/s.

For $PD > 100$ % brukes $PD = 100$ %.

Figur 13 viser kombinasjoner av lufttemperatur, turbulensintensitet og lufthastighet som resulterer i en gjennomsnittlig trekkvurdering, ventet andel misfornøyde, på 15 prosent. Ved en gitt temperatur og økt turbulensintensitet må lufthastigheten senkes for å holde tilfredsstillende nivå under 15 prosent.



Figur 13: Kombinasjon av gjennomsnittlig lufthastighet, lufttemperatur og turbulensintensitet som gir en gjennomsnittlig trekkvurdering på 15 % (Byggforsk byggdetaljer, 1999)

Det finnes ingen nedre lufthastighet for å opprettholde termisk komfort. Imidlertid kan økt lufthastighet utnyttes for å redusere fornemmelsen av varme, grunnet høye temperaturer (NS EN ISO 7730). I varme perioder vil høy lufthastighet øke fordampning fra huden og resultere i en forbedret følelse av kjøling. Ved dette prinsippet kan en person oppnå termisk komfort ved høyere temperaturer dersom luften tilføres med høyere lufthastighet (Allard et al., 1998). Ifølge NS EN ISO 7730 kan temperaturen økes over tillatte nivå for komfort dersom også lufthastigheten økes.

3.1.5. Luftfuktighet

Fuktighet i en bygning kan uttrykkes som absolutt eller relativ. Det er den absolutte fuktighet som påvirker varmetapet fra en person grunnet fordampning, noe som igjen påvirker termisk komfort (Arbeidstilsynet, 2013). Ved vurdering av luftfuktighet er relativ luftfuktighet vanligst. Relativ luftfuktighet uttrykker brøkdelen fuktighet som luften inneholder ved en bestemt temperatur, i forhold til hva den maksimalt kan inneholde ved samme temperatur (Gjerstad et al., 2007). Uteluftens vanndampinnhold varierer med tid og sted, og relativ luftfuktighet vil normalt ligge i området 50 til 90 prosent. I løpet av et døgn vil relative fuktighet i uteluften variere fra 60 til 80 prosent, mens den i romluft kan svinge i området 20 til 70 prosent.

Variasjonen i romluftens relative luftfuktighet har liten betydning for komfortfølelsen. Luftfuktighet er av større betydning for kroppens varmereguleringsmekanisme ved høy temperatur og høy fuktighet, grunnet varmeavgivelse ved fordunsting. Ved lav fuktighet og lav temperatur vil avkjølingsprosessen ved fordunstning av svette fra huden foregå hurtig. Luften kan dermed oppfattes kald selv ved relativt moderate temperaturer. Ved høy temperatur og høy fuktighet vil det motsatte kunne inntre da fordunstningen hemmes (Gjerstad et al., 2007). Tabell 5 viser anbefalinger med hensyn til nivået av luftfuktighet i en bygning. Øvre grense for luftfuktighet er satt ut fra risiko for mikrobiologisk vekst og fare for kondens med påfølgende bygningsskader.

Tabell 5: Krav til relativ fuktighet (Byggforsk byggdetaljer, 2000)

Sesong	Kategori		
	1	2	3
Vinter	$20 < RF < 40$	$RF < 40$	$RF < 40$
Sommer	$RF < 60$	$RF < 70$	$RF < 70$

3.2. Atmosfærisk inneklima og luftkvalitet

Atmosfærisk inneklima omhandler luftkvalitet som følge av forurensningskilder og ventilasjon. Inneluft forurenses av gasser, lukter, kjemiske stoffer og partikler, samt uteluft. Forurensset inneluft kan gi midlertidige plager som nedsatt arbeidsevne og hodepine, i tillegg til kortvarige og langvarige plager i form av irritasjon, astma og allergi (Gjerstad et al., 2007). Vanlige forurensningskilder i klasserom og barnehager er CO₂, vanndamp og kroppslukt avgitt fra elever og lærere. Dette gjelder også trafikkerte veier hvor gatestøv følger uteluften inn i lokalet. Forurensningene kan ofte reduseres ved tilstrekkelig ventilasjon.

Romluftens CO₂-konsentrasjon brukes ofte som indikator på luftkvalitet i bygninger og avhenger av brukerbelastning og oppholdstid i rommet. Høyt konsentrasjonsnivå kan bety lave luftmengder eller uheldige strømningsforhold i rommet, noe som medfører dødsoner hvor luften ikke skiftes ut. Høyt innhold av CO₂ skyldes mangelfull ventilasjon i forhold til antall personer i lokalet. Tilfredsstillende ventilasjon gir konsentrasjoner under normverdien på 1000 ppm (Arbeidstilsynet, 2013). Uteluftens CO₂-nivå i Norge ligger mellom 350-450 ppm (Nilsson, 2003).

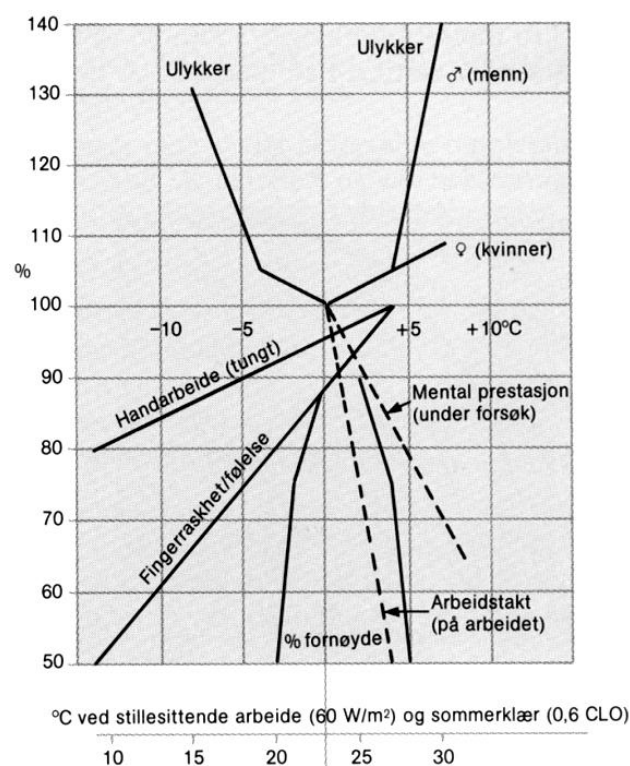
Tilførte luftmengder har også innvirkning på luftkvaliteten. Hvor mye friskluft som er nødvendig bestemmes av rommets totale og samvirkende forurensningsbilde. Ettersom det er en nær sammenheng mellom luftmengder og energiforbruk er det avgjørende å velge riktig nivå på lufttilførsel. Krav for frisklufttilførsel kan variere etter faktorer som respirasjon, lukt, dominerende forurensningskilder eller gjennomsnittlig forurensningsbilde. Faktoren som gir størst luftmengde er dimensjonerende for ventilasjonen (Gjerstad et al., 2007). For å imøtekomme brukernes friskluftbehov må det tilføres en gitt mengde ren luft slik at forurensningene ikke overskrider krav og forskrifter. TEK10 gir retningslinjer for ventilasjon i byggverk for publikum og arbeidsbygning. Det er et krav at arbeidsbygninger skal ha gjennomsnittlig frisklufttilførsel på minimum 26 m³ per time per person grunnet forurensing fra personer i lett aktivitet. Gjennomsnittlig frisklufttilførsel skal minimum være 2,5 m³ per time per m² gulvareal når bygningen eller rommene er i bruk og minimum 0,7 m³ per time per m² gulvareal når bygningen eller rommene ikke er i bruk.

3.3. Faktorer som påvirker termisk og atmosfærisk miljø

Bygninger med for høy eller lav temperatur, støy og lave luftmengder kan redusere konsentrasjon og arbeidstakt. Høy temperatur er et vanlig problem i klasserom, hvor dårlig inneklimate kan redusere læreevne, ytelse og føre til økt fravær. Negative effekter på prestasjon er også forbundet med symptomer som hodepine og nedsatt konsentrasjonsevne (Nilsson, 2003). Først for ti år siden ble det dokumentert at dårlig inneklimate har negativ effekt på prestasjon, da undersøkelser viste at kontorarbeid påvirkes negativt av middelmådig inneklimate (Wyon & Wargocki, 2006).

3.3.1. Temperatur og produktivitet

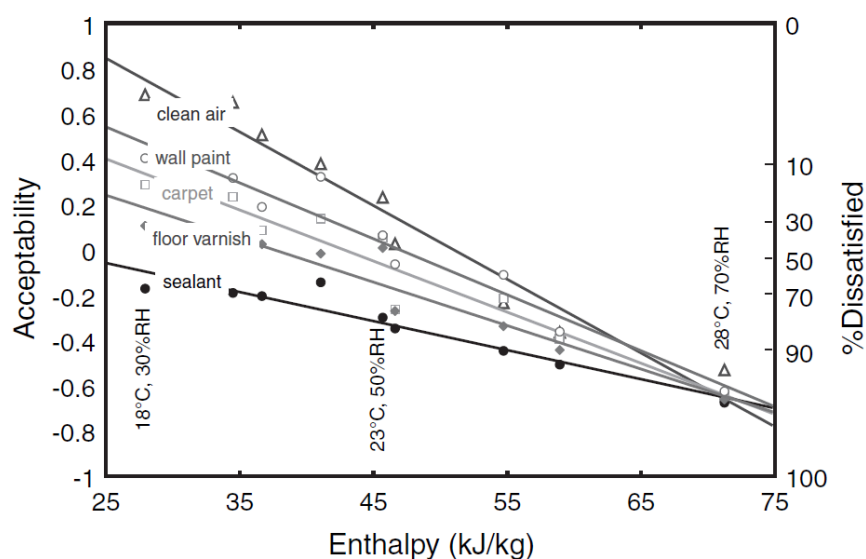
En undersøkelse av skoler i Sverige viste en temperatur i klasserom rundt 23 °C – 25 °C i april til september, 3 °C – 6 °C over hva lærere og elever foretrekker (Wyon & Wargocki, 2011). Den vanligste årsaken til høy temperatur er lave luftmengder som ikke er i stand til å fjerne overskuddsvarme forårsaket av solinnstråling. Etter en rekke undersøkelser har Wyon (1986) laget et diagram som illustrerer sammenheng mellom temperatur og produktivitet. Figur 14 viser at både muskulær og intellektuell arbeidsevne synker ved for lav og for høy temperatur, mens ulykkesfrekvensen øker.



Figur 14: Sammenheng mellom temperatur og arbeidsytelser
(Grafikk fra SINTEF 2002, etter Wyon 1986)

3.3.2. Temperatur og luftfuktighet

Ifølge Fang et al. (2004) har tidligere studier slått fast at temperatur og luftfuktighet påvirker opplevd luftkvalitet. Studiene har påpekt at inneluft oppfattes som mindre akseptabel med økende lufttemperatur og luftfuktighet. Luft oppleves friskere og mer akseptabel når den er kjølig og tørr, mens varm og fuktig luft oppfattes som trykkende og uakseptabel, selv om luften er ren. Høy temperatur og fuktighet motvirker dermed effekten av økt ventilasjon og gir dårligere oppfattelse av luftkvalitet. Det er derfor gunstig å holde både innendørs lufttemperatur og fuktighet så lav som mulig, forutsatt at termisk komfort kan opprettholdes. Aksepten av luftkvalitet reduseres lineært med økende innendørs luftentalpi, vist i Figur 15.

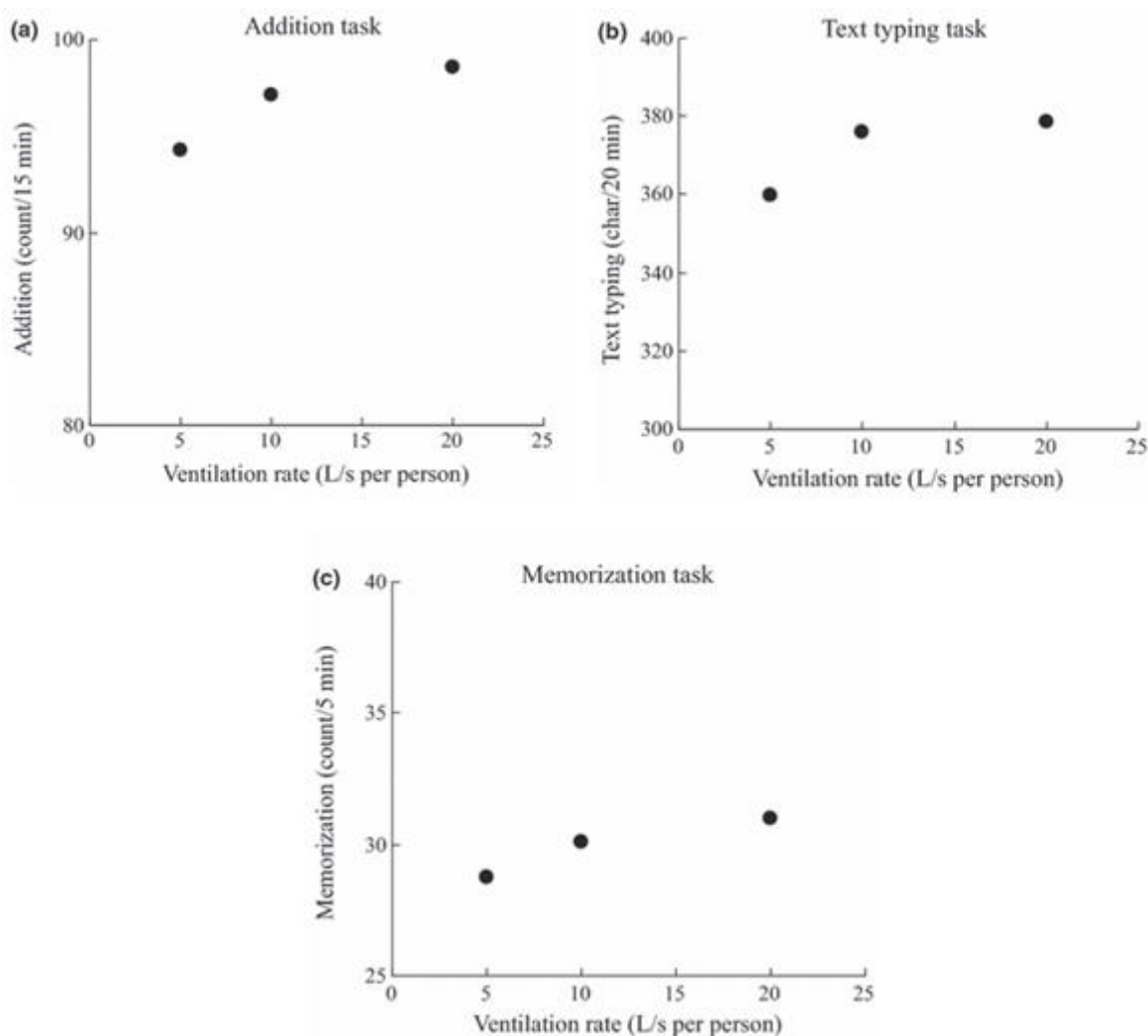


Figur 15: Lineær korrelasjon mellom akseptabilitet og entalpi for fem luftprøver; ren uteluft og luft forurenset av maling, tepper, gulvlakk, samt fugemasse (Fang et al., 2004).

For å validere tidligere funn utførte Fang et al. (2004) feltforsøk i kontorlokaler hvor effekten av temperatur og fuktighet på opplevd luftkvalitet ble undersøkt. Forsøket viste at oppfatning av luftfriskhet ble sterkt forbedret ved redusert temperatur og luftfuktighet. En forbedring av oppfattet luftkvalitet, grunnet redusert entalpi, kan brukes til å kompensere for den negative effekten av å redusere tilførselshastigheten fra 10 til 3,5 liter per sekund per person (l/s per person). Intensitet av tretthet, hodepine og problemer med å tenke klart ble redusert ved lavere nivåer av lufttemperatur og luftfuktighet.

Både feltstudier og undersøkelser i klimakammer viser at den største effekten av økende ventilasjon skjer opp til 10 l/s per person som illustrert i Figur 16 (Park & Yoon, 2011). I moderat ukomfortabelt kontormiljø må personer anstrenge seg mer for å opprettholde ytelsen

ved mer krevende arbeidsoppgaver, samtidig som motivasjonen for arbeidet synker (Lan et al., 2011). I studier av ulike miljøforholdseffekter på produktivitet er symptomene trøtthet og hodepine regelmessig assosiert med nedsatt produktivitet. Det er derfor plausibelt at redusert hodepine også vil kunne være assosiert med bedre funksjonsevne (Ebbehøj et al., 2002).



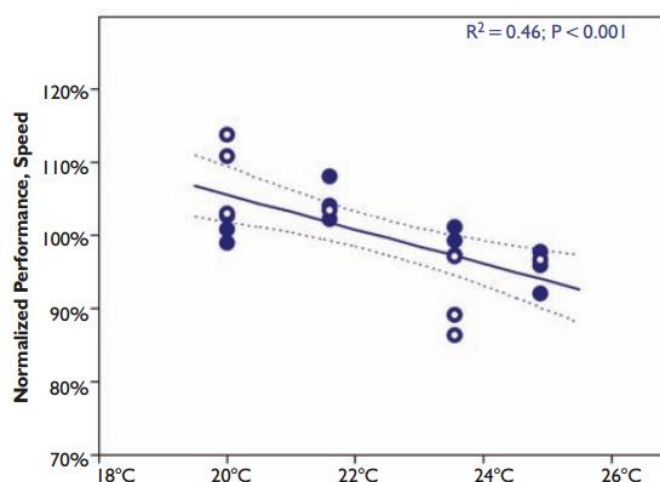
Figur 16: Effekt av frisklufttilførsel på arbeidsevne gjennom 8-timers arbeidsdag (Park & Yoon, 2011)

Ito & Murakami (2010) sammenlignet to tiltak for å bedre produktivitet i en skolebygning. Resultatene viste at elevprestasjon økte med 4 prosent ved å øke ventilasjonen fra 10 til 30 l/s per person. Videre økte prestasjonen med 6,4 prosent ved å øke ventilasjonen fra 10 til 60 l/s per person, mens energiforbruket steg med 200 prosent. Ved å senke temperaturen en grad fra 28 til 27 grader under sommerforhold økte også prestasjonen med 26 prosent. Videre økte elevprestasjoner 43 prosent ved å senke temperaturen to grader fra 28 grader. Energiforbruket steg da med 40 prosent. Sammenligningene viser at prestasjonsevnen er mest avhengig av temperatur i rommet.

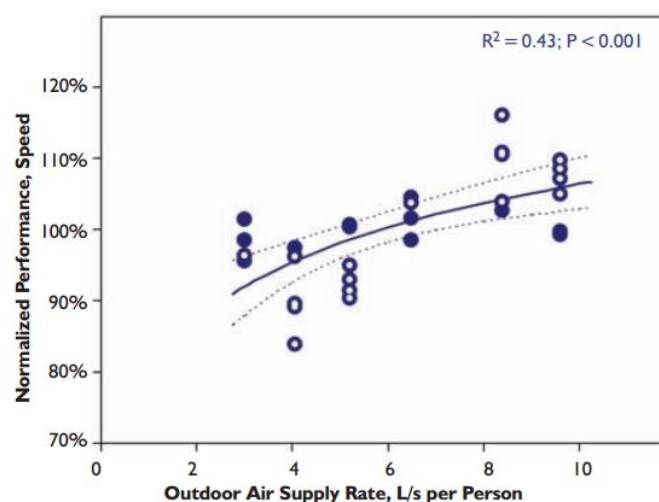
3.3.3. Økt temperatur og luftmengde i klasserom

Wargocki & Wyon (2011) har utført flere feltobservasjoner (blind «crossover» design) i klasserom hvor økt temperatur og luftmengde ble undersøkt. Sensommeren 2004-2005 ble det utført studier av klasserom i Danmark hvor lufttemperatur og tilførselshastighet ble variert. Forsøkene gikk ukesvis med repeterte målinger av to klasser (10–12 år gamle barn). Seks til åtte øvelser med ulike aspekter av skolearbeid (numerisk og språkbasert) ble utført som del av vanlig undervisning. Elevene indikerte miljømessige oppfatninger og intensiteten av eventuelle symptomer på visuelle analoge skalaer. Forsøkene viste at ved å redusere lufttemperaturen fra 25 °C til 20 °C, forbedret elevenes prestasjon på to numeriske og to språkbaserte oppgaver. Elevenes termiske oppfatning endret seg fra litt for varm til nøytral, og i ett av forsøkene ble det rapportert betydelig mindre hodepine ved lavere temperatur. Forbedringene var hovedsakelig i form av hastighet på utførelse av oppgaver, med ubetydelig effekt på feilrate. Et panel av voksne besøkte klasserommene etter barna hadde forlatt rommene og fant betydelig friskere og mer akseptabel luftkvalitet ved lavere temperatur. Ved å øke tilførselen av friskluft fra 5,2 til 9,6 l/s per person ble prestasjoner ved fire numeriske øvelser betydelig forbedret.

Fra forsøkene til Wargocki & Wyon (2006) ble det satt opp grafer som viser utførelse av skolearbeid som en funksjon av temperatur (Figur 17) og tilførselshastighet på uteluft (Figur 18). De lukkede prikkene i figurene viser resultater for de enkelte oppgavene, mens åpne prikker viser oppgaver der prestasjon var betydelig forandret.



Figur 17: Utførelse av skolearbeid som en funksjon temperatur i klasserommet
(Wyon & Wargocki, 2006)



Figur 18: Utførelse av skolearbeid som en funksjon av tilførselshastighet på uteluft
(Wyon & Wargocki, 2006)

3.3.4. Økt luftmengde og tilluftsfilter i klasserom

Wargocki & Wyon (2011) utførte også feltobservasjoner i klasserom hvor økt luftmengde og tilluftsfilter ble undersøkt. Studien ble utført i mekanisk ventilerte klasserom som mottok 100 prosent uteluft. Tilførsel av utendørsluftmengde og filtertilstand ble endret for å måle inneklimate og prestasjon. Forsøkene viste at økning av luftmengden fra 3,0 til 8,5 l/s per person ga betydelig prestasjonsbedring av to numeriske og to språkbaserte tester. Barna indikerte også at luften var friskere, men oppfattet ellers liten forskjell. Ved å øke luftmengden ble arbeidskapasiteten bedret i 70 prosent av forsøkene. Ved økt tilførselshastighet ble luften oppfattet friskere, og luftkvalitet ansett som bedre ved et sensorisk panel av voksne. Gjennomsnittlig CO₂-nivå ble redusert fra 1300 ppm til 900 ppm. Observerte effekter kan derfor antas å være en konsekvens av forbedret luftkvalitet.

I California er en studie utført over to år i 162 klasserom i 28 skoler som viste at medianverdien for ventilasjon lå under kravet på 7,1 l/s per person. Studien slo fast at for hver liter økt ventilasjon sank sykefraværet. På grunnlag av data fra studien ble det beregnet at økt gjennomsnittlig ventilasjon fra 4 til 7,1 l/s per person ville senke fraværet med 3,4 prosent. Studien viste videre at daglig sykefravær var assosiert med ventilasjon, hvor økonomiske beregninger viste at økt ventilasjonen kunne være lønnsomt (Mendell et al., 2013).

Fisk et al. (2009) utførte også en analyse av tilgjengelige data knyttet til luftmengder og sykt bygg syndrom (SBS) i kontorbygninger. SBS-symptomer er akutte symptomer som hud-, øye- og neseirritasjon, hodepine og luftveisproblemer knyttet til tilstedeværelse i et bestemt bygg uten en spesifikk sykdom (Fisk, 2002). Risikofaktorer for SBS symptomer identifisert i flere studier inkluderer lavere luftmengder, bruk av ventilasjonsanlegg, og høy innendørs lufttemperatur. I en undersøkelse av 100 kontorbygg i USA opplevde 23 prosent av kontorarbeiderne ofte en eller flere SBS-symptomer i jobbsammenheng (ibid.). Analysen fra Fisk et al. (2009) tyder på at luftmengder har betydelig innvirkning på SBS-symptomer. Videre indikerer analysene at gjennomsnittlig forekomst av SBS-symptomer øker med omlag 23 prosent når luftmengden reduseres fra 10 til 5 l/s per person, og reduseres med omlag 29 prosent når luftmengden økes fra 10 til 25 l/s per person.

3.3.5. Luftkvalitet

Ifølge Kjeldsen et al. (2013) er det flere grunnskoler som har CO₂-konsentrasjoner over 2500 ppm. Dette skyldes både at undervisningsbygg ofte har høy brukerbelastning og er underventilerte. CO₂ i seg selv er ikke skadelig i de konsentrasjoner som vanligvis oppleves innendørs. Nyere studier har imidlertid vist at forhøyet CO₂ konsentrasjon på 2500 ppm kan påvirke evnen til å ta rasjonelle beslutninger. Europastudien fra 21 skoler med 654 ti år gamle elever i 46 klasserom i Norge, Sverige, Danmark, Frankrike og Italia (Simoni et al., 2010) viste overhyppighet av tørrhoste, snue og nesetetthet i klasserom med CO₂-konsentrasjon høyere enn 1000 ppm sammenlignet med klasserom med lavere konsentrasjon.

Som nevnt er et vanlig krav at CO₂-konsentrasjonen ikke skal overstige 1000 ppm. Dette kravet har imidlertid blitt kritisert fordi CO₂ i seg selv ikke har helseeffekt før konsentrasjon over 5000 ppm (Dokka & Vik, 2001). Kontroll av temperatur og relativ fuktighet blir ofte tyngre vektlagt enn å holde CO₂-nivået lavt. Dette har gitt utslag i at flere naturlig og hybrid ventilerte skoler i Sverige og Norge er gitt dispensasjon til å ha CO₂ nivå opp til 1500 – 2000 ppm (ibid.).

I 54 grunnskoler ble CO₂-konsentrasjon målt over 4-5 timer på en typisk skoledag for 5.klasse. Målingene viste en betydelig assosiasjon mellom ventilasjon og testresultater i matematikk (Shaughnessy et al., 2006). I en studie av 417 studenter i 20 klasserom økte feilfrekvensen med 65 prosent ved en gjennomsnittlig CO₂-konsentrasjon på 2115 ppm sammenlignet med 1045 ppm ved 2366 tester (Twardella et al., 2012). I en studie av to

skoledistrikter sydvest i USA inngikk 100 klasserom for femteklasseelever, 87 med ventilasjon under anbefalte normer. Det ble observert en lineær sammenheng mellom luftmengder og prestasjon i intervallet 0,9 til 7,1 l/s per person. For hver l/s per person økt ventilasjon, økte andel elever som klarte standardiserte tester med 2,9 prosent for matematikk og 2,7 prosent for lesing (Haverinen-Shaughnessy, 2011).

Kombinasjonen av nedsatt arbeidsprestasjon, økte helseplager og dårligere oppfattet luftkvalitet har blitt tilskrevet korrelasjonen med innendørs CO₂-konsentrasjoner og andre innendørs luftforurensninger. Satish et al. (2012) har vurdert direkte effekter av CO₂ på beslutningsprosesser, hvor 22 deltakere ble eksponert for CO₂-konsentrasjoner på 600, 1000 og 2500 ppm i et klimakammer. Deltakerne ble eksponert for de ulike konsentrasjonene i tre 2,5-timers økter. I studien var lokalene godt ventilert med frisk luft, og ren CO₂ ble tilsatt til ønsket konsentrasjon. Luftmengde og temperatur ble holdt konstant under forsøkene. Ved hvert forsøk fullførte deltakere spørreskjemaer om helsesyntomer og opplevd luftkvalitet, samt en beslutningstest. Resultatene viste effekten av CO₂ på mental ytelse ved 600, 1000 og 2500 ppm. Forskerne observerte moderat fall i ytelse for 6 av 10 mål for ytelse ved økning fra 600 til 1000 ppm og et sterkere fall for 7 av 9 mål ved 2500 ppm.

3.4. Diskusjon

Det er behov for mer kunnskap knyttet til integrering av ulike ventilasjonskonsepter og vinduslufting, eksempelvis atrium eller dobbeltfasader. Det finnes et bredt spekter av muligheter med hensyn til valg av vindustype, størrelse og plassering. Imidlertid er kunnskap om vinduers ytelse begrenset og basert på teoretiske forutsetninger om drivkrefter, effektiv åpningsareal og strømningsforhold i rom. Basert på kvalitative mål er noen vindustyper ansett som fordelaktige, men det gjenstår fortsatt mye forskning på forskjeller og begrensninger ved anvendelse av ulike vindustyper. Det kommer likevel frem at godt utførte, posisjonerte og integrerte vindusåpninger er avgjørende for tilfredsstillende ventilasjon. Dersom vinduene integreres på en god måte kan de også forbedre brukertilfredsheten ved å tilby brukerne større grad av personlig kontroll over termiske og atmosfæriske ventilasjonsforhold.

De ulike mixed mode løsningene for undervisningsbygg har mange fellestrekk, hvor smarte løsninger for utnyttelse av vind- og oppdriftskrefter står sentralt. I bygg med naturlig ventilasjon vil luftmengden ofte variere betydelig, noe som påvirker og stiller store krav til styring av ventilasjonen. Ved vinduslufting kan det være fare for potensielle trekkproblemer i oppholdssonen om vinteren. Høy temperatur, internlast (varme avgitt fra belysning, utstyr og personer) og solbelastning kan også være problematisk i varme perioder, hvor tilluftstemperatur er tilnærmet lik utetemperatur. For å unngå dette er det viktig med et godt utformet mixed mode system med gode kontrollsystemer som gjør bygningen i stand til å veksle mellom naturlig- og mekanisk ventilasjon ved behov. Et avansert kontrollsystem kan også være gunstig med tanke på redusert energiforbruk, og oppfyllelse av termiske og atmosfæriske krav til inneklimaet. Det er derfor viktig med flerfaglig kompetanse i planleggingsfasen som tar hensyn til bygningens bruk, samt vær- og solforhold, slik at systemet kan optimaliseres.

Teori- og forskningsdelen knyttet til termisk og atmosfærisk miljø bygger på internasjonal litteratur, men er også av relevans for norske forhold. Studien fokuserer på assosiasjoner mellom inneklima og helseeffekter. Data om norske forhold er svært sparsomme da det foreligger få studier knyttet til dårlig inneklima i Norge. Det er også mindre litteratur internasjonalt enn forventet, og mye av litteraturen er skrevet på 1980-tallet. Tatt i betraktning hvor mye inneklima i undervisningsbygg betyr for den enkeltes liv og velvære burde det vært nyere og mer oppdatert forskning knyttet til denne problematikken.

I løpet av de to siste tiårene refereres det ofte til at dårlige ventilasjonsforhold fører til annenrangs inneklima i klasserom (Daisey et al., 2003; Sundell et al., 2011). Likevel er det relativt få studier som har undersøkt effekten av dårlig innendørsluftkvalitet i klasserom knyttet til elevprestasjoner. Assosiasjoner mellom for høy eller lav temperatur og helse er velkjent og mye diskutert. Både for høy og for lav temperatur reduserer konsentrasjon og arbeidstakt (Wyon 1986; Wargocki & Wyon 2011). Det foreligger lite informasjon om påvirkning fra CO₂ i undervisningssammenheng. Fra forskning antas det at dårlig luftkvalitet resulterer i redusert frammøte og læringspotensial, og påfølgende dårlig elevprestasjoner. Eksperimentelle studier i laboratorium og feltstudier har vist at redusert ventilasjon og økt forurensning reduserer arbeidstakt og øker feilhandlinger (Mendell et al., 2003; Fisk et al., 2011). Nyere studier påpeker at CO₂ har direkte effekt på elevprestasjon, og at CO₂ ikke bare er en markør for luftkvalitet (Satish et al., 2012). Negative effekter på ytelse er ofte assosiert med symptomer som hodepine og konsentrasjonsevne (Ebbehøj et al., 2002).

I bygninger må nødvendig luftmengde ta hensyn til både komfort og helse. Brukerne av bygningene er ikke eneste kilder til forurensning av luften, da også utslipp fra bygningen og ventilasjonssystemet må tas i betraktning (Wargocki & Wyon 2011; Fisk, 2002). Studier har vist at selv om luftmengder imøtekommer eksisterende standarder kan det fremdeles være et betydelig antall mennesker som ikke finner omgivelsene akseptable, som i noen tilfeller kan medføre helseplager. Økt luftmengde vil også øke ytelsen til beboerne. Begrensning av forurensningskilder, bedre luftkvaliteten eller økt ventilasjonskapasitet kan føre til økt brukerytelse. Derfor er det en dårlig helsemessig investering å redusere energiforbruket ved å redusere luftmengder og dermed kvaliteten på innemiljøet. Det trengs mer dokumentasjon på at bedre luftkvalitet gir bedre elevprestasjoner. Med økt kunnskap knyttet til denne problematikken er det større mulighet for å forsvare eventuelle økninger i driftskostnader.

4. Redegjørelse for ventilasjonsløsningen ved Brunla ungdomsskole

I perioden 7. - 9. oktober 2013 ble Brunla ungdomsskole, som er rehabilitert med mixed mode ventilasjon, undersøkt ved befaring og måling av inneklima. Videre følger en beskrivelse av skolens ventilasjons- og oppvarmingssystem. Deretter vil kontrollstrategi, styringssystem, driftsformer og driftsstrategi forklares.

4.1. Brunla ungdomsskole

Brunla ungdomsskole var ferdigstilt i 1967 og består i dag av fire bygninger (Vedlegg 1). Opprinnelig var det to bygninger som inkluderte en klasseromsavdeling over to etasjer med læreravdeling, og en aktivitetsavdeling. I 2002 ble skolen utvidet med en svømmehall og i 2005 ble det påbygd resepsjon og medietek, som sammen med resten av skolebygget strekker seg over ett plan. Videre i oppgaven er det sett på hovedbygningen som består av to plan med fire tradisjonelle klasserom per etasje. Skolen huser omlag 250 elever, fordelt over tre klasser på tre trinn. Oppvarmet areal ved skolen ble kontrollmålt under befaring og satt til 5666 m². I dette arealet inngår alle avdelingene knyttet til skolen og et helsesenter som ligger vegg-i-vegg med skolen. Figur 19 viser hovedbygningen ved Brunla ungdomsskole.



Figur 19: Hovedbygningen ved Brunla ungdomsskole

4.1.1. Ventilasjon

Ved Brunla ungdomsskole ble det tidligere benyttet avtrekksventilasjon med manuell kjøring av vifter og manuell åpning av spjeld inn til hvert rom. I 2009 ble fasaden etterisolert med vindtett folie og 10 centimeter ekstra isolasjon, samt nye vinduer for naturlig ventilasjon. Etter rehabiliteringen ble det først benyttet et enkelt styringssystem hvor fire klasserom inngikk i en sone, og bare et vindu i hvert klasserom kunne åpnes. Det var ingen sammenkobling med avtrekksvifter og det ble kun målt temperatur og CO₂ i klasserommet sensoren var plassert. Avlesning ble foretatt ved hjelp av touch display plassert på lærerværelset.

I samarbeid med WindowMaster ble systemet oppgradert og startet opp i januar 2012. I dag benyttes mekanisk avtrekksventilasjon samkjørt med manøvrerbare vinduer. Av 6 vinduer i hvert klasserom styres 4 vinduer automatisk. Vinduene styres enkeltvis av vindusmotorer som registrerer vindusåpning og styres automatisk ved hjelp av integrerte kjedemotorer. Ventilasjonen styres etter ønsket luftkvalitet og temperatur, hvor kontroll av temperatur er tyngre vektlagt enn å holde CO₂ nivået lavt. Vinduene åpnes og lukkes på bakgrunn av brukernes fastsatte ønskeverdier for romtemperatur og CO₂-nivå, samt målinger fra en utendørs værstasjon. Værstasjonen er plassert på taket og registrerer utetemperatur, regn, vindhastighet og vindretning. Figur 20 viser de automatisk styrte vinduene og værstasjonen på taket av hovedbygningen.



Figur 20: Fra venstre: Automatisk styrt vindu som benyttes for vinduslufting og værstasjonen på taket

Innstilling av ønsket romtemperatur og CO₂-nivå skjer individuelt for den enkelte sone, og brukerne kan til enhver tid åpne og lukke vinduene ved hjelp av overstyringsknapper i klasserommene, dersom mer eller mindre frisk luft er ønskelig. Ved overstyring skifter

systemet tilbake til automatisk drift etter en fastsatt tidsperiode. Figur 21 viser overstyringsknappen og plassering av sensor i klasserom 101. I pauser og friminutt er det mulig å benytte seg av et forhåndsbestemt luftskifte. Inneklimaet i de ulike rommene blir logget og kan endres og optimaliseres ved hjelp av SD-anlegget som styrer ulike parametere.



Figur 21: Fra venstre: Overstyringsknapp og plassering av sensor i klasserom 101

I klasserommene ved Brunla er det montert to avtrekksventiler på motstående vegg til vinduene. Ventilene fører luften via avtrekk til en ventilasjonskanal med spjeld, plassert over himling i korridoren. I perioder hvor naturlige drivkrefter er utilstrekkelig eller i perioder med høy belastning, forbedres trykkforskjeller ved hjelp av to frekvensstyrte avtrekksvifter. Ventilasjonssystemet i skolebygget er delt på midten, med separat kanalføring og en vifte som trekker av på hver side av korridoren. Avtrekksviftene startes, og spjeldene for det aktuelle rommet åpnes, dersom SD-anlegget registrerer for høy temperatur eller dårlig luftkvalitet. En trykkmåler i kanalen regulerer VAV-spjeldene i hvert rom separat. Figur 22 viser vinduer og avtrekksventiler i klasserom 101.



Figur 22: Fra venstre: Vinduer og avtrekksventiler i klasserom 101

4.1.2. Oppvarming

Brunla ungdomsskole har et vannbårent oppvarmingssystem med lavtemperaturs radiatorer i klasserommene. Radiatorene har felles justering for hele bygget og styres enkeltvis av SD-anlegget for hvert rom. Temperaturen i klasserommene kan dermed reguleres på et overordnet nivå, selv om løsningen ikke gir mulighet for varmeregulering på romnivå. Skolen har et eget pelletsanlegg som ble startet opp i oktober 2008. I oppvarmingssesongen fra oktober til april benyttes en pelletskjel på 250 kW til oppvarming. Det er også installert to elkjeler på 225 kW hver, hvor den ene benyttes som topplast. Som nødløsning er det i tillegg installert en oljefyr på 300 kW.

4.1.3. Energiforbruk

Energiforbruk for Brunla ungdomsskole ble hentet inn ved befaring. Dessverre har Larvik kommune byttet både oppvarmingssystem og strømlleverandør flere ganger de siste årene, slik at statistikken over energi- og effektbehov for skolen ikke lenger eksisterer. Etter kontakt med netteier ble det gitt en oversikt over tall fra tidligere år (Vedlegg 2). Disse tallene gjelder for hele skolen, inkludert helsesenter. Dermed er det vanskelig å gi et representativt bilde av energi- og effektbehov ved hovedbygningen, da ulike bygninger benytter ulike ventilasjons- og oppvarmingsløsninger.

4.2. Kontrollstrategi og styringssystem

Gode kontrollstrategier og styringssystem er viktig for å regulere tilført luftmengde etter endringer i termisk komfort og luftkvalitet. Ved Brunla ungdomsskole benyttes et styringssystem for naturlig ventilasjon støttet av mekanisk avtrekksventilasjon, utviklet av WindowMaster A/S. Et sentralt driftskontrollanlegg (SD-anlegg) har den overordnede styringen av de tekniske anleggene i bygget. I SD-anlegget kan eksempelvis driftstider for ventilasjon og ønsket temperatur bestemmes, samt registrering av energiforbruk. Videre er en PC med programvare som kommuniserer mot automatikkutstyret plassert sentralt i bygget. Styresentralen styrer kommunikasjonen til og fra busser og videre til fasade, værstasjon og til eventuelle direkte tilkoblede sensorer (WindowMaster A/S).

Data om inn klima, værforhold, vindusposisjon og eventuelle feil i systemet blir logget og lagret i datasystemet. Dette datamaterialet kan dermed analyseres og sammenlignes for optimalisering av systemet og gjør bygningsansvarlig i stand til å endre parametere som tidspunkt eller annet i systemet. Endringene kan gjøres direkte på pc eller ved fjernadgang via

internett. Bygningen har videre en grafisk oppdeling av de ulike sonene. I hver sone styres vinduer og andre installasjoner på bakgrunn av opplysninger om sonens bruk, målinger av inne- og uteklimate, samt brukernes ønsker til den automatiske styringen. Temperatursensorene er en viktig del av systemet, og gjør det mulig å justere ønsket romtemperatur i et valgt intervall, for eksempel ± 3 °C. Værstasjonen leverer nødvendige klimadata til styring av den naturlige ventilasjonen. Ved denne type systemer bør det settes krav til driftsansvarlig om systemforståelse, daglig oppfølging og systematiske gjennomganger for optimal drift (WindowMaster A/S).

4.2.1. Driftsformer

Ventilasjonssystemet kan benytte åtte ulike driftsformer. Avhengig av årstid og soners bruksmønster kan driftsformene kombineres til ulike dagsprogrammer, som danner grunnlaget for ventilasjonsstrategier i de ulike sonene. Driftsformene er hentet fra *NV AdvanceTM Betjeningsveiledning* (WindowMaster A/S, 2004) og fremstilt i Tabell 6. De ulike driftsformene er detaljert fremstilt i Vedlegg 3 og de vanligste driftsformene vil forklares i det neste.

Tabell 6: Ulike driftsformer som kan benyttes (WindowMaster A/S, 2004)

Navn	Ventilasjonsmodus	Varme, driftsform
Frisk luft, standby	Frisk luft	Standby
Komfortventilasjon	Komfortventilasjon	Komfort
Kun håndbetjening	Manuell styring	Komfort
Lukket, komfort	Lukket	Komfort
Lukket, natt	Lukket	Natt
Lukket, standby	Lukket	Standby
Nattkjøling	Optimert nattkjøling	Natt
Pulsventilasjon	Pulsventilasjon	Komfort
Spalteventilasjon	Spalteventilasjon	Komfort

Manuell styring, håndbetjening: Vinduene styres manuelt av bruker, men sikkerhetsfunksjoner som regn, vind og lignende kan overstyre eller begrense eventuelle åpninger.

Pulsventilasjon: Pulsventilasjon benyttes ved vinterdrift for å sikre god luftkvalitet. Ved pulsventilasjon åpnes vinduene på faste tidspunkt, og hver pulsutluftning er en tidsbegrenset åpning som utfører et forutbestemt luftskifte. Vinduets åpningsgrad er bestemt av åpningstid, ønsket luftskifte, utendørstemperatur samt fasadens orientering i forhold til vindretning og

vindstyrke. I soner med CO₂ måling vil pulsutluftningen utføres såfremt CO₂-nivået overstiger en fastsatt grense.

Komfortventilasjon, temperaturstyrt drift: Komfortventilasjon forekommer om sommeren hvor kjøling er ønskelig. Under denne driftsformen vil vinduene kontinuerlig åpnes eller lukkes for å holde ønsket romtemperatur. I tilfeller hvor romtemperaturen er under settpunkt (og vinduene derfor holdt lukket) vil systemet kunne skifte til spalte- eller pulsventilasjon inntil romtemperaturen igjen overstiger settpunktet, og driftsformen skifter tilbake til komfortventilasjon. I soner med CO₂ måling vil en økning i CO₂-nivået (over en fastsatt grense) forskyve temperatursettpunktet og dermed føre til en åpning av vinduene for å oppnå ønsket luftkvalitet. I perioder med synkende utendørstemperaturer reduseres maksimalt tillatelig luftskifte under kjøling av sonen for å unngå trekk.

Friskluft: Friskluft gir sonen en utlufting på et eller flere forutbestemte tidspunkter. Luftskifte ved friskluft er konstant, men avsluttes først når den etterfølgende driftsformen settes i drift. Friskluft benyttes oftest tidlig om morgenen for å sikre et friskt innneklima til bygget tas i bruk.

Spalteventilasjon: Ved denne strategien vil vinduer kunne åpnes til en fastsatt åpningsgrad (spalte) for å skape grunnventilasjon. Spalteventilasjon kan benyttes i kombinasjon med komfortventilasjon eller som grunnventilasjon mellom pulsventilasjon.

4.2.2. Årstidtilpasset driftsstrategi og kalender

Det benyttes i hovedsak to ulike årstidtilpassede driftsstrategier, vinter- og sommerdrift. Vinterstrategien benyttes i oppvarmingssesongen hvor luft tilføres for å opprettholde tilfredsstillende luftkvalitet. Lave luftmengder kan føre til dårlig luftkvalitet, mens høye luftmengder kan gi økt energiforbruk. Det er derfor nødvendig å kontrollere luftmengder for å optimere mellom disse kravene. Sommerstrategien benyttes i kjølesesongen der luft tilføres for å opprettholde akseptabel termisk komfort. I dette tilfellet er optimalisering av energiforbruk av mindre betydning grunnet høyere utetemperatur, og brukerne kan i større grad kontrollere systemet. Det bør også finnes en kontrollstrategi for intervallet mellom vinter og sommer hvor det oppstår oppvarmings- og kjølebehov på en og samme dag (WindowMaster A/S, 2004).

Dataprogrammet har en kalender som angir sommer- eller vinterdrift. Ved sommerdrift benytter systemet sommerdagsprogrammer og i vinterdrift benyttes vinterdagsprogrammer. Som standard skjer skiftet fra vinter- til sommerdrift når utendørs middeltemperatur, midlet over 3 - 4 timer, i en periode på over 2 timer overstiger 10 °C. Skiftet fra sommer- til vinterdrift skjer når middeltemperaturen er under 10 °C. Ved høye romtemperaturer kan den enkelte sone gå midlertidig i sommerdrift inntil romtemperaturen igjen er på normalt nivå. Brukerne og operatør har også mulighet til å tvinge en sone i sommer- eller vinterdrift ved hjelp av betjeningsknapper. Dataprogrammet muliggjør innstilling av hvilke dagsprogrammer som skal benyttes, samt bruk av dagsprogrammet i hver sone. Videre er det mulig å stille inn ferie- og helligdager, slik at det benyttes egne dagsprogrammer når bygget ikke er i bruk (WindowMaster A/S, 2004).

4.2.3. Vinduslufting

Ved vinduslufting benyttes topphengte vinduer med glidningshengsling hjulpet av integrerte kjedemotorer. Automatisk styring av vinduene skjer gjennom sensorer som registrerer interne og eksterne faktorer. Styring av vinduene skjer i samspill mellom innendørs målinger og en utendørs værstasjon. I hvert rom er det en sensor som registrerer temperatur, CO₂-konsentrasjon og luftfuktighet. Værstasjonen omfatter sensorer for vindhastighet og vindretning, samt temperatur og nedbør. De ulike sonene styres på bakgrunn av C_p-verdier for 16 ulike vindretninger som er bestemt ut fra CFD-beregninger, vindretning og vindhastighet (WindowMaster A/S). Kontrollstrategien styrer temperatur, luftkvalitet og luftmengder innenfor et fastsatt område. Det benyttes hovedsakelig automatiske styringssystem med mulighet for manuell overstyring. Ved automatisk styring vil vinduer styres på grunnlag av målte verdier fra interne og eksterne sensorer. Signaler fra sensorene bestemmer når vinduene bør åpnes eller lukkes, samt størrelsen på åpningen. SD-anlegget står for den overordnede styringen av systemet. Denne styringen er automatisk, men brukerne kan til enhver tid åpne og lukke vinduer ved en overstyringsbryter, dersom det ønskes mer eller mindre frisk luft. Ved manuell styring er det brukerne som regulerer vinduer etter egne preferanser, og systemet skifter tilbake til automatisk drift etter en fastsatt tidsperiode. I programmet finnes også egne grenser for lukking av vinduer ved høye vindhastigheter, ugunstig vindretning og nedbør. Åpningsgrenser for vinduer kan enten settes som absolutt åpningsgrad eller maksimal åpningsgrad basert på luftskiftebegrensninger (WindowMaster A/S, 2004).

4.2.4. Soneinnstillinger

Bygningen deles inn i ulike soner som styres etter fastsatte parametere, hvor innstilling av ønsket romtemperatur og CO₂-nivå kan reguleres individuelt for hver sone. For hver sone er det mulig å angi et individuelt dagsprogram eller sette parametere for flere eller alle sonene samtidig. På denne måten er det mulig å betjene vinduer manuelt, endre åpningsgraden på vinduene, endre fra sommer- eller vinterdrift, eller endre settpunkt for sonens temperatur. Settpunkter knyttet til oppvarming er aktive når sonen er i vinterdrift, mens settpunkter knyttet til kjøling er aktive når sonen er i sommerdrift. Til hver driftsperiode er det knyttet tre settpunkter, som gir mulighet for ulike settpunkter gjennom døgnet. Dette er nyttig for systemer med varmestyring, hvor et lavere settpunkt ønskes etter endt brukstid. I systemer med varmestyring skjer skiftet fra oppvarming til kjøling når den aktuelle sonetemperaturen er over settpunktet for oppvarming og betyr at systemet skal arbeide for å kjøle sonen. Skiftet fra kjøling til oppvarming er vice versa (WindowMaster A/S, 2004).

5. Metode for målinger

Dette kapittelet inneholder en redegjørelse for planlegging og gjennomføring av inneklimate målinger ved Brunla ungdomsskole. Videre er måleutstyr og plassering av måleutstyr beskrevet. Resultater fra målingene er presentert og diskutert i kapittel 6.

5.1. Planlegging og utføring av målinger

Tidlig i semesteret startet planlegging av befaring og målinger ved Brunla ungdomsskole. Det gikk mye tid til planlegging av målemetoder og måleprinsipper, samt skaffe og lage måleutstyr som skulle benyttes. Det var også tidskrevende å etablere samtaler med vaktmester og rektor for avtale av tidspunkt for målinger. I tillegg ble risikovurderingen av feltarbeidet, i henhold til instituttets prosedyrer, levert og godkjent (Vedlegg 4).

Den første dagen i Larvik bestod av samtaler med rektor og lærere, samt befaring med vaktmester. Som nevnt er klasserommene fordelt over to etasjer i bygning C, og denne bygningen er derfor hovedfokus for målinger utført. I bygningen er det åtte klasserom fordelt over to etasjer med lik størrelse og form, samt tilnærmet lik brukertetthet og bruksmønster. Alle klasserommene er orientert mot øst, med samme antall vinduer og ventilasjonssystem. Det eneste som skiller etasjene er at klasserommene i andre etasje benytter markiser for å hindre solinnstråling.

Ved befaringen ble informasjon om bygningskonstruksjon, soneinndeling, ventilasjonsanlegg og bruk samlet inn. Fra tidligere planlegging og i samtale med vaktmester ble både sted for målingene og plassering av målepunkter bestemt. Etter endt skoledag 7. oktober ble måleutstyr plassert i et av klasserommene, og i avtrekkskanalen i korridoren. Dette ble gjort i samarbeid med vaktmester. Videre følger beskrivelse av klasserommet benyttet for målinger, måleutstyr og plassering av måleutstyr.

5.1.1. Klasserom 101

Etter befaring og samtaler med lærerne ble det bestemt at klasserom 101, for 10.klasse, skulle benyttes for målinger. Klasserommet ligger i første etasje og har ett tilstøtende klasserom. Rommet har yttervegg mot øst med 6 vinduer, hvorav 4 vinduer har integrerte kjedemotorer for automatisk styring. Tabell 7 gir en oversikt over romforhold i klasserom 101 og timeplan for tirsdag 8. oktober.

Tabell 7: Fra venstre: Romforhold i klasserom 101 og timeplan tirsdag 8. oktober.

Brunla	Rom 1	Timeplan	
Bredde [m]	7,5	08.30 - 09.15	1.time
Lengde [m]	7,9	09.15 - 09.20	5 min pause
Areal [m ²]	59	09.20 - 10.05	2.time
Høyde [m]	3,1	10.05 - 10.35	Langpause
Volum [m ³]	183	10.35 - 11.20	3.time
Vinduer	6	11.20 - 11.25	5 min pause
Areal vindu [m ²]		11.25 - 12.05	4.time
Lite vindu	0,46	12.05 - 12.35	Langpause
Stort vindu	1,54	12.35 - 13.20	5.time
Totalt	2	13.20 - 13.25	5 min pause
Lufteluker	4	13.25 - 14.05	6.time
Dører	1		
Elever	23		
Solavskjerming	tunge, mørke gardiner		

5.1.2. Sensorer i klasserom og værstasjon

I hvert klasserom er det plassert en sensor som registrerer temperatur, CO₂ og relativ fuktighet (Vedlegg 5). Sensoren benyttet har et avvik på ± 20 prosent og en tidsforsinkelse på 15 minutter. I klasserom 101 er sensoren plassert på motstående vegg til vinduene, omtrent 2,2 meter over gulv og 0,8 meter fra tak. Avstand fra sensor til avtrekksventil ble målt til 75 centimeter. Det var planlagt å utføre målinger av temperatur, vindhastighet og vindretning ved værstasjonen for kontrollsjekk av utendørssensorene. Dette viste seg imidlertid vanskelig da det var forbudt å gå på taket. Det ble i stedet hentet ut informasjon om værdata fra dataloggeren ved skolen, uten kontrollsjekk av målingene.

5.1.3. Beskrivelse av målinger

Målingene ble utført over to dager, 8. og 9. oktober. I samtaler med lærerne ble tillatelse gitt til å komme inn under undervisning for å sjekke utstyr og gjøre eventuelle ekstramålinger. Antall elever til stede i klasserommet, aktivitetsnivå og bekleddning ble notert. Antall elever i klasserommet varierte avhengig av timeplan. Under målingene var det en lærer og 23 elever til stede på starten av dagen, og 12 elever de siste to timene.

Klokka 10.05 til 10.35 og 12.05 til 12.35 var det pauser hvor styring var lagt inn etter friskluft i styringssystemet. Elevene hadde lov å være inne i pausene og mange benyttet seg av dette tilbudet. Døren til klasserommet ble åpnet og lukket mange ganger og stod delvis helt åpen. Døren ut til skolegården stod også åpen og kan ha påvirket ventilasjonsbildet ved å skape større luftskifte ved gjennomtrekk.

Før målingene hadde systemet skiftet til vinterdrift etter en periode med lave utetemperaturer. Da målingene ble utført var det noen dager med middeltemperatur som oversteg 10 °C og systemet skiftet derfor mellom vinter- og sommerdrift.

Det ble også hentet ut informasjon fra dataloggeren ved skolen for informasjon og sammenligning. Fra dataprogrammet viser værdata at utemperaturen varierte mellom 12 og 16 °C. Vindretningen var lik hele dagen, orientert mot vest, med vindhastighet mellom 4 – 5 m/s (Vedlegg 6). I ettertid var det ønskelig å hente ytterligere informasjon ved å koble seg opp mot datalogger, men dette har ikke lyktes. Vaktmester og systemansvarlig har imidlertid vært behjelpelig med å sende informasjonen etter endt befaring.

5.2. Beskrivelse av måleutstyr og plassering

For å undersøke inneklima ved Brunla ungdomsskole ble temperatur, CO₂-konsentrasjon, lufthastighet, luftmengde og vindusåpning undersøkt. I dette kapittelet gis en oversikt over måleutstyr benyttet og plassering av måleutstyr. En oversikt over oppsett av måleutstyr er lagt i Vedlegg 7.

5.2.1. CO₂-konsentrasjon

Ved logging av CO₂-konsentrasjon ble to håndholdte målere av typen KIMO AQ 200 benyttet. De ble innstilt til å måle hvert minutt over en fastsatt periode. Ifølge Arbeidstilsynet (2013) skal CO₂ målinger gjennomføres når ventilasjonen fungerer som normalt og ved maksimal brukerbelastning av rommet som undersøkes. Dersom antall personer i rommet varierer i løpet av dagen, bør målinger utføres i slutten av perioder med stor personbelastning. Målepunkter bør ikke ligge i nærheten av tilluftsventiler eller vindu, da luftfornyelsen på disse stedene er best. Målepunkter bør heller ikke ligge for nært gulvet fordi utåndingsluften stiger opp i rommet. Generelt bør det tilstrebes å måle i oppholdssonen til personene som oppholder seg i rommet (ibid.). På bakgrunn av dette ble en logger plassert like ved avtrekk og den andre i elevenes oppholdssone, ved kateteret, omtrent 1,1 meter over gulvet. Data fra loggingen ble hentet ut ved hjelp av USB-kabel og dataprogrammet Datalogger 10. Figur 23 viser loggeren KIMO AQ 200 og plassering av måleutstyr ved avtrekksventil.



Figur 23: Fra venstre: KIMO AQ 200 og plassering av måleutstyr ved avtrekksventil

5.2.1. Temperatur

Ved temperaturlogging ble 13 Thermochron iButton dataloggere benyttet og innstilt til å logge hvert andre minutt. Byggforsk byggdetaljer (1999) anbefaler at lufttemperaturen måles midt i rommet, ved en persons arbeidsplass og på steder i oppholdssonen med høyest eller lavest temperatur. I rom hvor personer utfører arbeid sittende måles temperaturer i høyde 0,1 m, 0,6 m og 1,1 m over gulvet, som tilsvarer henholdsvis ankelhøyde, personens tyngdepunkt og hodehøyde. Det er viktig å unngå at måleutstyret blir utsatt for stråling fra nærliggende varmekilder, da dette kan gi unøyaktige og forhøyede måleverdier (ibid.).

For å undersøke temperaturen i oppholdssonen ble åtte loggere plassert langs to stolper i klasserommet med tilstrekkelig avstand til varmekilder. Elever i ungdomsskolen er nysgjerrige. Solide stolper fra gulv til tak ble derfor satt opp. Loggerne på stolpen ble festet godt og hengt opp i høydene 0,1, 1,1, 2,0, og 2,8 meter over gulv, med avstand 2,5 meter fra hverandre, vindu og avtrekk. To loggere ble videre satt opp ved avtrekksventil og tre loggere ved vindu for å se temperaturvariasjonen i lufta som fjernes fra rommet og ved tilluft. Figur 24 viser plassering av temperaturloggere ved avtrekk, vindu og stolper.



Figur 24: Fra venstre: Plassering av temperaturloggere ved avtrekk, vindu og i klasserommet

5.2.2. Vindusåpning

For å måle vindusåpningen ved skolen ble ulike fremgangsmetoder og måleutstyr vurdert. Etter å ha prøvd ulike metoder og plasseringer ble utstyret i Figur 25 benyttet. Et skyvepotensiometer med variabel motstand er festet i vinduskarmen og følger vindusåpningen. Ved hjelp av en spenningsdeler blir spenningssignalet sendt til en Mitek datalogger og lagret. Spenningssignalet blir deretter overført til Excel ved en USB kabel og behandlet for å gi vindusåpningen i centimeter.



Figur 25: Måling av vindusåpning ved hjelp av Mitek måler

5.2.3. Luftmengde

Luftmengden i klasserommet ble målt ved hjelp av en måletrakt, TSI Accubalance Air Capture Hood 8375, som vist i Figur 26. Spjeldene i klasserommet ble satt i full åpning og viften på maks. Deretter ble måletrakten satt over avtrekksventilen inntil verdien holdt seg om lag stabilt og luftmengden notert. Dette ble gjentatt noen ganger for å sikre gjennomsnitt-verdien i avtrekksventilen.



Figur 26: TSI Accubalance Air Capture Hood 8375

5.2.4. Lufthastighet

Luftbevegelsesmønster og lufthastighet på kritiske steder kan måles ved røykampunguller og ved ulike typer lufthastighetsmålere. Ved lufthastighetsmålinger i klasserommet ble tre håndholdte målere av typen VelociCalc TSI 9555 benyttet. To av måleinstrumentene ble benyttet til momentanmålinger. Den tredje måleren ble benyttet til logging av lufthastighet i avtrekkskanalen. Røykampunguller ved målinger ble ikke brukt, noe som kunne gitt et bedre bilde av luftbevegelsen i rommet.

Å benytte vinduer som tilluftsorgan kan føre til variabel luftstrømning og lufthastighet. Som nevnt er det hovedsakelig naken hud som er følsom for trekk. Lufthastighetens momentanverdi ble målt i 14 ulike punkter i klasserommet ved 1,1 og 2,5 meter over gulvet. Målinger ved 1,1 meter ble utført for å se lufthastigheter i elevenes oppholdssone, og målinger ved 2,5 meter for å se lufthastigheter i høyden hvor luften tilføres. Målingene i hvert punkt ble utført over ett minutt, med elever til stede (vanlig driftsmodus) og uten elever (vinduer i maks åpning). Videre ble en lufthastighetsmåler plassert i avtrekkskanalen for å måle lufthastigheten i avtrekk. Denne målingen ble utført for å få en oversikt over når avtrekkssystemet slår inn og hvor mye luft som trekkes av. Ved vinduslufting er det fare for å skape store luftbevegelser som kan gi trekk i oppholdssonen. For å avgjøre om luftstrømninger i et rom oppleves som trekk er det nødvendig å vite lufthastighet og turbulensintensitet. Figur 27 viser utstyret benyttet for måling av lufthastighetens momentanverdier og måling i avtrekkskanal.



Figur 27: Måling av lufthastighet i klasserom og avtrekkskanal

5.2.5. Unøyaktighet ved målinger

Unøyaktighet for hvert av måleinstrumentene er registrert fra datablad og kalibreringsbevis, fremstilt i Tabell 8.

Tabell 8: Kalibrering og unøyaktighet knyttet til måleinstrumenter

Måleutstyr	Kalibrering og instrumentets unøyaktighet
KIMO AQ 200	CO ₂ - og lufttemperatursensoren skal sendes inn til kalibrering cirka en gang i året for å sikre at avviket til resultatene er innenfor en bestemt grense. Usikkerhet til CO ₂ -måler i området 0 til 5000 ppm er +/- 50 ppm eller 3 % av målt verdi. For temperaturmåler i området -20 til 80 °C er usikkerheten +/- 0,25 °C eller 3 % av målt verdi.
Thermochron iButton	Før måling ble ikke temperaturmålerne kalibrert, men under frakt lå de samlet i en pose under samme klimatiske forhold, og hadde en tilnærmet lik temperaturvariasjon. Usikkerhet ved måling er $\pm 0,5$ °C fra -10 °C til 65 °C.
TSI Accubalance Air Capture Hood 8375	Usikkerhet ved måling er ± 3 % av målt verdi
VelociCalc TSI 9555	Usikkerheten ved måling for er $\pm 1,5$ % ved 10 m/s

Det vil som regel oppstå en eller flere målefeil i løpet av en måling, og disse må tas hensyn til ved evaluering av resultatet. Ifølge Hanssen (2007) kan målefeil deles inn i tre hovedtyper forklart i Tabell 9.

Tabell 9: Målefeil

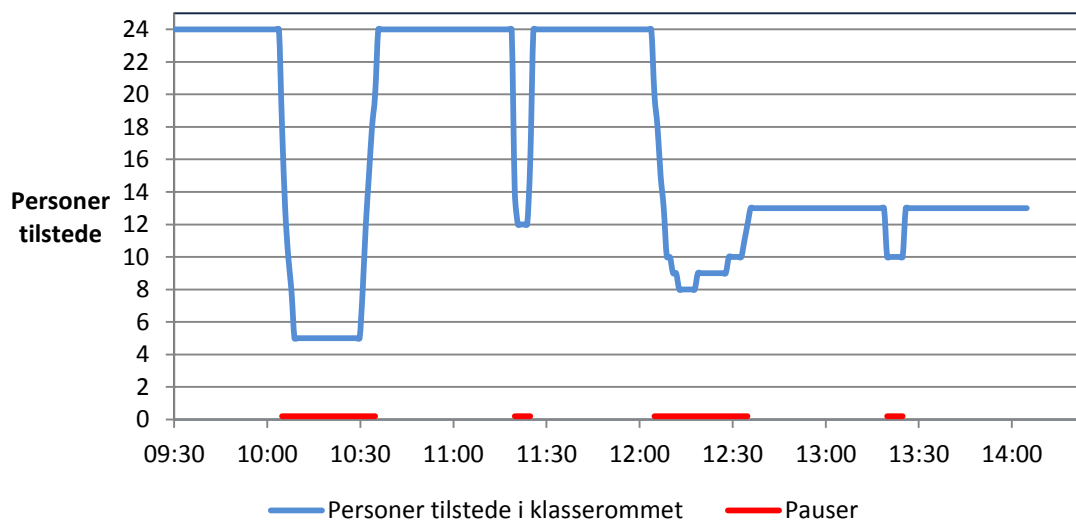
Grove feil, U_G	Typiske avlesningsfeil, eksempelvis ombytting av tall eller feilplassering av komma. Feil skyldes ofte manglende oppmerksomhet.
Systematiske feil, U_S	Dette er feil på instrumentene eller ukorrekt utføring av målingene. Feilene skyldes ofte både måleinstrument og operatør. Det skilles mellom instrumentfeil og metodefeil når systematiske feil kartlegges.
Tilfeldige feil, U_T	Dette kan være feil som påvirker måleresultatene ulikt. Slike feil kan ikke elimineres, bare reduseres.

6. Resultater og diskusjon fra målinger

Resultatene fra målingene utført 8. oktober i tidsrommet 09.30 til 14.00 legges frem og diskuteres i dette kapittelet. I gjennomføringen ble ulike inneklimaparametere og vindusåpning målt for å få en indikasjon på termisk komfort og luftkvalitet ved vinduslufting. For å se sammenheng mellom ulike inneklimaparametere er det satt sammen grafiske fremstillinger av temperatur, CO₂-konsentrasjon, vindusåpning, lufthastighet, luftmengde og spjeldåpning. Resultatene er hentet fra loggeutstyret og sammenlignet med målinger hentet fra SD-anlegget ved skolen.

6.1. Tilstedeværelse, bekledning og aktivitetsnivå

Antall elever og lærere i klasserommet ble registrert og er gjengitt i Figur 28. Figuren gir en oversikt over skoledagens forløp, med pauser markert i rødt. I pausene varierte antall elever i klasserommet betraktelig og tall for personer til stede er dermed ikke eksakte. Målingene ble utført i timer med rolig arbeid og typisk innendørs bekledning.



Figur 28: Personer til stede i klasserom under målinger

6.2. Temperatur og CO₂-sensor

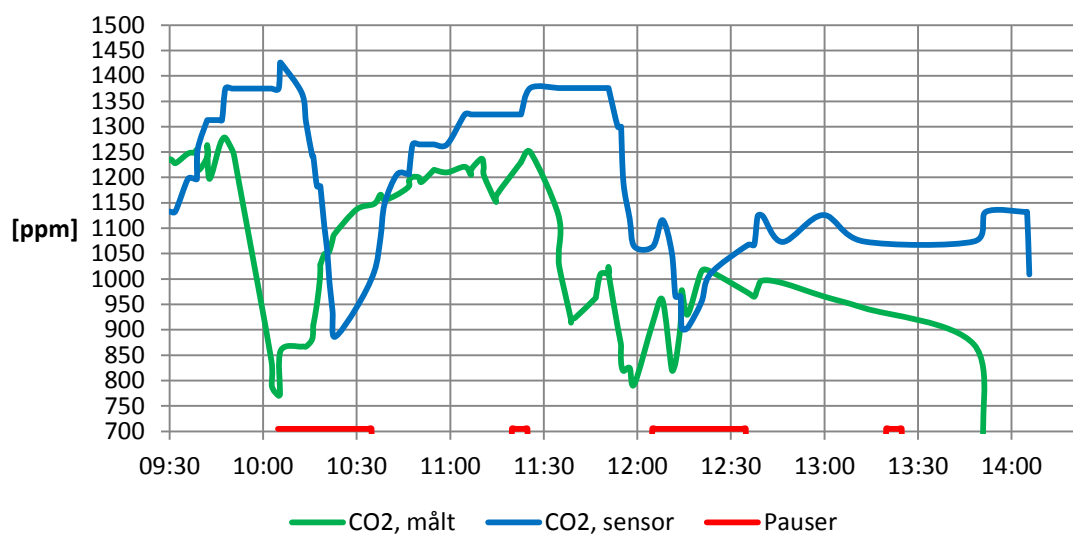
Ved Brunla ungdomsskole benyttes omrøringsventilasjon og sensorer for temperatur og CO₂-konsentrasjon i hvert klasserom. Sensorene registrerer temperatur og luftkvalitet på romnivå, som benyttes for automatisk styring av vindu og avtrekk. Ved bruk av dette systemet skal vindusåpning og avtrekksluftmengde kontinuerlig tilpasses termisk- og atmosfærisk forhold i rommet. En grundigere gjennomgang av ulike sensortyper og ventilasjonsprinsipper er gjennomgått i prosjektoppgaven (Algrøy, 2013).

Plassering av sensor bør være slik at utgangssignalene gir et representativt bilde av luftforhold i oppholdssonen, da sensorer nær forurensningskilder, ved vinduer og radiatorer eller i direkte sollys kan påvirke signalene og gi et feilaktig bilde av inn klimaet. Ved omrøringsventilasjon kan sensorer plasseres fritt ettersom forurensningskonsentrasjonen er jevnt fordelt i rommet. Likevel vil sensorplasseringen være av betydning da det kan oppstå konsentrasjonsgradienter og dødsoner (Byggforsk Byggedetaljer, 2005). I følge Sørensen et al. (2004) bør sensoren plasseres i oppholdssonen 1,5 m over gulvet, slik at romluften fritt kan strømme forbi den. Denne løsningen er imidlertid lite brukervennlig da sensorene vil være forstyrrende dersom elever i nærheten påvirker signalene. Sensorene monteres derfor i praksis på vegg.

I klasserom 101 er sensoren plassert over elevenes sitte- og pustehøyde, altså omlag 1,1 meter. Sensoren er montert på motstående vegg fra vinduene omlag 2,2 meter over gulv og 0,75 meter fra avtrekk. Det er vanskelig å si om dette er en god plassering grunnet ulike parametere, eksempelvis varierer luftstrømningen med CO₂- og temperaturfordeling, påvirkes av vindusåpning, elever til stede og om døren til klasserommet er åpen eller lukket. Det kan antas at åpning av vindu og avtrekkssystemet vil operere etter gjennomsnittlig CO₂-konsentrasjon i rommet og ved noe høyere temperaturer enn opplevd for sittende elever. Sensoren benyttet har som nevnt en tidsforsinkelse på omlag 15 minutter og et avvik på ± 20 prosent. Fordelen med temperatur og CO₂ sensorer er at det er relativt enkelt å måle CO₂ og temperatur. CO₂ sensoren gir en indikasjon på luftkvalitet og forurensning fra personer, mens termistormåleren indikerer termisk komfort. Ulemper med å benytte en CO₂ sensor er at den kan være ustabil og trenger hyppig kalibrering (Dokka & Vik, 2001).

6.3. CO₂-konsentrasjon og temperatur

Den grønne linjen i Figur 29 viser målt CO₂-konsentrasjon ved avtrekk i klasserom 101. Den blå linjen viser resultater fra sensoren, og er hentet fra SD-anlegget ved skolen.



Figur 29: CO₂-konsentrasjon målt ved avtrekk og CO₂-konsentrasjon fra sensor

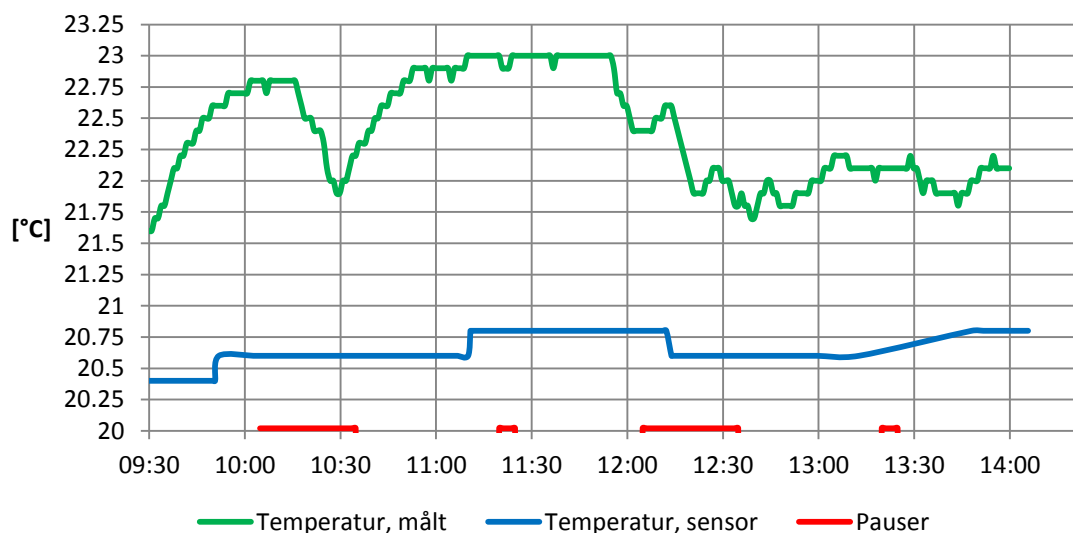
CO₂-konsentrasjon som indikator på luftkvalitet i bygninger avhenger av brukerbelastning og oppholdstid i rommet. For klasserommet undersøkt var det et tydelig skille mellom CO₂-konsentrasjon ved undervisning og i langpausene. I styringssystemet var friskluft benyttet i pausene og gav dermed rommet utlufting på forutbestemte tidspunkter. CO₂-nivå målt ved avtrekk varierte mellom 1300 ppm og 750 ppm, avhengig av antall elever som oppholdt seg i rommet. Verdier hentet fra sensoren viste variasjon i CO₂-nivå mellom 1425 ppm og 875 ppm. «CO₂-toppene» i klasserommet oppstod ikke over lengre tid, og sank betraktelig ved langpauser hvor friskluft ble benyttet.

Figur 29 viser at CO₂-konsentrasjonen sank betraktelig før langpausen markert i rødt. Dette skyldes at elevene forlot rommet før friskluftstyringen ble igangsatt. Videre slo også styring etter friskluft inn som bidro til redusert CO₂-nivå. Døren til klasserommet ble åpnet og lukket mange ganger, og tidvis stod den helt åpen. Videre stod også døren ut til skolegården åpen, noe som trolig påvirket ventilasjonsbildet ved gjennomtrekk. Det oppstod en ny stigning i CO₂-nivået mot slutten av pausen når elevene kom tilbake til klasserommet og CO₂-nivået steg opp mot 1200 ppm. Ved undervisning steg CO₂-nivået gradvis videre til 1400 ppm og holdt seg rundt dette nivået frem til neste langpause. CO₂-konsentrasjonen i oppholdssonen varierte noe mer og steg opp mot 1375 ppm. Mot slutten av dagen oppholdt mange av elevene

seg inne i den siste langpausen, fra 12.05 til 12.35. CO₂-konsentrasjonen hadde derfor ikke en like stor nedgang i denne pausen, men mønsteret fra forrige pause gjentok seg ved redusert CO₂-nivå. I de to siste timene var det færre elever til stede i klasserommet og CO₂-nivået var noe mer stabilt rundt 950-1000 ppm ved avtrekk. Årsaken til den bratte nedgangen i CO₂-nivå på slutten av dagen skyldes at elevene byttet klasserom og vinduene ble åpnet til maksimal åpning av driftsansvarlig.

I forhold til folkehelseinstituttets anbefalte norm på maksimum 1000 ppm, overstiges denne verdien store deler av dagen med full brukerbeklastning. Ved lavere brukerbeklastning er imidlertid CO₂-nivået innenfor anbefalt grense. Det tidvis høye konsentrasjonsnivået i rommet kan tyde på lave luftmengder da høyt CO₂-nivå som regel skyldes mangelfull ventilasjon i forhold til antall personer i lokalet. Målingene er utført i oktober og kan dermed verken tilskrives sommer- eller vinterdrift. Det er vinterdrift som utgjør «verste scenario» for CO₂-nivået ved vinduslufting, da det er fare for at vinduene ikke vil åpnes grunnet lave utetemperaturer. Dersom vinduene for tilluft ikke åpnes er det grunn til å tro at det kan oppstå enda høyere CO₂-konsentrasjoner i vinterperioden. Dette kan medføre dårlig luftkvalitet da det ikke vil tilføres tilstrekkelige luftmengder. Det er utført for få målinger til å konkludere om luftkvaliteten er tilstrekkelig på årsbasis.

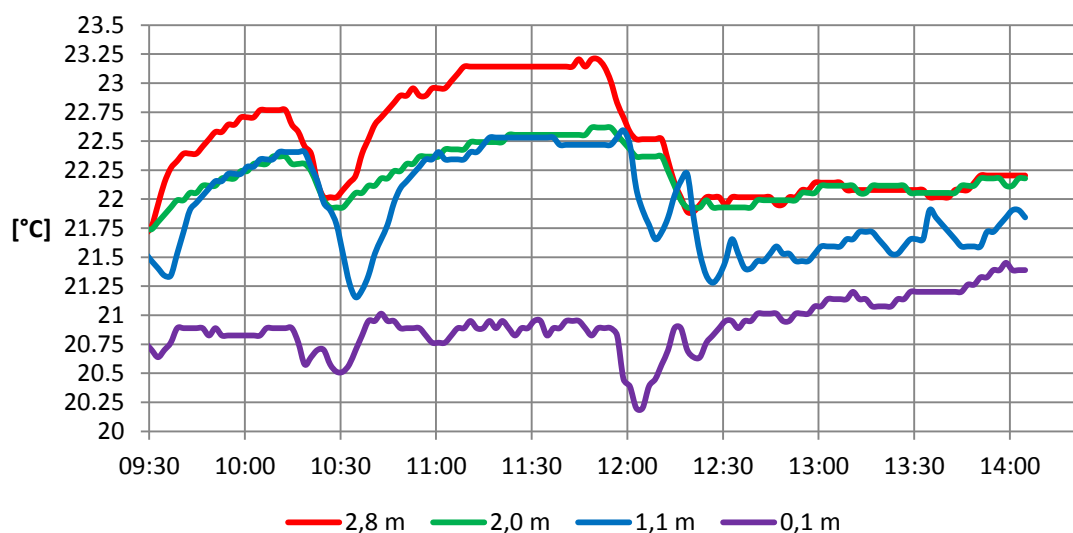
Ved sammenligning av målt temperatur og temperatur hentet fra sensor kom sensorens avvik tydeligere frem. I perioden fra 10.15 til 10.30 sank temperaturen i klasserommet fra 22,8 °C til 21,8 °C. Denne variasjonen ligger innenfor 20 prosent avvik, og gav ikke utslag på sensoren. Et avvik på 1 °C burde imidlertid gi utslag og en kan derfor stille spørsmål om det ville vært mer gunstig med en sensor med mindre avvik. Sensorer som styrer ventilasjonen er ikke nødvendigvis korrekte, men i dette tilfellet stemmer målingene overens med sensoren, temperaturavvik tatt i betraktning. Plassering og kalibrering av sensorer er viktig for optimal utnyttelse av systemet, samt et lite avvik som viser tydelige trender i temperaturvariasjon og styrer ventilasjonen deretter. Den grønne linjen i Figur 30 viser temperaturvariasjon ved avtrekk i klasserom 101. Den blå linjen viser resultater fra sensoren, hentet fra SD-anlegget ved skolen.



Figur 30: Temperatur målt ved avtrekk og temperatur fra sensor

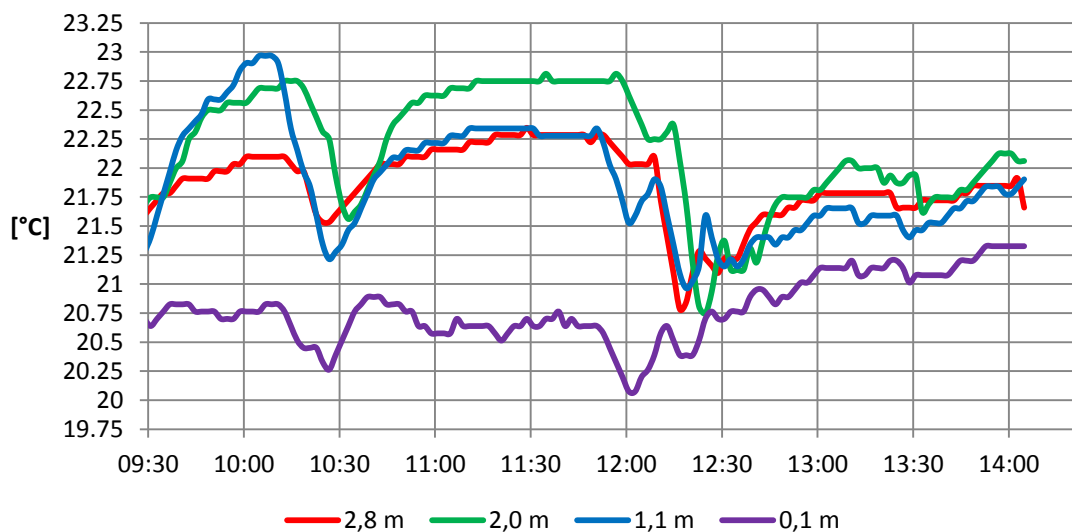
6.4. Temperatur i oppholdssone

Figur 31 viser målt temperaturvariasjon i oppholdssonen ved stolpen plassert nærmest avtrekk. Temperaturvariasjonen ble målt i høydene 0,1, 1,1, 2,0 og 2,8 meter over gulv. Temperaturen målt ved 2,8 meter korrelerer med temperaturen målt ved avtrekk, som vist i Figur 30. Temperaturen registrert i sensoren er imidlertid svært lik temperaturen målt ved 0,1 meter, som bekrefter sensorens avvik.



Figur 31: Temperaturvariasjon ved stolpe 1

Figur 32 viser målt temperaturvariasjon i oppholdssonen ved stolpen plassert nærmest vindusåpningen. Temperaturvariasjonen ble målt i samme høyder som for Figur 31.

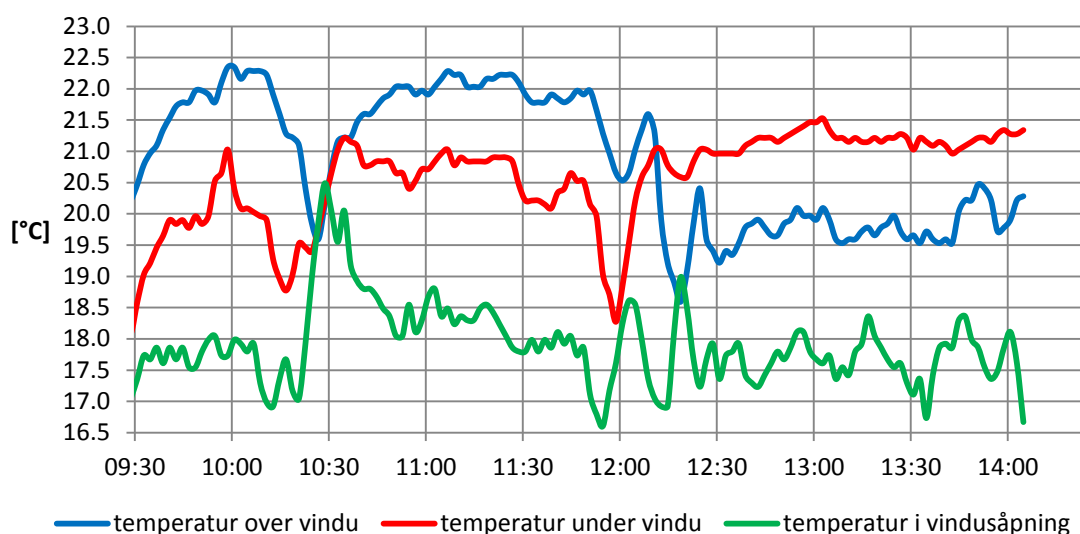


Figur 32: Temperaturvariasjon ved stolpe 2

Temperaturer i oppholdssonen varierer mellom 20 og 23 °C i høydene 0,1 til 2,8 meter. Kravet for maksimal temperatur ved vinterforhold er dermed oppfylt da de ikke overstiger 24 °C. Dette er øvre anbefalte grense for innneklima kategori 2, den nedre er 20 °C. Ved stolpen plassert ved avtrekk viser temperaturmålingene at temperaturen er høyest ved 2,8 meter. Imidlertid er temperaturen ved 2,0 meter og 1,1 meter høyere enn temperaturen ved 2,8 meter ved stolpen nærmest vindusåpningen. Det er ikke utført noen målinger av luftbevegelsen i rommet ved tilluft gjennom vinduer, men det er grunn til å tro at denne temperaturvariasjonen skyldes at kald tilluft tilføres gjennom vinduer plassert høyt på veggen.

Fra temperaturmålinger utført ved vinduet var det stor forskjell mellom loggerne som hang over og under vindu og loggeren som hang i selve vindusåpningen. Loggeren i vindusåpningen viste en lavere temperatur i forhold til oppholdssonen, og varierte mellom 16,5 °C og 20,5 °C. Denne temperaturmålingen påvirkes av åpningsspalte på vinduet og varm luft som stiger og blander seg med kjølig tilluft. Hadde målingene vært utført i de kaldeste månedene ville temperaturen på tilluften vært betraktelig lavere og dermed hatt større innvirkning på ventilasjonsbildet. Vindusåpning og åpningsperiode under vinterdrift er begrenset av blant annet utetemperatur som skal sørge for at tilluften ikke blir for kald og unngå trekk i oppholdssonen. Om sommeren vil temperaturen være høyere med mulighet for overoppheting. Som nevnt er personer mer mottakelig for overtemperaturer som tilføres med

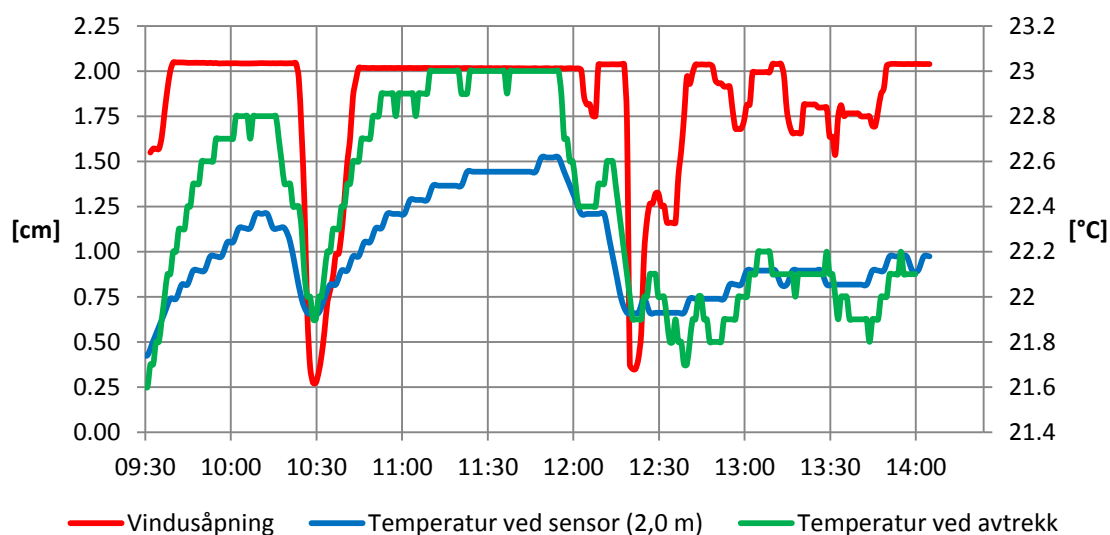
høy hastighet, men i vindstille perioder vil ikke vinduslufting ha noen effekt dersom innetemperaturen tilsvarer utetemperaturen. Figur 33 viser temperaturvariasjon ved sensorer plassert over, under og i selve vindusåpning.



Figur 33: Temperaturvariasjon ved vindu

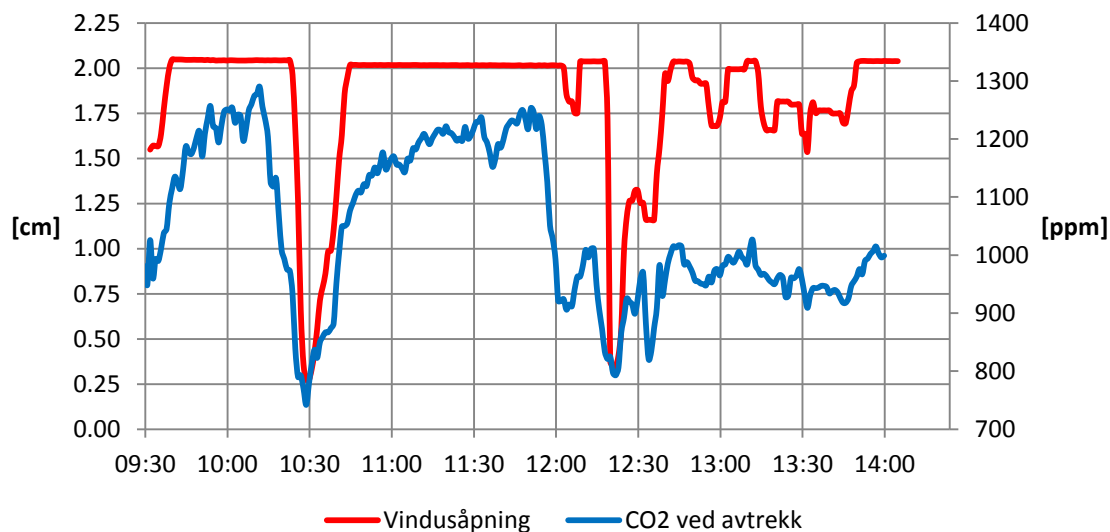
6.5. Vindusåpning

Det er videre utført en sammenligning av variasjon i vindusåpning, temperatur og CO₂-konsentrasjon. Figur 34 viser målt variasjon i vindusåpning og temperatur ved avtrekk og sensor.



Figur 34: Vindusåpning og temperaturvariasjon

Figur 35 viser variasjon i vindusåpning, og CO₂-nivå ved avtrekk. Ettersom det kun var to CO₂-loggere tilgjengelig, er ikke CO₂-nivået ved sensor registrert i samme tidsforløp.

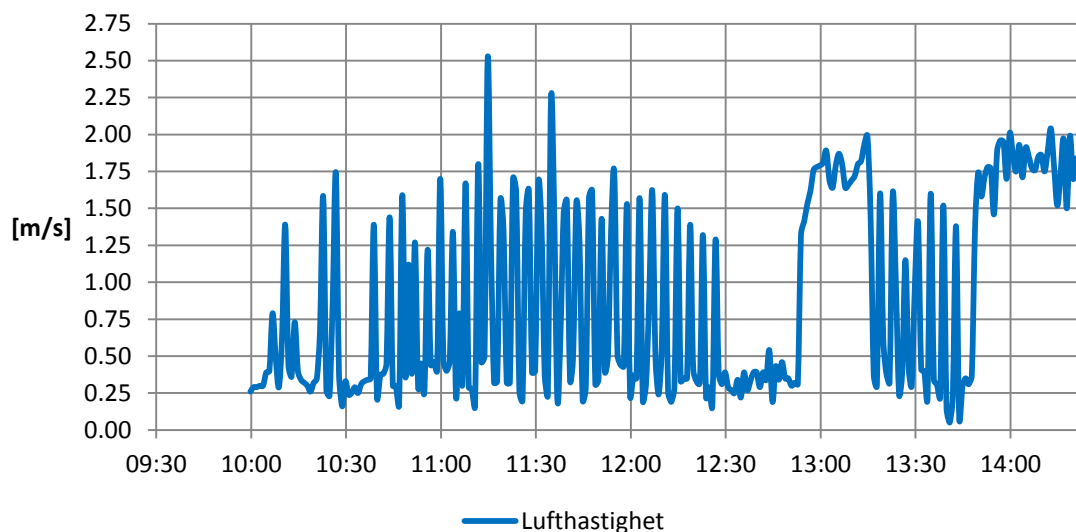


Figur 35: Vindusåpning og variasjon i CO₂-konsentrasjon

På starten av dagen, når elevene ankom klasserommet, steg både temperatur og CO₂-nivå selv om vinduet var i nærmest full åpning. Vinduet holdt deretter maksimal målt åpning, på omlag 2 centimeter, ved temperaturer rundt 23 °C og CO₂-konsentrasjon på 1300 ppm. I pausen klokken 10.05 var det lagt inn friskluft i styringssystemet for å gi rommet utlufting. I denne perioden sank både CO₂- og temperaturnivå og vinduet ble gradvis lukket rundt klokken 10.20. Videre steg både temperatur og CO₂-nivå og vinduet ble åpnet til maksimal åpning igjen klokken 10.40. I en lang periode stod vinduet i maksimal åpning med temperatur rundt 23 °C ved avtrekk og med CO₂-konsentrasjon på 1250 ppm. Grunnet høye temperaturer og CO₂-nivå var vinduet i konstant åpning frem til 12.15, da det var en ny nedgang i CO₂- og temperaturnivå. I den siste friskluftpausen var det større variasjon i vindusåpningen. Fra klokken 12.35 og ut dagen var det færre elever i rommet og vindusåpningen fulgte temperatur og CO₂-konsentrasjon i større grad, med mindre og mer kontrollerte utslag på vindusåpningen. Flere målinger bør utføres for å se nærmere på vindusåpning i samsvar med temperatur og CO₂-konsentrasjon.

6.6. Lufthastighet

Figur 36 viser variasjon i lufthastighet målt i avtrekkskanalen fra klasserommet.



Figur 36: Lufthastighet målt i avtrekkskanalen fra klasserom 101

Tabell 10 viser gjennomsnittlig lufthastighet ved lokale lufthastighetsmålinger i 14 punkter med elever til stede, fra 12.35 til 13.05 (Vedlegg 8). Vinduene er styrt etter normal driftsform ved SD-anlegg.

Tabell 10: Lufthastighetsmålinger, normal driftsform

Punkt	Vindusåpning [cm]	2,5 m over gulv [m/s]	1,1m over gulv [m/s]
1	2,07	0,07	0,01
2	2,09	0,13	0,01
3	2,14	0,07	0,03
4	2,14	0,11	0,02
5	2,14	0,09	0,02
6	1,78	0,02	0,01
7	2,01	0,09	0,07
8	2,01	0,01	0,01
9	2,03	0,01	0,01
10	2,05	0,03	0,01
11	2,09	0,06	0,03
12	2,09	0,08	0,05
13	1,91	0,06	0,01
14	1,78	0,01	0,01

Tabell 11 viser gjennomsnittlig lufthastighet ved samme punkter med vindu i full åpning fra 14.15 til 14.45.

Tabell 11: Lufthastighetsmålinger, vindu i full åpning

Punkt	Vindusåpning [cm]	2,5 m over gulv [m/s]	1,1m over gulv [m/s]
1	2,12	0,06	0,01
2	2,12	0,06	0,01
3	2,12	0,06	0,09
4	2,12	0,02	0,01
5	2,12	0,02	0,01
6	2,12	0,01	0,04
7	2,12	0,01	0,01
8	2,12	0,01	0,01
9	2,12	0,01	0,00
10	2,12	0,02	0,00
11	2,12	0,03	0,07
12	2,12	0,03	0,03
13	2,12	0,05	0,04
14	2,12	0,01	0,01

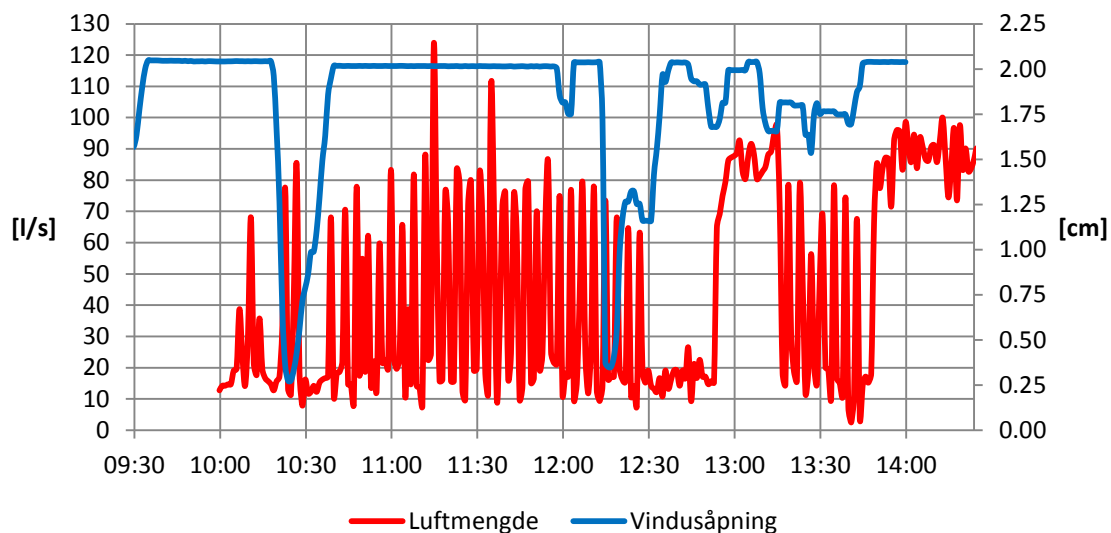
Ved måling av momentanlufthastigheter i klasserommet var alle punktene undersøkt under kravet om maksimal lufthastighet i skolebygninger. Da målingene ble utført blåste det svak vind fra vest. Vinduene i klasserommene er plassert i øst som vil tilsi at vindretningen ikke gav noe særlig tilskudd til vinduslufteringen. Dersom vindretningen hadde vært rettet direkte mot fasaden i øst ville det gitt høyere lufthastigheter og en større risiko for trekk i oppholdssonen.

Det er utført for få målinger til å komme med en konklusjon angående trekkrisiko. I samtaler med ansatte mente de at luften var frisk og behagelig ved vindusluftering. De fortalte videre at trekk ikke var et utbredt problem ved skolen, men at noen elever som satt like ved vinduene på en kald vinterdag, hadde gitt uttrykk for at de var kalde. Fra samtalene kan det derfor antas at det foreligger en viss trekkrisiko om vinteren, spesielt nær vinduer og høyere oppe i rommet hvor luften tilføres. Lave utetemperaturer og en vindretning direkte mot fasade kan forklare at luften føles ubehagelig for elever ved vinduene. For å eliminere trekkrisikoen vil styringssystemet lukke vinduene helt eller ha en liten åpning på vinduene grunnet vindhastighet, utetemperatur og vindretning. Dette kan medføre lave luftmengder som igjen kan gi problemer med tanke på CO₂-konsentrasjonen. Flere undersøkelser, særlig på vinterstid, bør gjennomføres for å gi et helhetlig bilde av trekkrisiko og luftkvalitet.

6.7. Luftmengde

Ved måling av maksimal luftmengde ble spjeldene i avtrekket satt i full åpning og avtrekksviften på maksimum. Deretter ble luftmengden fra de to avtrekksventilene i klasserommet målt ved hjelp av en måletrakt. Luftmengde ved avtrekksventilen nærmest kateteret ble målt til $410 \text{ m}^3/\text{h}$. For avtrekksventilen nærmest dør ble luftmengde målt til $325 \text{ m}^3/\text{h}$. Til sammen trekker de to avtrekksventilene ut en luftmengde på $735 \text{ m}^3/\text{h}$, som tilsvarer omlag 204 l/s .

Figur 37 viser variasjon i luftmengde i avtrekkskanalen og størrelse på vindusåpningen. Luftmengder i avtrekkskanalen er regnet ut på bakgrunn av verdier for lufthastighet og kanaldimensjon.

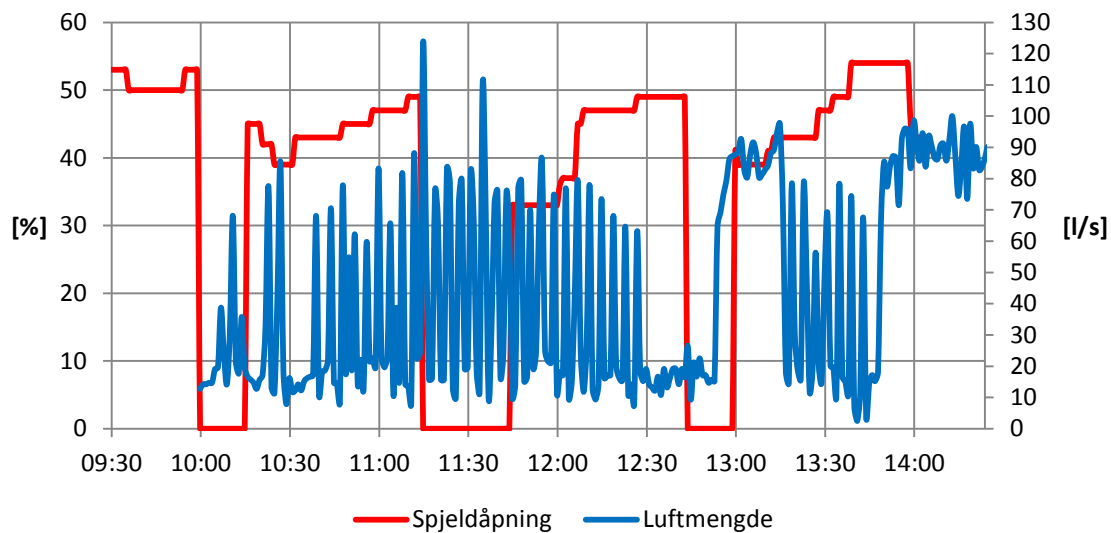


Figur 37: Luftmengde i avtrekkskanal og vindusåpning i klasserom 101

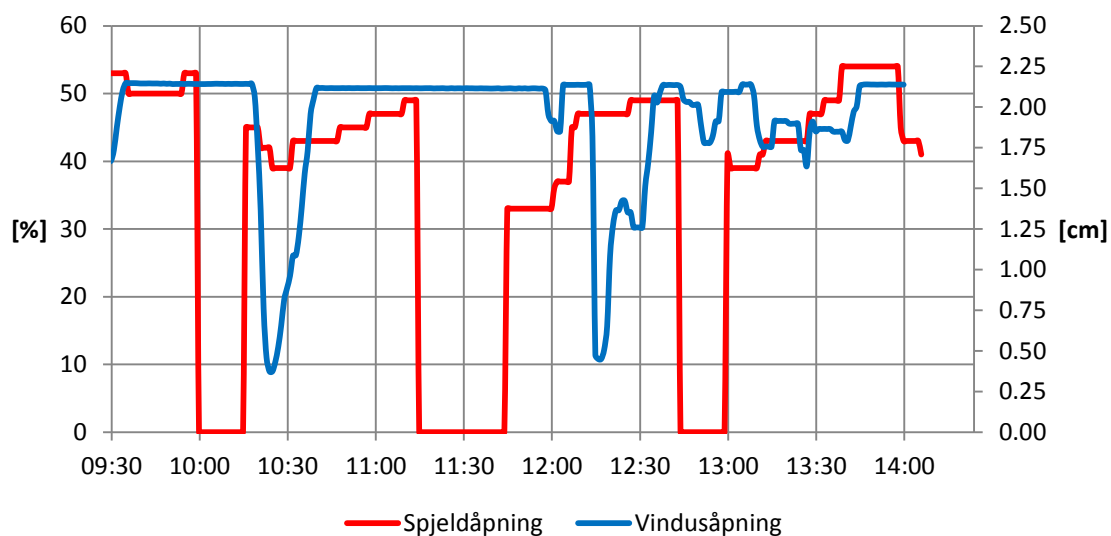
6.8. Spjeldåpning

Ved sammenligning av luftmengde og spjeldåpning stemmer ikke resultatene overens. Det er derfor grunn til å sette spørsmålstegn ved målingen. Da spjeldet er stengt burde det vært tilnærmet null luftmengder i avtrekkskanalen, som observert i tidsrommet fra 12.30 til 13.00 i Figur 38. Det er derfor grunn til å se nærmere på om spjeldene fungerer ettersom dette kan være en feil på måleinstrumentet eller en feil med spjeldåpningen. Videre er det ikke sagt at spjeldet er lukket ved 0 prosent i grafen da tallene er hentet fra SD-anlegget ved skolen. Variasjonene i luftmengde ved lukket spjeld kan skyldes trykkvariasjoner i kanalen. Verdiene er imidlertid for høye til at dette kan være eneste forklaring.

Figur 38 viser spjeldåpning og avtrekksluftmengde, mens Figur 39 viser variasjon i spjeldåpning og størrelse på vindusåpningen. Variasjon i temperatur og CO₂-konsentrasjon, samt verdier for spjeldåpningen er vist i Vedlegg 9. Fra disse grafene er de høyeste CO₂- og temperaturnivåene observert når spjeldet er stengt.



Figur 38: Spjeldåpning og avtrekksluftmengde



Figur 39: Spjeldåpning og vindusåpning

7. Simuleringer i IDA ICE

I dette kapitlet vil simuleringsmodeller basert på Brunla ungdomsskole i Larvik settes opp ved hjelp av simuleringsverktøyet *IDA ICE versjon 4.6*. IDA ICE (Indoor Climate and Energy) er et simuleringsverktøy for detaljert og dynamisk simulering av energibruk, termisk- og atmosfærisk inneklima i bygninger.

7.1. Simulering av mixed mode- og konvensjonell ventilasjon

Som nevnt er den vanligste måten å ventilere yrkesbygninger, inkludert skoler, bruk av mekanisk balansert ventilasjon hvor kjøling og energibruk til vifter står for majoriteten av energiforbruket. Eksisterende skoler og barnehager har ofte utilstrekkelig ventilasjon og oppgradering krever betydelige investeringer, særlig hvis krav legges inn om redusert energiforbruk. I Larvik kommune er det forsøkt en forenklet ventilasjonsløsning ved rehabilitering og nybygging av undervisningsbygg hvor vinduslufting er satt i system. Målet for simuleringene er å se om ventilasjonsløsningen i Larvik kan gi et tilfredsstillende inneklima, samtidig som energiforbruk opprettholdes eller reduseres sammenlignet med konvensjonelle ventilasjonsløsninger. Det vil bli satt opp to simuleringsmodeller for sammenligning av ventilasjonsløsningene; en modell for mixed mode ventilasjon og en for mekanisk balansert ventilasjon.

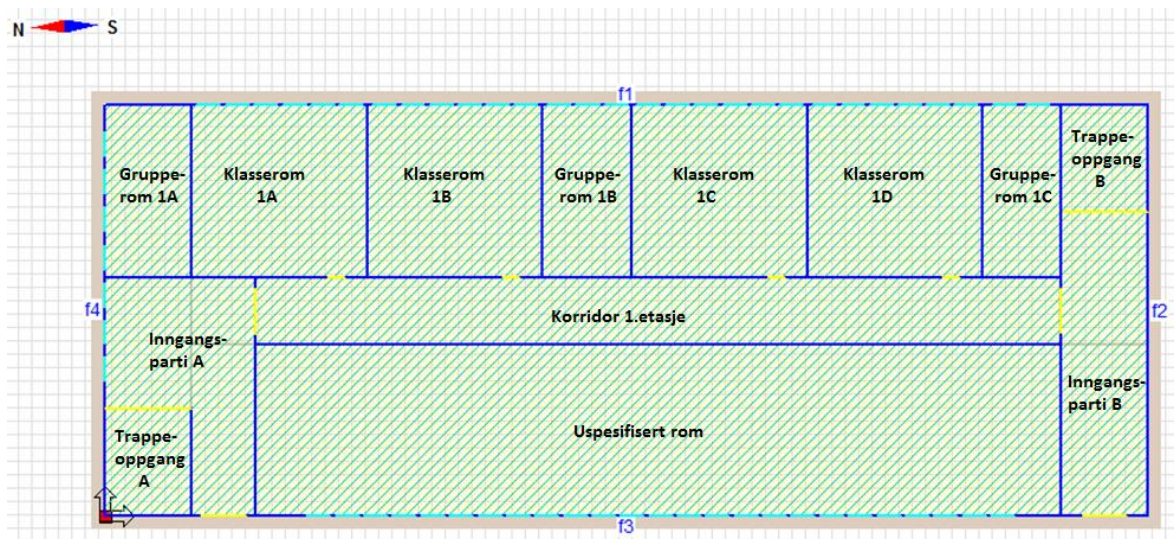
7.1.1. Simuleringsmodellene og de ulike ventilasjonsscenarioene

Brunla ungdomsskole består av flere bygninger, men fokus for denne oppgaven er hovedbygningen, bygning C, som i hovedsak består av klasserom, grupperom, uspesifiserte rom, korridorer og trappeoppganger. Ved simulering er det forsøkt å få modellene realistiske, bygningen er derfor satt opp i detalj fra plantegninger. I plantegningene (Vedlegg 10 og 11) er klasserommene i første etasje markert som C-101, C-102, C-103, C-104 og tilsvarende for andre etasje C-205, C-206, C-207 og C- 208.

Videre er to ulike ventilasjonsscenarioer fremstilt. Scenarioet for mixed mode ventilasjon er satt opp etter systemløsningen som benyttes ved Brunla ungdomsskole i dag, med vindus- og avtrekksstyring. Et hypotetisk scenario av skolen med oppgradering til konvensjonell mekanisk balansert ventilasjon vil også presenteres. I begge scenarioene er bygget rehabilitert ved å tilleggisolere yttervegger med 10 centimeter og erstatte gamle vinduer.

7.1.2. Beliggenhet og utforming

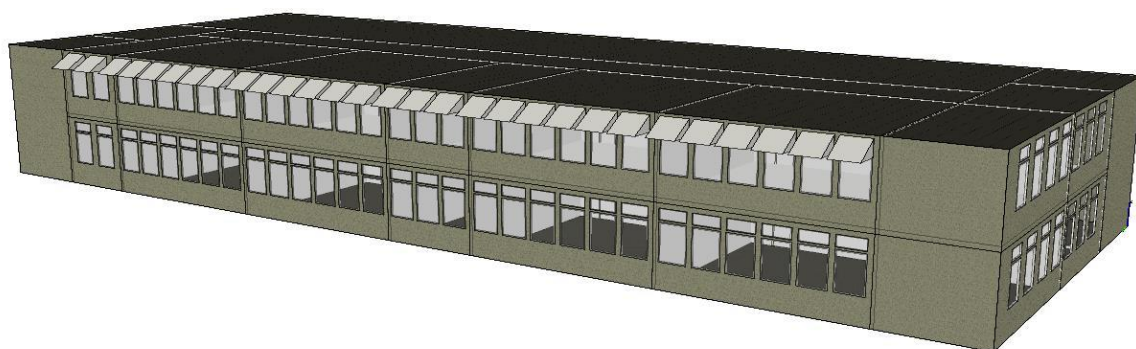
Brunla ungdomsskole ligger i et område med moderat bebyggelse. Skolen er derfor plassert som forstad i simuleringen. I simuleringsmodellen er planløsningen satt opp etter opprinnelige plantegninger og bygget delt inn i 4 ulike sonetyper. Disse sonetypene er klasserom, grupperom, korridor med trappeoppgang og inngangsparti, samt uspesifiserte rom. For 1.etasje er planløsningen satt opp som vist i Figur 40 og i 2.etasje er planløsningen tilnærmet lik 1.etasje.



Figur 40: Plantegning for 1.etasje i IDA-ICE

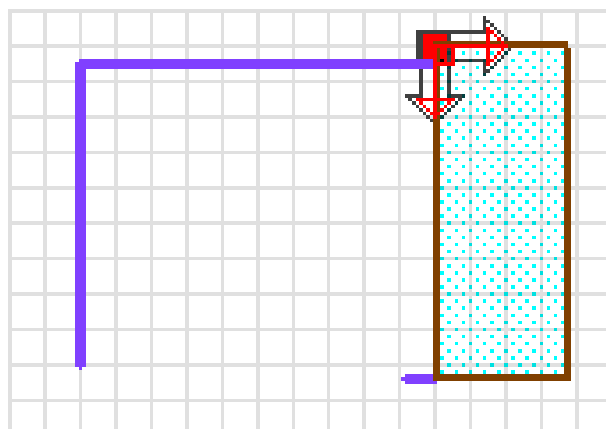
Bygningen består av to etasjer, hvor hver etasje inneholder fire klasserom med lik størrelse, form, brukertetthet og bruksmønster. I simuleringsmodellen er klasserommene satt opp med en grunnflate på $7,7 \times 7,9 \text{ m}^2$ og takhøyden i bygningen er satt til 3,1 meter. De uspesifiserte rommene på motsatt side av klasserommene er ikke brukt, men kan benyttes som sporadiske grupperom. Rommene er derfor forenklet og satt opp som et stort rom for hver etasje. De uspesifiserte rommene har ikke blitt vektlagt i samme grad som klasserommene, men er satt opp med samme ventilasjonssystem som klasserommene ved gitt scenario. Simuleringsmodellen har et oppvarmet bruksareal (BRA) på totalt 1726 m^2 . For byggets glassareal er det også tatt utgangspunktet i plantegninger. I hvert klasserom er det 6 vinduer, alle orientert mot øst, hvorav 4 vinduer benyttes for vinduslufting ved mixed mode ventilasjon. Vinduene består av små manøvrerbare vinduer øverst med dimensjon $0,425 \times 1,08$ meter og store umanøvrerbare vinduer nederst med dimensjon $1,425 \times 1,08$ meter.

Figur 41 viser simuleringsmodellen fra IDA ICE.



Figur 41: 3D-presentasjon av simuleringsmodellen for hovedbygget laget i IDA ICE

Det benyttes ingen solavskjerming i første etasje, men det er flere trær nær fasaden. I andre etasje benyttes markiser for solavskjerming som kan styres manuelt eller automatisk. Den automatiske styringen avhenger blant annet av solinnstråling, vindhastighet og vindretning. I simuleringene er markisene styrt manuelt og ansett for å stå ute hele tiden. Rundt hovedbygningen ligger flere bygninger tilknyttet skolen. Derfor er det satt opp et avmerket skyggeområde på vestsiden av bygningen, som vist i Figur 42.



Figur 42: Skyggeområde på vestsiden av bygningen

7.1.3. Bygningskropp

U-verdier for bygningskonstruksjonene er ukjente. Det er derfor tatt utgangspunkt i U- verdier basert på standardverdier fra 1969 gitt av Norsk VVS (1969). Ved rehabiliteringen av skolen i 2009 ble ytterveggene etterisolert med 10 centimeter som er tatt hensyn til ved simulering. For vinduene er U-verdi gitt av datablad fra leverandør (Vedlegg 12). Vindusdimensjon i databladet avviker fra dimensjoner benyttet ved Brunla, men vindustype og gjennomsnittlig U-verdi er lik. U-verdier for bygningskonsentrasjonen er presentert i Tabell 12.

Tabell 12: U-verdier for bygningskonstruksjoner benyttet ved simulering

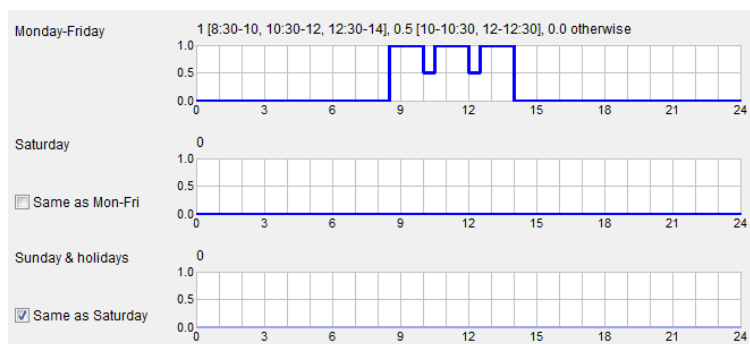
Konstruksjon	Materialbruk	U-verdi [W/m ² K]
Yttervegg	Teglstein med isolering og betong	0,27
Gulv	Betong, isolering og belegg	0,70
Tak	Betong med isolering	0,58
Vindu	NTech lavenergi	1,00

Infiltrasjonsvarmetap for bygningen er satt til 1,5 luftvekslinger per time etter veiledning om tekniske krav til byggverk, TEK 10. Kuldebroer i bygningen er satt ved hjelp av standardverdier fra IDA ICE, som varierer fra ikke-eksisterende til svært dårlig. I modellene er verdier for kuldebroer satt til dårlig, neste verste innstilling, for bygningskonstruksjoner som ikke er rehabilitert. Bygningskonstruksjoner tilknyttet vegger og vinduer er satt til god, nest beste innstilling (Vedlegg 13).

7.1.4. Brukertetthet og driftstid

Brukertetthet i bygget er satt opp med utgangspunkt i at elevene tilbringer mesteparten av skoledagen i klasserommene. I hvert klasserom er brukertettheten derfor satt til 0,4 personer/m² som tilsvarer 24 personer, 23 elever og en lærer. Brukertettheten i uspesifiserte rom er satt til 0,02 personer/m², grupperom 0,1 personer/m² og null for korridorer og trappeoppganger. Videre er aktivitetsnivået satt til 1,2 met og bekleddning til 0,7 clo.

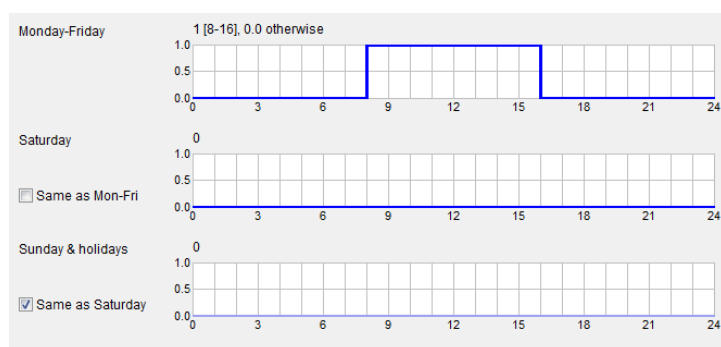
I driftstid inngår andelen av en tidsperiode hvor bygningen har normal personbelastning med tilhørende behov for klimatisering og ventilasjon. Driftstiden for personbelastning er satt opp etter en normal skoledag fra 08.30 til 14.00 og tar hensyn til to halvtimers pauser klokken 10.00 og 12.00. I denne perioden er det satt opp halv brukerbelastning og resten av tiden er det full brukerbelastning, som vist i Figur 43.



Figur 43: Driftstid etter personbelastning

7.1.5. Interne laster

Varme avgitt fra belysning, utstyr og personer har stor påvirkning på bygningers kjølebehov. For interne laster fra utstyr og belysning er standardverdier fra IDA ICE benyttet. For klasserom og grupperom er det satt opp 0,05 elektrisk utstyr per m^2 á 75 W og i uspesifiserte rom 0,02 utstyr per m^2 , mens korridoren er satt opp uten belastning fra utstyr. Videre er klasserom, korridor og grupperom satt opp med 0,1 lyskilder per m^2 á 100 W og urelevante rom med 0,05 lyskilder per m^2 . Alle soner i bygningen er utstyrt med ideell oppvarming, som sørger for tilføring av nødvendig varme for å opprettholde innstilt temperatur til enhver tid. Driftstiden for interne laster er satt til 08.00 - 16.00 på hverdager og er slått av i helgene, som vist i Figur 44.



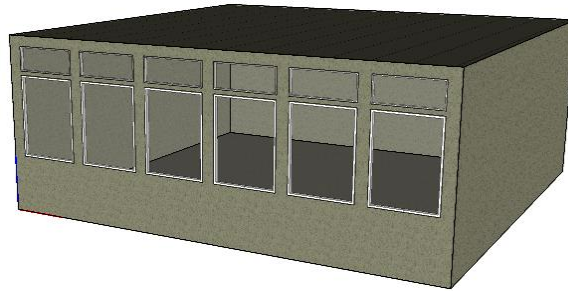
Figur 44: Driftstid for utstyr og belysning

7.1.6. Øvrig inndata for simuleringsmodellen

Det er satt opp et oppvarmingssystem med en pelletskjel med virkningsgrad 0,8 og en elkjel for topplast med virkningsgrad 1. Fra NS 3031 er spesifikk vifteeffekt, SFP, for skolebygninger 2 $kW/(m^3/s)$. Denne verdien er også benyttet ved oppbygging av simuleringsmodellen. For tappevann er det tatt utgangspunkt i standardverdier for årlig energibehov for varmtvann i skolebygninger fra NS 3031. Årlig energibehov for tappevann er satt til 10 kWh/m^2 med samme driftstid som for lys og utstyr.

7.2. Simuleringsmodell for klasserom med vindus- og avtrekksstyring

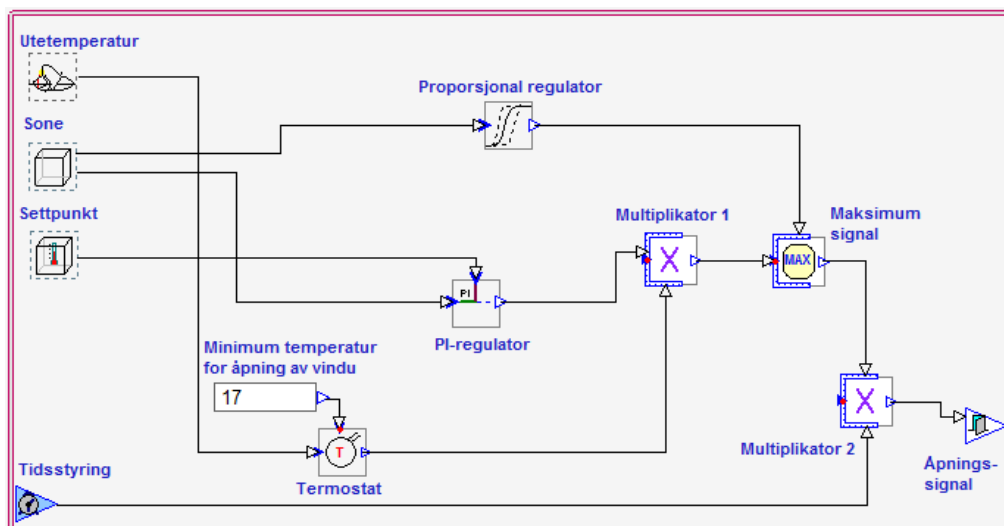
For å lage vindus- og avtrekksstyring er en modell for et klasserom satt opp, som vist i Figur 45. Kontrollstrategien for vinduet ble satt opp for 4 av de øverste vinduene og simuleringer ble utført for å se på vindusåpning ved ulike temperaturer og CO₂-konsentrasjoner.



Figur 45: 3D-presentasjon av simuleringsmodellen for et klasserom laget i IDA ICE

7.2.1. Oppbygging av kontrollstrategi for vindu

Det er laget en egen kontrollstrategi for åpning av vindu som ble benyttet ved simulering av mixed mode ventilasjon. Kontrollstrategien for vinduene er vist i Figur 46.



Figur 46: Kontrollstrategi for åpning av vindu

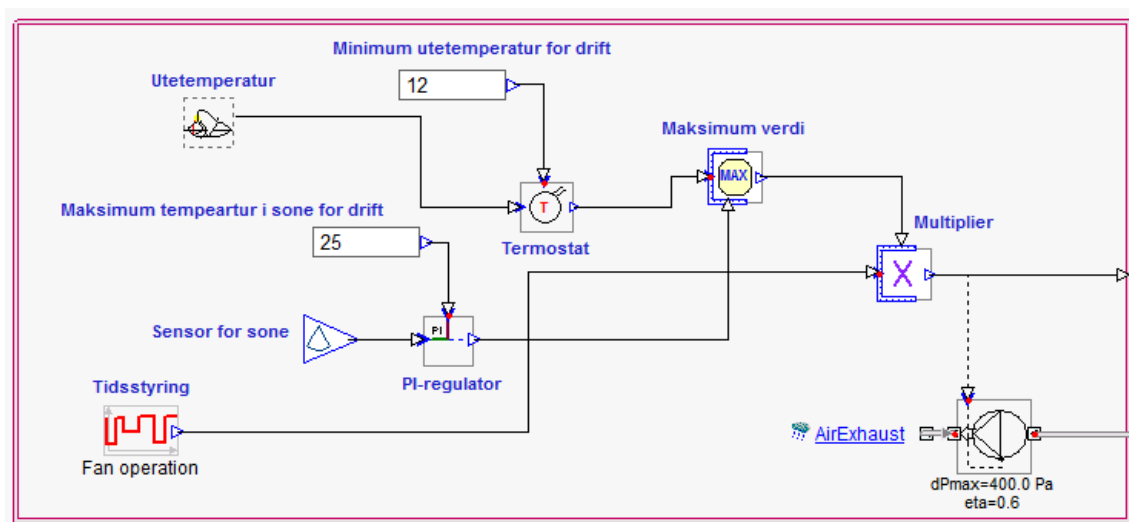
I kontrollstrategien styres vinduer etter temperatur og CO₂-konsentrasjon i sonen, samt utendørstemperatur. Temperaturen måles mot et settpunkt satt for sonen gjennom en PI-regulator. Ved målte verdier over settpunkt vil PI-regulatoren sende et åpningssignal til Multiplikator 1. Termostaten vil også sende et åpningssignal til samme multiplikator basert på målt utetemperatur. Er temperatur under settpunktet på 17 °C, satt i kontrollstrategien, vil

termostaten hindre vinduet i å åpne. Dette settpunktet er satt for å hindre lave temperaturer i klasserommet og trekk. Multiplikator 1 vil deretter multiplisere signalene fra utetemperatur og lufttemperatur i sonen. Dette fungerer ettersom signalet fra termostaten er 1 ved utetemperaturer over 17 °C og 0 ved utetemperaturer under 17 °C.

Videre måles CO₂-nivået i sonen og reguleres etter settpunktet stilt inn i proporsjonal regulatoren. Regulering etter CO₂ skjer ved begrenset åpningsgrad på vinduet. Settpunktet for CO₂ er satt fra 1000 til 1100 ppm i proporsjonal regulatoren. Det vil si at vinduet ikke vil åpne før verdier over 1000 ppm er registrert. Ved målte CO₂ verdier over 1000 ppm vil vinduet åpnes og ved 1100 ppm gå i maksimal åpning. I proporsjonal regulatoren er maksimal åpning grunnet høye CO₂ verdier satt til 0,5, som tilsvarer halv åpning av vinduet. Signalet fra Multiplikator 1 og CO₂-styringen sendes deretter videre til en kobling som velger det største signalet (Maksimumsignal). Denne koblingen gjør at vinduet kan reguleres med hensyn på CO₂ uavhengig av utetemperatur (derfor begrenset åpningsgrad ved CO₂-regulering). Dersom det oppstår høye temperaturer i sonen, og krav til utetemperatur er oppfylt, vil maksimumsignalet sørge for at temperaturstyringen blir den dominerende faktoren ved åpning av vinduet. Hvis ikke vil den regule på bakgrunn av CO₂. Signalet sendes videre til en ny multiplikator (Multiplikator 2) som er koblet mot tidsstyringen. Signalet fra tidsstyringen er enten på eller av, avhengig av satt driftstid for vinduet. Multiplikator 2 gir deretter et åpningssignal til vinduet avhengig av tidsstyringen og maksimumsignal.

7.2.2. Oppbygging av kontrollstrategi for avtrekk

I simuleringsmodellen er ventilasjonsanlegget erstattet med et avtrekkssystem med maksimalt avtrekk på 4 l/s per m². Det er også laget en egen kontrollstrategi for avtrekkssystemet som er vist i Figur 47. I kontrollstrategien for avtrekkssystemet styres avtrekket etter minimum utetemperatur og temperatur i sonen. Temperaturen måles mot et settpunkt satt for sonen gjennom en PI-regulator. Dersom temperaturen i sonen overstiger 25 °C vil luftmengden i avtrekket øke opp mot maksimum 4 l/s per m² for å fjerne overskuddsvarme. I kontrollstrategien styres også avtrekk etter minimum utetemperatur, satt til 12 °C. Ved temperaturer under 12 °C vil luftmengden i avtrekket reduseres for å unngå store varmetap. Mellom klokken 20.00 og 04.00 er ventilasjonsanlegget avslått, men i driftstiden varierer luftmengdene i avtrekket etter temperatur i sone, utetemperatur og driftstid. I perioder med utetemperaturer under 12 °C vil avtrekket reduseres betraktelig for å redusere energiforbruk da det ikke benyttes varmegjenvinning.



Figur 47: Kontrollstrategi for avtrekk

Tabell 13 viser ulike scenarier for drift av avtrekkssystemet, hvor X er multiplikatoren som angir drift av ventilasjonsanlegget i prosent. I tabellen tilsvare X_{drift} perioden av døgnet når avtrekket er i full drift fra klokken 06.00 til 18.00. $X_{\text{halv drift}}$ tilsvare perioden når avtrekket er i halv drift fra 04.00 til 06.00 og fra 18.00 til 20.00. $X_{\text{utenfor driftstid}}$ tilsvare resterende tid fra klokken 20.00 til 04.00, hvor avtrekkssystemet er slått av.

Tabell 13: Ulike scenarier for avtrekkssystemet

Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
$T_{\text{ute}} < 12\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ute}} > 12\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ute}} > 12\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ute}} < 12\text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{inne}} < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{inne}} < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{inne}} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{inne}} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
$X_{\text{drift}} = 5\text{ }\%$	$X_{\text{drift}} = 50\text{ }\%$	$X_{\text{drift}} = 50 - 100\text{ }\%$	$X_{\text{drift}} = 0 - 5\text{ }\%$
$X_{\text{halv drift}} = 2,5\text{ }\%$	$X_{\text{halv drift}} = 25\text{ }\%$	$X_{\text{halv drift}} = 25 - 50\text{ }\%$	$X_{\text{halv drift}} = 0 - 2,5\text{ }\%$
$X_{\text{utenfor driftstid}} = 0\text{ }\%$	$X_{\text{utenfor driftstid}} = 0\text{ }\%$	$X_{\text{utenfor driftstid}} = 0\text{ }\%$	$X_{\text{utenfor driftstid}} = 0\text{ }\%$

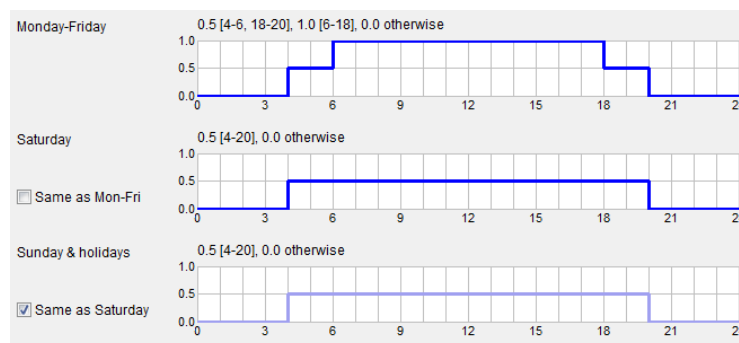
7.3. Mixed mode ventilasjon

Simuleringsmodellen for mixed mode ventilasjon er satt opp etter simuleringsmodell for klasserom med vindus- og avtrekksstyring. Vindusstyringen styrer dermed etter CO₂- og temperatur i hver sone, mens avtrekket styrer etter inne- og utetemperatur. Jevnt over er totalt ¾ av byggets øverste vinduer satt opp med vindusstyring. Driftstid, brukertetthet og interne laster er satt opp som tidligere beskrevet.

7.3.1. Settpunkter, ventilasjon

For avtrekksstyringen er settpunktet for tilluft satt til 0 l/s per m² og maksimalt avtrekk til 4 l/s per m². Videre i modellen er settpunktet for oppvarming ved hjelp av ventilasjon satt fra 21 til 25 °C, og settpunktet for CO₂ satt fra 700 til 1000 ppm. I kontrollstrategien for vinduslufting vil vinduene styres etter CO₂ verdier fra 1200 til 1300 ppm. Ved målte CO₂ verdier i sonene som overstiger 1200 ppm vil vinduene begynne å åpne, og ved verdier over 1300 ppm vil vinduet gå i maksimal åpning satt av kontrollstrategien til 50 prosent. I kontrollstrategien for drift av vinduet er tidsstyringen endret fra modellen for et klasserom og satt til å operere fra 06.00 til 19.00.

For drift av ventilasjonsanlegget er byggets driftstid satt opp som vist i Figur 48. Fra klokken 20.00 til 04.00 er ventilasjonen slått av, mens fra 06.00 til 18.00 går ventilasjonen som normalt. I perioden fra klokken 04.00 til 06.00 og fra 18.00 til 20.00 går ventilasjonen for halv drift. I helgene går ventilasjonen for halv drift fra 04.00 til 20.00 og er ellers slått av.



Figur 48: Driftstid for avtrekksanlegg

7.4. Mekanisk balansert ventilasjon

I simuleringsmodellen for mekanisk balansert ventilasjon er avtrekksanlegget i bygningen oppgradert med et nytt VAV-system. Systemet styrer etter CO₂- og temperaturkontroll i hver sone. Ved simulering benyttes ikke mekanisk kjøling, men VAV-systemet har mulighet for kjøling av tilførselsluft. Det er videre lagt inn en varmegjenvinner i ventilasjonsanlegget med en årgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad på 80 prosent. Verdien for virkningsgraden er satt fra krav i veiledning om tekniske krav til byggverk, TEK10. Driftstid, brukertetthet og interne laster er satt opp som tidligere beskrevet.

7.4.1. Settpunkter, ventilasjon

Ved mekanisk balansert ventilasjon styrt etter CO₂ og temperatur benyttes ikke settpunkter for luftmengder. I modellen er settpunkt for oppvarming basert på verdier for lett arbeid, og satt fra 21 – 25 °C. Settpunkt for CO₂ er satt fra 700 til 1000 ppm. Maksimalnivået på 1000 ppm er satt med utgangspunkt i anbefalte krav fra Folkehelseinstituttet.

8. Resultater og diskusjon fra simulering

I dette kapittelet presenteres utførte simuleringer av vindus- og avtrekksstyringen for å undersøke effekten av kontrollstrategien for vinduslufting og avtrekk. Videre utføres beregninger av energi- og effektbehov for ventilasjon, oppvarming og kjøling for mixed mode- og VAV-modellen presentert i forrige kapittel. I tillegg vil termisk og atmosfærisk inneklima studeres og sammenlignes.

For utendørsklima har IDA ICE to simuleringsalternativer for værdata: en syntetisk designdag, vinter eller sommer, og en klimafil med måldata. Den syntetiske designdagen genererer identiske værforhold over flere døgn og benyttes når målet er å observere bygningens oppførsel under en normal vinter- eller sommerdag. For beregning av energi- og effektbehov er det tatt utgangspunkt i hovedbygningen, og klimafilen *Osloklima* er benyttet ved årssimulering. Det er også utført simuleringer for energi- og effektbehov ved sommer- og vinterklima, hvor resultatene er presentert i Vedlegg 14 og 15. Ved studien av termisk og atmosfærisk inneklima er det benyttet syntetiske klimadata, gitt av simuleringsprogrammet, for å simulere under dimensjonerende forhold. Modellene for mixed mode- og mekanisk balansert ventilasjon er da satt opp for å se nærmere på to tilfeller:

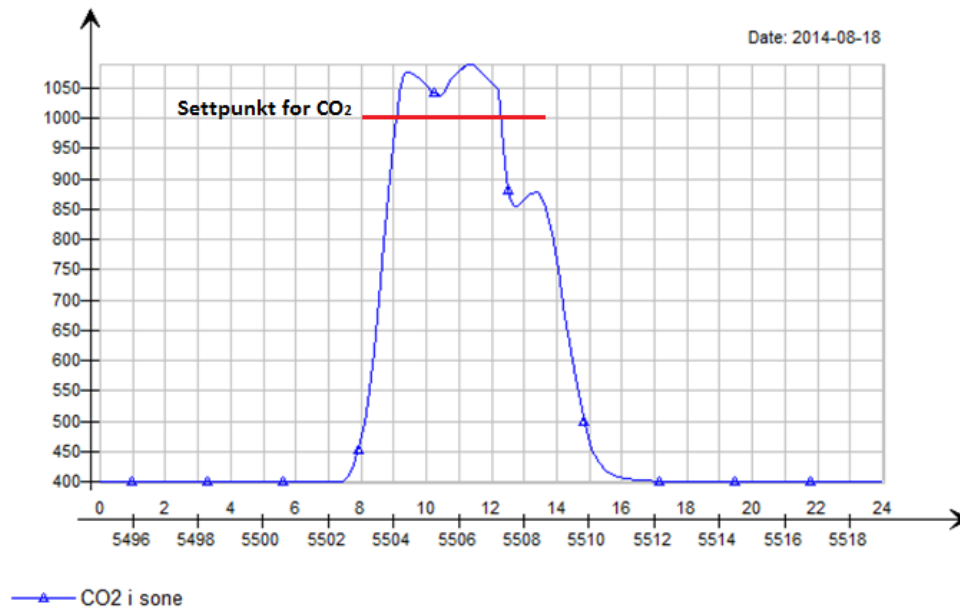
Scenario 1: Termisk og atmosfærisk komfort ved mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon, sommersimulering.

Scenario 2: Termisk og atmosfærisk komfort ved mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon, vintersimulering.

Vedlegg 16 gir en oversikt over utetemperatur ved vinter- og sommersimulering. Resultatene for hver etasje er tilnærmet lik, men varierer noe mellom etasjene grunnet bruk av solavskjerming i andre etasje. Derfor vil resultater fra ett klasserom i første etasje og ett i andre etasje presenteres, henholdsvis klasserom 101 og 201. Resultater fra klasserom 201 er fremstilt i Vedlegg 17 og 18.

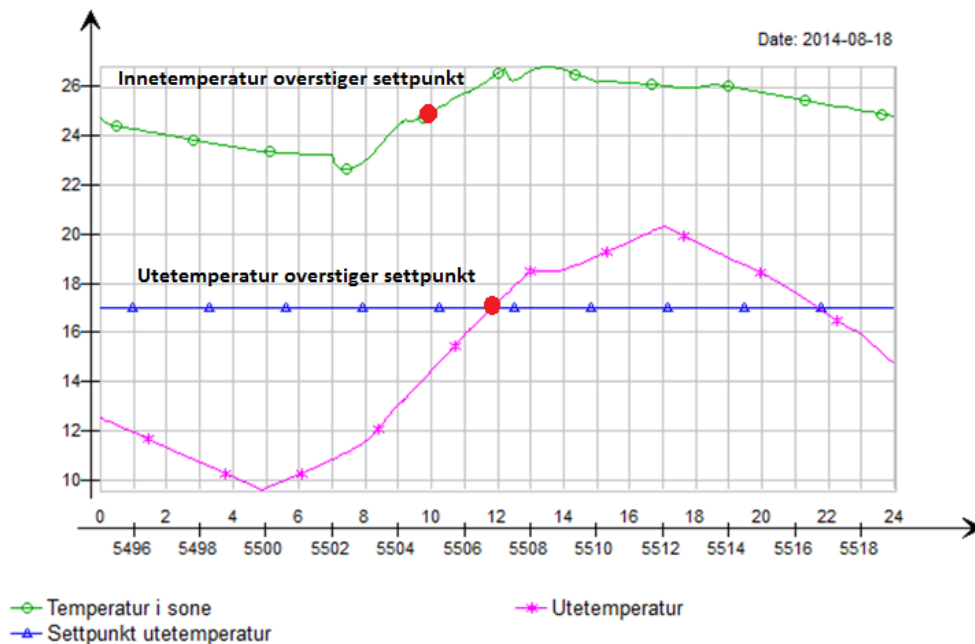
8.1. Simuleringsmodell for klasserom med vindusstyring

I kontrollstrategien for vindusstyring ble det utført simuleringer av vinduslufting på dager med ulikt utslag på vindusåpningen. Resultatene nedenfor viser simuleringer utført 18. august ved Osloklima. Figur 49 viser CO₂-nivået i sonen ved kontrollstrategien for vinduslufting og den røde linjen indikerer nedre settpunkt for CO₂-nivå på 1000 ppm.



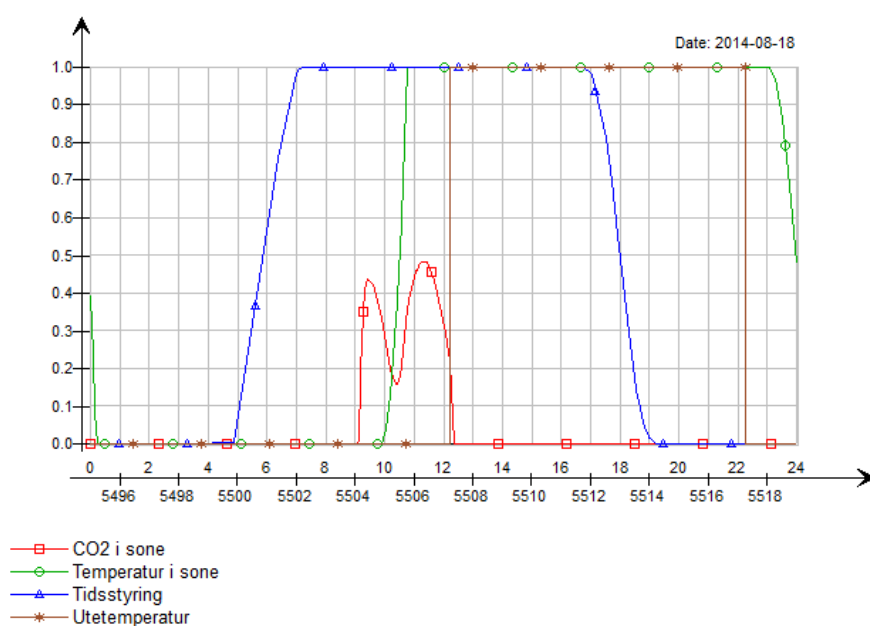
Figur 49: CO₂-nivå i sonen

Figur 50 viser temperaturvariasjon i sonen, utetemperatur og settpunkt for utetemperatur på 17 °C. De røde prikkene markerer tidspunktet da inne- og utetemperatur overstiger settpunkt.



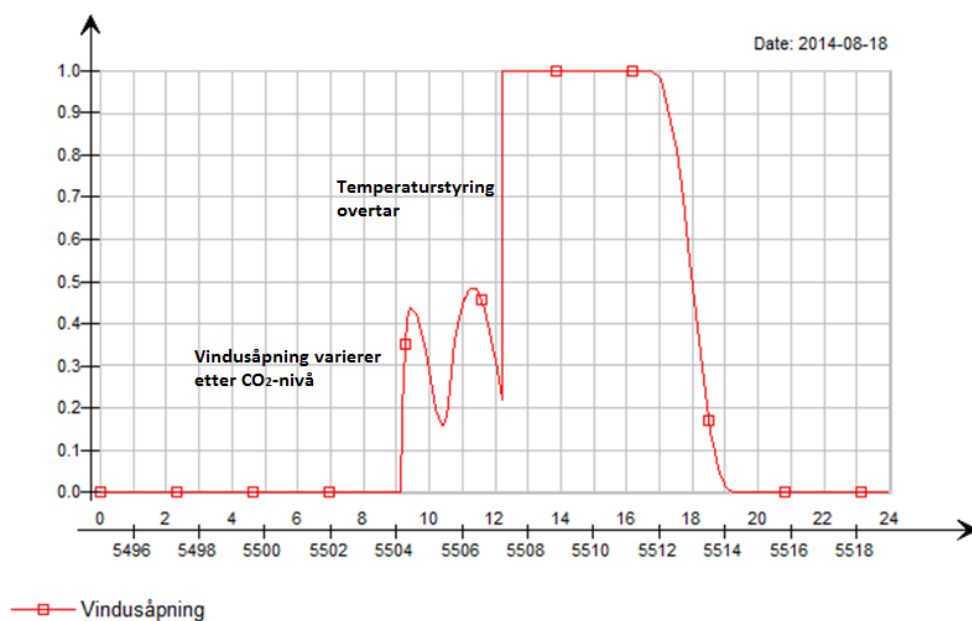
Figur 50: Temperatur i sone, utetemperatur og settpunkt for utetemperatur

Figur 51 viser påslag fra ulike signaler for åpning av vindu. De ulike signalene som påvirker vindusåpningen er CO₂ og temperatur i sone, samt utetemperatur og tidsstyring. I simuleringen er tidsstyringen av vinduene satt fra 06.00 til 18.00. Tidsstyringen har en jevn overgang og vinduer vil dermed åpnes gradvis fra 05.00 til 07.00 og stenges gradvis fra 17.00 til 19.00, som vist i Figur 51 (blå linje). Den jevne overgangen er ikke satt opp i kontrollstrategien, men reguleres automatisk i programmet.



Figur 51: Signaler for åpning av vindu

Figur 52 viser vindusåpningen som varierer etter CO₂-konsentrasjon og temperatur i sonen. I figuren tilsvare verdien 1 full åpning av vinduet og verdien 0 lukket vindu.

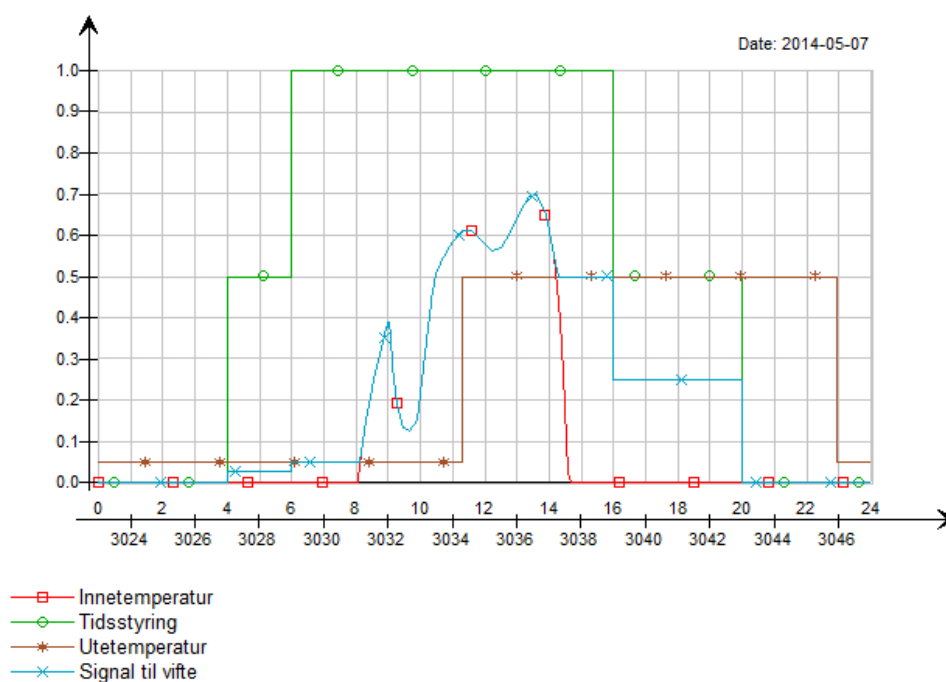


Figur 52: Vindusåpning

På grunnlag av høyt CO₂-nivå i sonen vil vinduene åpnes litt over 09.00 da CO₂-nivået overstiger 1000 ppm. Deretter regulerer vinduet på bakgrunn av CO₂ frem til temperaturstyringen overtar. Temperaturen i sonen overstiger settpunktet for åpning av vinduet på 25 °C litt over klokken 10.00, men kontrollstrategien vil ikke tillate vinduet å åpnes mer på dette tidspunktet grunnet utetemperatur under settpunktet på 17 °C. Litt over klokken 12.00 tar temperaturstyringen over da utetemperatur overstiger settpunktet. Grunnet høye temperaturer i sonen og tilstrekkelig utetemperatur vil vinduet kjøres på full åpning inntil vinduet stenges grunnet driftstiden til systemet.

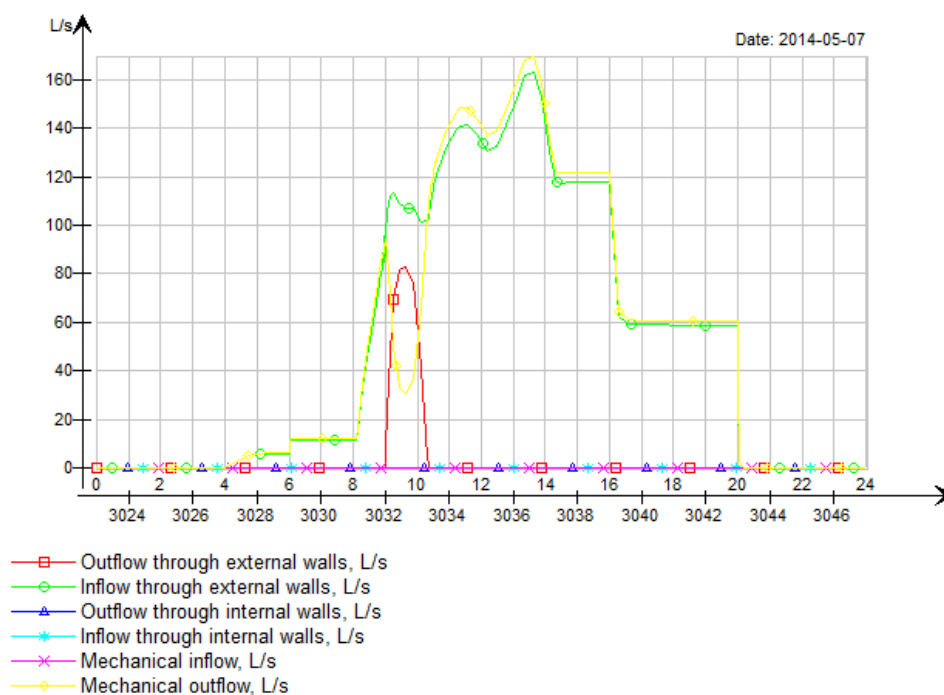
8.2. Simuleringsmodell for klasserom med avtrekksstyring

For å sette opp en kontrollstrategi for avtrekk ble samme modell som for vindusstyringen benyttet. Resultatene nedenfor er fra simuleringer utført 5. mai ved Oslo klima. Figur 53 viser åpningssignalene i kontrollstrategien sendt til avtrekk. Den grønne linjen i figuren viser at tidsstyringen for avtrekket er begrenset til å trekke ut luft i perioden fra 04.00 til 20.00. Videre er avtrekket satt opp med halv drift fra klokken 04.00 til 06.00 og fra 18.00 til 20.00.



Figur 53: Åpningssignaler fra kontrollstrategien for avtrekk

Som nevnt illustrerer Tabell 13 ulike scenarioer for avtrekkssystemet. Klokken 04.00 starter driften av avtrekket og tidsstyringen står på halv drift. I denne perioden er utetemperaturen under settpunktet på 12 °C og temperaturen i sonen under 25 °C. Åpningssignalet for avtrekk, den blå linjen, vil dermed begrenses til 2,5 prosent (Scenario 1, halv drift) grunnet lave inne- og utetemperaturer. Klokken 06.00 skifter tidsstyringen til full drift, men avtrekket begrenses til 5 prosent grunnet lave temperaturer (Scenario 1, drift). Klokken 08.00 øker avtrekket da innetemperaturen øker over settpunkt. Videre justeres driften av avtrekket etter innetemperatur frem til litt over klokken 14.00 (Scenario 3, drift). Ved dette tidspunktet overstiger også utetemperaturen settpunktet på 12 °C og viften kjører på 50 prosent frem til klokken 16.00 (Scenario 2, drift). Etter klokken 16.00 faller viftedriften til 25 prosent grunnet tidsstyringen som er satt til halv drift (Scenario 2, halv drift). Klokken 20.00 stenges avtrekket etter tidsstyringen og starter ikke opp før 04.00 neste dag. Den gule linjen i Figur 54 viser avtrekksluftmengder i sonen, mens den rosa linjen viser tilluftsmengde fra ventilasjonsanlegget. Verdien for tilluft er null da det benyttes et rent avtrekkssystem.



Figur 54: Luftmengde tilført sonen







8.3. Mixed mode- og mekanisk balansert ventilasjon

I dette kapittelet vil resultater fra simuleringer utført med mixed mode- og mekanisk balansert ventilasjon presenteres. Larvik kommune har byttet både oppvarmingssystem og strømleverandør flere ganger de siste årene og dermed finnes ikke en fullstendig statistikk over energiforbruk ved Brunla ungdomsskole. I tillegg benyttes ulike ventilasjons- og oppvarmingsløsninger for bygningene, som gjør det vanskelig å gi et representativt bilde av energi- og effektbehov ved hovedbygningen. Ved sammenligning av energi- og effektbehov er det derfor tatt utgangspunkt i simuleringsmodellene for mekanisk balansert ventilasjon og mixed mode ventilasjon.

8.3.1. Energi- og effektbehov ved årssimulering







For å optimere energiforbruket ved mixed mode ventilasjon ble ulike reguleringsmessige tiltak benyttet. Avtrekksmengde, settpunkter, størrelse på vindusåpning, driftstid for avtrekk og ulike begrensninger for vindusåpningen med tanke på temperatur og CO₂ ble variert. Modellen som samlet gav de beste resultatene for energiforbruk og inneklimate er benyttet ved simulering. Tabell 14 gir en oversikt over energi- og effektbehov ved årssimulering av mixed mode ventilasjon. I tabellen tilsvarende fuel heating oppvarmingssystemet og equipment, tenant er utstyr som brukerne benytter seg av i bygget. Ved årssimulering har skolebygningen et årlig energibehov på 105 kWh/m². Verdier verdt å merke seg er effektbehovene for ventilasjon 13,5 kW, oppvarming 85,7 kW og kjøling 0 kW.

Tabell 14: Levert energi ved årssimulering av mixed mode ventilasjon

		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m ²	kW
	Lighting, facility	17339	10.3	8.3
	Electric cooling	0	0.0	0.0
	HVAC aux	4986	3.0	13.51
	Total, Facility electric	22325	13.2	
	Fuel heating	132008	78.2	85.66
	Domestic hot water	18761	11.1	8.98
	Total, Facility fuel*	150769	89.3	
	Total	173094	102.5	
	Equipment, tenant	4259	2.5	2.04
	Total, Tenant electric	4259	2.5	
	Grand total	177353	105.0	

Tabell 15 gir en oversikt over energi- og effektbehov ved årssimulering av mekanisk balansert ventilasjon. Ved årssimulering har skolebygningen et årlig energibehov på 109,5 kWh/m². Verdier verdt å merke seg er effektbehovene for ventilasjon 19,4 kW, oppvarming 57,7 kW og kjøling 28,5 kW. Den elektriske kjøleeffekten er kjøling gitt tilluften fra ventilasjonsaggregat.

Tabell 15: Levert energi ved årssimulering av mekanisk balansert ventilasjon

		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m ²	kW
	Lighting, facility	17347	10.3	8.3
	Electric cooling	4270	2.5	28.47
	HVAC aux	27335	16.2	19.43
	Total, Facility electric	48952	29.0	
	Fuel heating	112893	66.9	57.72
	Domestic hot water	18761	11.1	8.98
	Total, Facility fuel*	131654	78.0	
	Total	180606	107.0	
	Equipment, tenant	4261	2.5	2.04
	Total, Tenant electric	4261	2.5	
	Grand total	184867	109.5	

Oppsettet for vindus- og avtrekksstyringen ble variert for å finne optimal situasjon for å forbedre energibruk og inneklima. Det bør utføres flere simuleringer hvor regulering av ulike parametere optimaliseres ytterligere. Simuleringene inneholder derfor noen usikkerhetsmomenter som kan ha innvirkning på resultatet. For skolebygninger skal netto årlig energibehov være lavere enn 120 kWh/m² ifølge TEK 10. I simuleringene av mekanisk balansert ventilasjon har skolebygningen et årlig energibehov på 109,5 kWh/m² og ved mixed mode ventilasjon 105 kWh/m². Begge ventilasjonsløsningene oppfyller dermed kravet satt i standarden.

Ved årssimulering av mixed mode ventilasjon er effektbehovet til oppvarming 85,7 kW sammenlignet med mekanisk balansert ventilasjon på 57,7 kW. Ved mixed mode ventilasjon benyttes vinduer for tilluft som til ulike tider av året står åpne og medfører lavere innetemperatur. Forskjellen i effektbehov skyldes at det ved simulering benyttes ideell oppvarming i rommene, som vil sørge for å tilføre nødvendig varme for å opprettholde innstilt settpunkttemperatur.

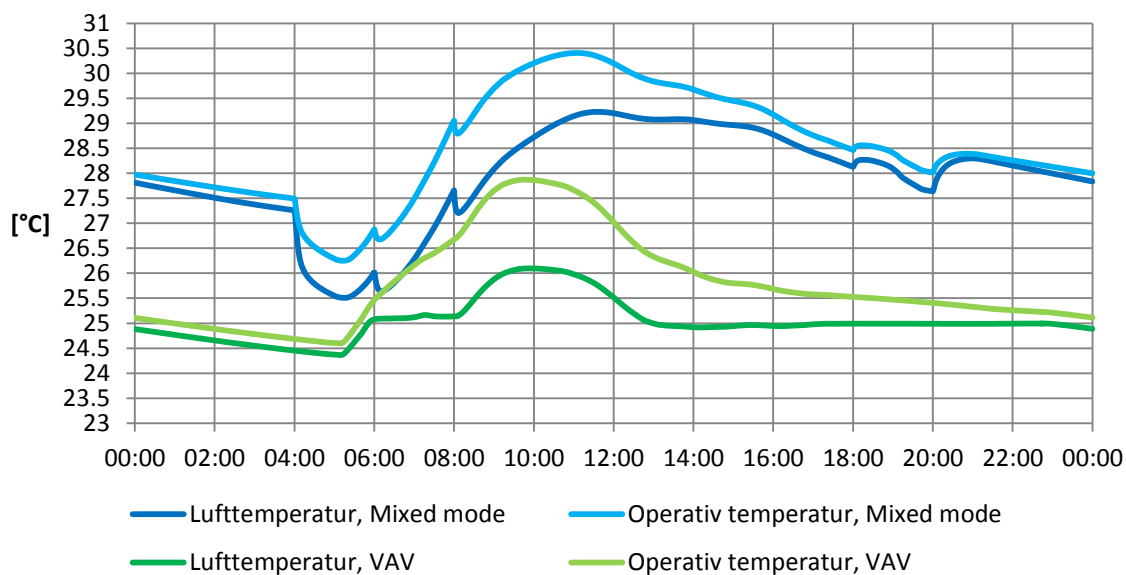
I kontrollstrategien for vinduslufting ble CO₂-verdiene i PI-regulatoren endret til å åpne vinduene ved CO₂-verdier fra 1200 til 1300 ppm. Åpningen av vinduet er imidlertid begrenset til 0,5 som tilsvarer halv åpning for å unngå store temperaturfall. Ved å tillate høyere CO₂-konsentrasjon og begrense vindusåpningen unngås store temperaturfall om vinteren som medfører energibesparelser og redusert oppvarmingsbehov i kalde perioder. Imidlertid kan høye CO₂-nivåer medføre ubehag for lærere og elever ved redusert luftkvalitet.

Avtrekket til mixed mode modellen styres etter en kontrollstrategi som reduserer avtrekk, og dermed energiforbruk til viftedrift, i ugunstige perioder. Ved sommer- og vintersimulering for VAV-modellen er effektbehov til ventilasjon henholdsvis 23,3 kW og 8,3 kW, mens effektbehovet for mixed mode ventilasjon er 13,5 kW om sommeren og 0 kW om vinteren. Effektbehovet til ventilasjonen består i hovedsak av drift av vifte. Det lave effektbehovet ved vinduslufting skyldes at i kalde perioder kjøres avtrekksviften på 0 – 2,5 prosent avtrekk i driftstiden, som gir tilnærmet null utslag på ventilasjonseffekten. Dette kan også observeres ved små avtrekksluftmengder i denne perioden. I perioder med lave utetemperaturer vil også avtrekket reduseres for å unngå høyt energiforbruk da det ikke benyttes varmegjenvinning.

For VAV-modellen er effektbehovet for kjøling 23 kW om sommeren og 0 kW på vinteren, mens for mixed mode løsningen er dette effektbehovet 0 kW både vinter og sommer. Effektbehovet for mixed mode modellen reduseres også ved at det ikke benyttes noen annen form for kjøling enn tilluft gjennom vinduer. Dette medfører et lavere effektbehov for kjøling, men samtidig en fare for underventilasjon og høye temperaturer om sommeren når temperaturforskjellen mellom inne- og uteluft er liten.

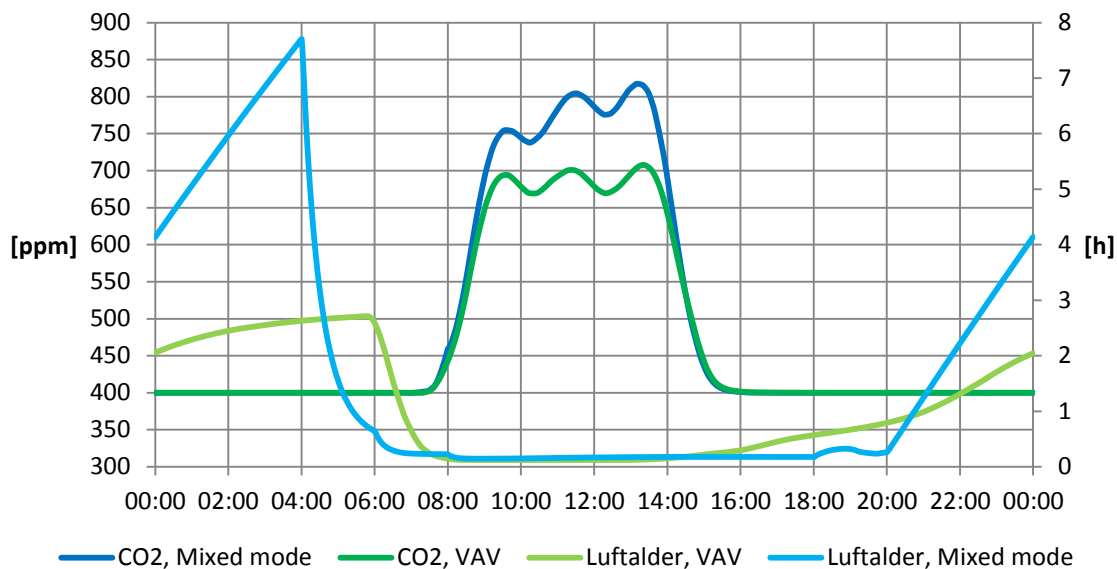
8.3.2. Scenario 1: Termisk og atmosfærisk komfort, sommersimulering

Figur 55 viser termiske forhold i klasserom 101 ved sommersimulering av mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon.



Figur 55: Termiske forhold i klasserom 101 ved sommersimulering

Figur 56 viser atmosfæriske forhold i klasserommet ved sommersimulering.



Figur 56: Atmosfæriske forhold i klasserom 101 ved sommersimulering

Resultatene fra simuleringene ved syntetisk sommerklima viser at mixed mode modellen har høyere temperaturer i klasserommene enn VAV-modellen. Dette er ingen overraskelse da VAV-systemet har mulighet til å kjøle tilluften, mens vinduslufting utelukkende bygger på tilluft fra omgivelsene. Syntetisk sommerklima som benyttes ved simulering tilsvarer en varm sommerdag som her betraktes som «verste scenario». Fra simuleringen kommer det tydelig frem at mixed mode løsningen har problemer med overskuddsvarme på sommeren, med maksimum temperaturer over 30 °C, da løsningen ikke benytter noen form for kjøling. Ved samme scenario krever VAV-modellen et effektbehov for kjøling på 23 kW og klasserommene har fortsatt høye luft- og operative temperaturer.

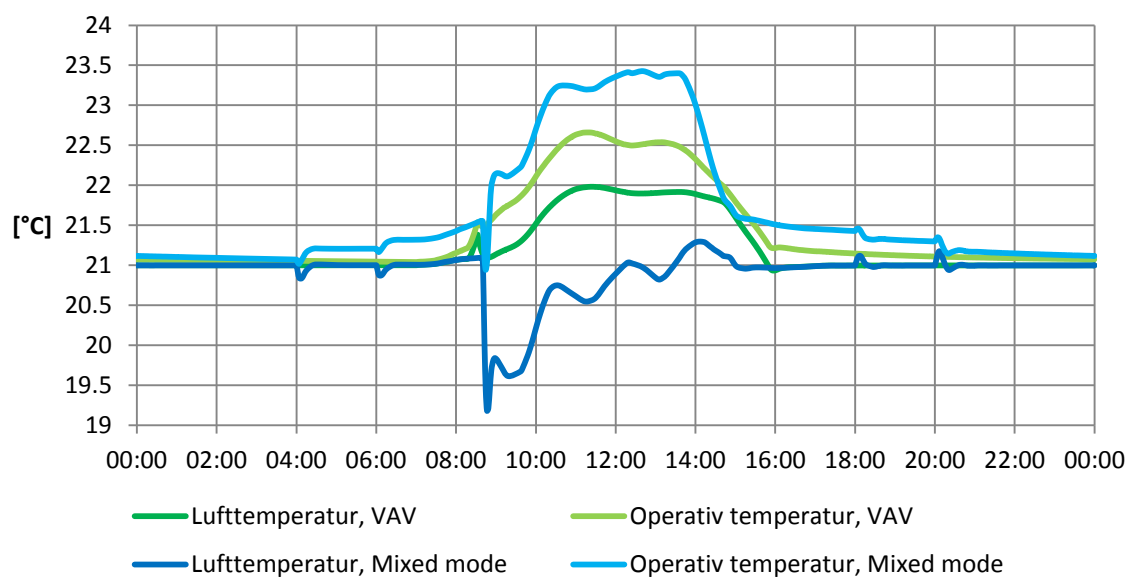
For klasserommet i første etasje er kjøling i VAV-modellen ikke tilstrekkelig for å holde romtemperaturen under innstillingsverdien på 25 °C. Klasserommet i andre etasje overskrider også denne verdien, men oppnår bedre resultater for begge modellene grunnet solavskjerming. Disse resultatene viser at solavskjerming kan være avgjørende for å redusere høye temperaturer i klasserommene. Det antas at ved bedre solavskjerming enn det som er til stede i modellene kan temperaturene være akseptable, i det minste store deler av døgnet.

Ved sommersimulering ligger CO₂-konsentrasjonen for VAV-modellen på 1000 ppm i driftstiden, mens for mixed mode ventilasjon ligger CO₂-konsentrasjonen på 1200 ppm. Dette kan forklares ved at kontrollstrategien for mixed mode vinduslufting først slår inn ved CO₂-nivåer fra 1200 til 1300 ppm, mens for VAV-modellen er dette nivået begrenset fra 700 til 1000 ppm. Luftskifteeffektiviteten, eller luftalderen, gir et mål på hvor lenge luften har vært i rommet. Mixed mode modellen har en høy luftalder før driftstiden starter, som antyder at luftskifte er dårligere utenfor driftstiden, da avtrekk og vinduslufting ikke opererer. Dette kan også observeres etter endt driftstid da luftalderen stiger relativt raskt. For VAV-modellen varierer imidlertid luftmengdene etter belastning. I driftstiden har begge løsningene jevnt over et like godt luftskifte da luftalderen er lav.

Dersom nattkjøling og friskluftstyring hadde vært benyttet i sommerhalvåret ville den naturlige ventilasjonen kjølt ned bygget gjennom natten slik at akkumulert overskuddsvarme ble fjernet. Kombinasjonen av frisk luft om morgenen og en nedkjølt bygningskropp gir bedre mulighet for tilfredsstillende temperaturer og luftkvalitet utover dagen.

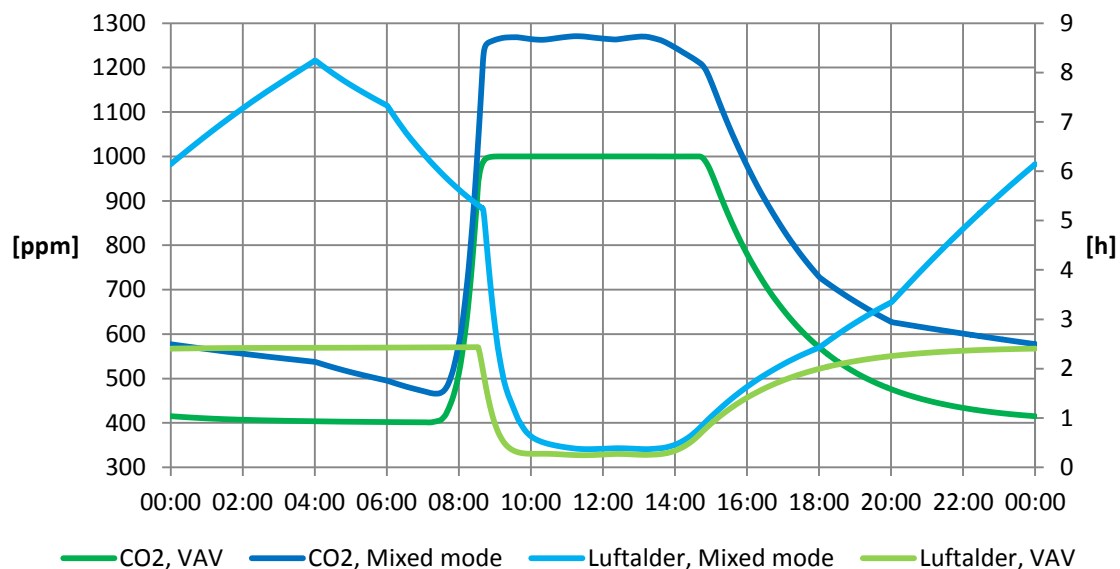
8.3.3. Scenario 2: Termisk og atmosfærisk komfort, vintersimulering

Figur 57 viser termiske forhold i klasserommet ved vintersimulering av mekanisk balansert- og mixed mode ventilasjon.



Figur 57: Termiske forhold i klasserom 101 ved vintersimulering

Figur 58 viser atmosfæriske forhold i klasserommet ved vintersimulering.



Figur 58: Atmosfæriske forhold i klasserom 101 ved vintersimulering

I mixed mode modellen vil det være lite avtrekk i kalde perioder som medfører mindre energibruk. Denne avveiningen er tatt for å redusere energiforbruk, men det er også viktig å ta hensyn til temperaturer og CO₂-konsentrasjon i oppholdssonen. Resultatene fra simuleringene ved syntetisk vinterklima viser at mixed mode løsningen har lavere temperaturer i klasserommene enn VAV-modellen. Ved vintersimulering benyttes syntetisk vinterklima som tilsvarer en kald vinterdag og kan betraktes som «verste scenario». På starten av dagen stiger CO₂-konsentrasjonen raskt og mixed mode modellen åpner vinduene for utluftning. Da det er veldig kaldt ute fører dette til lave innnetemperaturer på omlag 19 °C i klasserommet og det tar flere timer før temperaturen når 21 °C. VAV-modellen klarer derimot å holde temperaturen over settpunkt på 21 °C gjennom skoledagen.

Ved vintersimulering er CO₂-konsentrasjonen for VAV-modellen mellom 650 og 700 ppm i driftstiden, mens for mixed mode løsningen ligger CO₂-konsentrasjonen mellom 750 og 800 ppm. Dette kan forklares ved at kontrollstrategien for mixed mode vinduslufting først slår inn ved CO₂-nivåer fra 1200 til 1300 ppm, mens for VAV-modellen er dette nivået begrenset fra 700 til 1000 ppm. For begge løsningene ligger CO₂-nivået innenfor anbefalt grense fra Folkehelseinstituttet. Luftalderen er tilnærmet lik sommersimuleringen i driftstiden, men for mixed mode modellen faller ikke luftalderen før driftstiden starter.

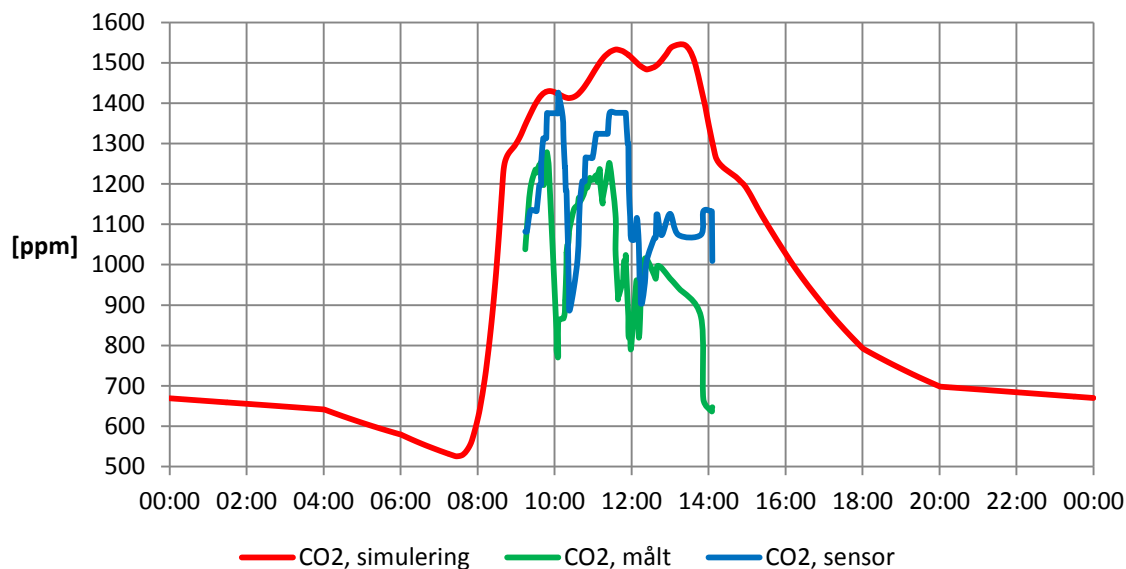
9. Bruk av måledata for å verifisere simuleringer

For å verifisere målingene mot simuleringsmodellen er det utført sammenligninger av resultater fra modellen for mixed mode ventilasjon og måledata fra målingene utført ved skolen. Målingene ble utført 8. oktober i klasserom 101 og resultatene fra simuleringer er hentet ut for samme dato og klasserom.

Det er vanskelig å verifisere målingene mot simuleringsresultatene da simuleringsmodellen er bygget opp annerledes enn for det faktiske bygget. Kontrollstrategien for vinduslufting er satt opp til å regulere tilluft etter innetemperatur og CO₂-konsentrasjon, mens avtrekket regulerer etter inne- og utetemperatur. For Brunla ungdomsskole benyttes innendørssensorer for temperatur, CO₂-konsentrasjon og luftfuktighet. I tillegg benyttes en værstasjon som omfatter sensorer for vindhastighet og vindretning, samt temperatur og nedbør. De ulike sonene styres på bakgrunn av C_p-verdier for ulike vindretninger som er bestemt fra CFD-beregninger, vindretning og vindhastighet. I simuleringsmodellen er ikke vindhastighet, vindretning eller luftfuktighet kontrollert. I tillegg mangler en fullstendig CFD-beregning for å sette opp modellen tilsvarende løsningen ved Brunla ungdomsskole.

For sammenligning av simuleringsmodellen mot målingene utført er mixed mode modellen satt opp som tidligere forklart. Værdata benyttet ved simulering er fra Osloklima, mens skolen ligger i Larvik, som også bidrar til at simuleringsresultatene avviker fra målingene utført. Ved simulering av 8. oktober er det benyttet en periodisk, custom, simulering. Denne simuleringen tilsvarende en periodisk tilstand, hvor en bestemt tidsperiode er simulert til systemet har stabilisert seg.

Figur 59 viser CO₂-konsentrasjon ved simulering sammenlignet med målinger. Den røde linjen i figuren er CO₂-konsentrasjonen fra modellen, mens resterende linjer tilsvare måling utført ved avtrekk og måling hentet fra SD-anlegget. Målingene fra skolen er utført i tidsrommet fra 09.30 til 14.00, mens simuleringsmodellen viser variasjonen over et døgn.

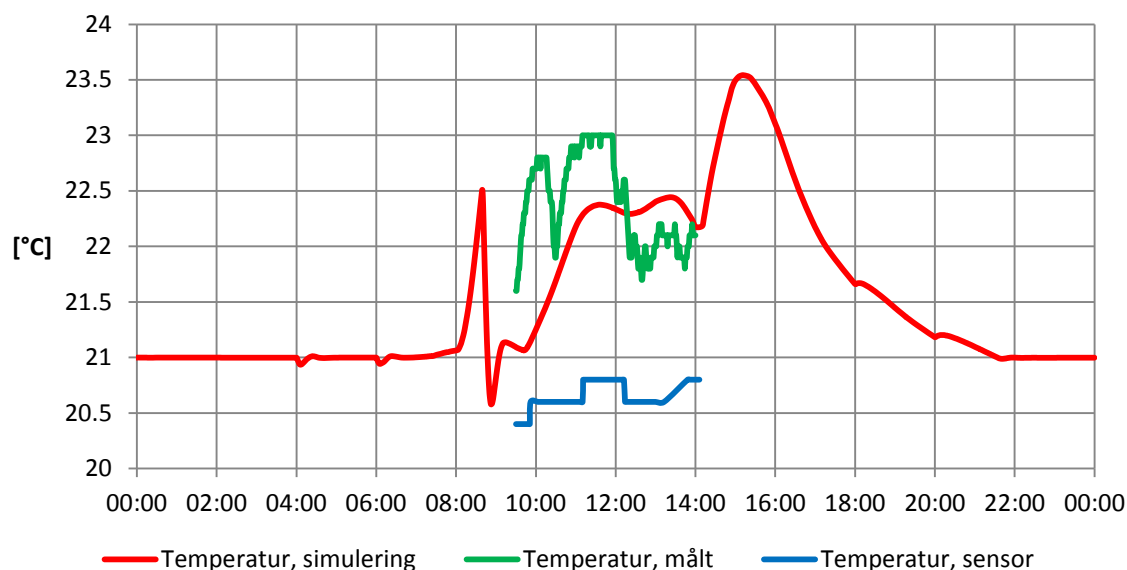


Figur 59: CO₂-konsentrasjon ved simulering sammenlignet med målinger

Fra figuren ligger simuleringsmodellens CO₂-konsentrasjonen over 400 ppm på starten av dagen, som er satt opp som uteluftens CO₂-nivå. Dette kan tyde på at vindu- og avtrekksstyringen ikke har klart å fjerne akkumulert CO₂-konsentrasjon fra dagen før. Når avtrekket i modellen starter på halv drift klokken 04.00 er det en forbedring i CO₂-nivået frem til elevene ankommer klasserommet. Fra klokken 08.00 stiger CO₂-konsentrasjonen til 1400 og videre til 1500 ppm. CO₂-nivået varierer mellom disse verdiene frem til skoledagen er over og elevene forlater rommet. Etter klokken 16.00 synker CO₂-konsentrasjonen gradvis til den er tilbake på startverdien på 700 ppm. For målingene er det jevnt over registrert lavere CO₂-nivå med større variasjon i løpet av dagen.

Da CO₂-konsentrasjonen for dagssimuleringen overstiger verdier fra årssimuleringen ser det ut til at programmet gjentar flere kalde døgn etter hverandre ved dagssimulering. Videre observeres det også at CO₂-konsentrasjonen starter og avslutter på samme verdi. Ved lave temperaturer over flere døgn vil vinduet ha liten eller ingen åpning og dermed resultere i høye CO₂-konsentrasjoner. Denne gjentakelsen av kalde døgn gjør det vanskelig å sammenligne resultatet fra simulering mot målingene utført.

Figur 60 viser temperaturvariasjonen fra simuleringsmodellen sammenlignet med målte temperaturer. Den røde linjen er temperaturen fra modellen, mens resterende linjer tilsvarer målte verdier.

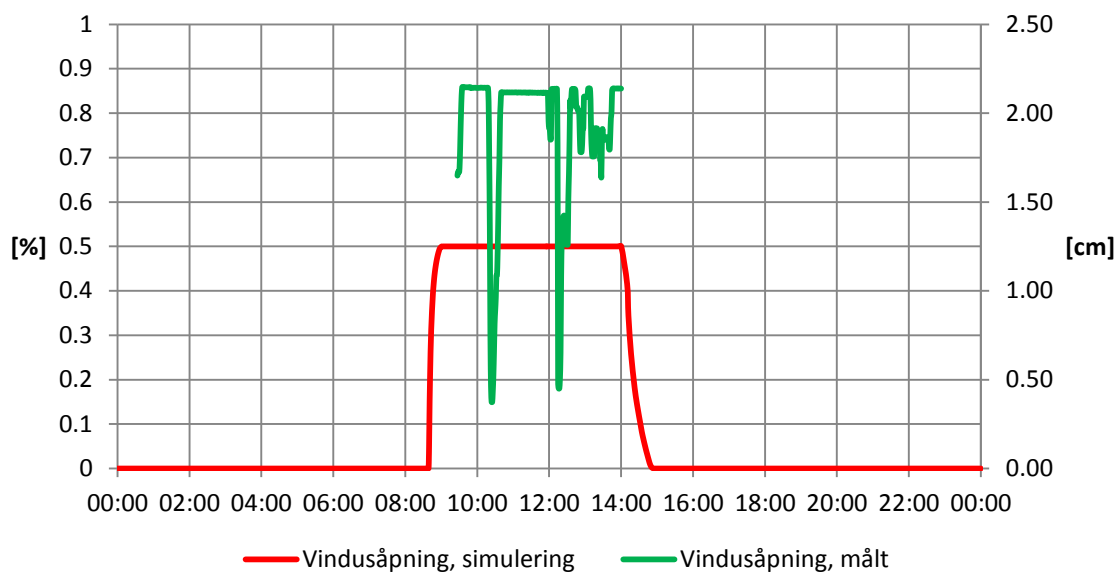


Figur 60: Temperaturvariasjon ved simulering sammenlignet mot målinger

For resultatet hentet fra simuleringsmodellen gjentar mønsteret seg som ovenfor, hvor temperaturen starter og avsluttes på samme nivå. På starten av skoledagen øker temperaturen, men synker raskt når vinduet åpnes. Videre øker temperaturen utover dagen til maksimum temperatur på 23,5 °C omlag klokken 15.00. Brukerbelastningen for bygget er satt frem til klokken 14.00, mens driftstiden for interne laster til klokken 16.00. Da elevene forlater bygningen synker temperaturen gradvis mot 21 °C. Ved målinger er det observert noe høyere temperaturer i bygget fra 09.00 til 12.00, men ellers ligger målingen rundt samme temperaturnivå.

Figur 61 viser variasjon i vindusåpning ved simuleringsmodellen og målt vindusåpning. Den røde linjen i figuren viser vindusåpningen ved simulering i prosent, mens den grønne linjen viser målt åpning på vinduet i centimeter. For simuleringsmodellen åpnes vinduet til halv åpning omlag klokken 09.00 da CO₂-nivået i sonen overstiger settpunktet. Videre står vinduet i maksimal åpning på 50 prosent, grunnet lave utetemperaturer, frem til klokken 14.00. Da CO₂-nivået synker under øvre settpunkt litt over klokken 14.00 og videre under nedre settpunkt klokken 15.00, stenges vinduet gradvis. For målt vindusåpning er det større variasjon, da åpningen varierer mellom omlag 0,35 og 2,20 centimeter i måleperioden. Da simuleringsmodellen gir ut vindusåpningen i prosent er det vanskelig å sammenligne disse

verdiene med målte verdier. Videre er det grunn til å tro at ved 50 prosent åpning i simuleringsmodellen «fjernes» halve vinduet, mens i virkeligheten benyttes topphengte vinduer som gir en fastsatt åpningsgrad på vinduets nederste del.



Figur 61: Vindusåpning ved simulering sammenlignet med målt åpning på vinduet

10. Konklusjon

I dag oppholder mange mennesker seg innendørs mesteparten av døgnet. Inneklima har derfor stor innvirkning på helse, trivsel og prestasjonsevne. Barn og unge er sårbare for dårlig innemiljø og påvirkes derfor lettere av dårlig luftkvalitet enn voksne (Arbeidstilsynet, 2013). Studier har slått fast at høy temperatur, lave luftmengder og dårlig luftkvalitet resulterer i lavere læringsprestasjon (Wargocki & Wyon, 2011). Det er derfor viktig å sikre tilfredsstillende temperatur og luftkvalitet, ved ventilasjon og klimatisering.

Larvik kommune har ved rehabilitering og nybygging av undervisningsbygg benyttet mixed mode ventilasjon. Ved rehabilitering av Brunla ungdomsskole er fasaden oppgradert med ny klimaskjerm og nye vinduer. Ventilasjonsløsningen er basert på en kombinasjon av mekanisk- og naturlig ventilasjon ved bruk av avtrekksvifter og tilluft gjennom automatisk styrte fasadevinduer. Vinduene åpnes og lukkes på bakgrunn av fastsatte verdier for romtemperatur og CO₂-nivå, samt målinger fra en utendørs værstasjon. Værstasjonen er plassert på taket av bygningen og registrerer utetemperatur, regn, vindhastighet og vindretning. Målet med løsningen er å oppnå et godt og dokumenterbart inneklima som tilfredsstiller regler og forskrifter, samt opprettholder eller reduserer eksisterende energiforbruk.

Resultatene fra målingene ved Brunla ungdomsskole viser at temperaturen holder seg på et akseptabelt nivå, mens CO₂-nivået er over anbefalt krav fra Folkehelseinstituttet store deler av dagen ved full brukerbelastning. «CO₂-toppene» i klasserommet oppstår ikke over lengre tid, og synker betraktelig ved pauser hvor driftsformen friskluft benyttes. For å unngå lave temperaturer og trekk vil styringssystemet redusere åpningsvinkelen på vinduet ved lave utetemperaturer, samt ved ugunstig vindretning og vindhastighet. Målingene gir ingen indikasjon på trekk i klasserommet, men fra samtale med ansatte antas en foreliggende risiko for trekk om vinteren, spesielt nær vinduer og høyere i rommet der luften tilføres. Det er ikke utført målinger eller beregninger av tilført luftmengde ved vinduslufting, eller resulterende luftbevegelse i rommet. Flere målinger bør derfor utføres for en endelig konklusjon. Målingene viser imidlertid at det er viktig med et optimalt sensorstyrt system med små avvik, som regulerer vindusåpning og avtrekk etter endringer i termisk komfort og luftkvalitet. I kontrollsystemet er det mulig å benytte et ekstra luftskifte om morgenen før bygget benyttes

og i pauser. Denne driftsformen gir bedre termisk komfort og luftkvalitet ved hjelp av frisk uteluft, og kan benyttes for passiv kjøling av bygningen.

Ved simulering av mixed mode ventilasjon ble ulike reguleringsmessige tiltak benyttet for å optimalisere vindus- og avtrekksstyringen. Avtrekksmengde, settpunkter, størrelse på vindusåpning, driftstid for avtrekk og ulike begrensninger for vindusåpningen med tanke på temperatur og CO₂ ble variert. Fra energi- og effektberegningene er det høyere effektbehov for oppvarming ved vinduslufting, da det benyttes vinduer for tilluft som til ulike tider av året står åpne og medfører lavere innetemperaturer. Ved å tillate høyere CO₂-verdier og begrense vindusåpningen unngås store temperaturfall om vinteren som medfører energibesparelser og redusert oppvarmingsbehov i kalde perioder. Avtrekket styres også etter en kontrollstrategi som reduserer avtrekk og dermed energiforbruk til viftedrift i ugunstige perioder. Imidlertid kan høye CO₂-verdier medføre ubehag for lærere og elever ved redusert luftkvalitet. Effektbehovet reduseres også ved at det ikke benyttes noen annen form for kjøling enn tilluft gjennom vinduer. Dette medfører et lavere effektbehov for kjøling, men samtidig en fare for underventilasjon og høye temperaturer om sommeren når temperaturforskjellen mellom inne- og uteluft er liten. Dersom nattkjøling eller friskluftstyring hadde vært benyttet i sommerhalvåret ville den naturlige ventilasjonen kjølt ned bygget gjennom natten slik at akkumulert overskuddsvarme ble fjernet. Kombinasjonen av frisk luft om morgenen og en nedkjølt bygningskropp gir bedre mulighet for tilfredsstillende temperaturer og luftkvalitet utover dagen.

Oppsettet for vindus- og avtrekksstyringen ble variert for å finne optimal situasjon for å forbedre energibruk og inneklima. Simuleringene inneholder derfor noen usikkerhetsmomenter som kan ha innvirkning på resultatet. Ved årssimulering har skolebygningen et årlig energibehov på 109,5 kWh/m² ved mekanisk balansert ventilasjon, sammenlignet med 105 kWh/m² for mixed mode løsningen. Det bør utføres flere simuleringer, hvor regulering av ulike parametere optimaliseres ytterligere, for en endelig konklusjon.

For å verifisere målingene mot simuleringsmodellen er sammenligninger av resultater fra modellen for mixed mode ventilasjon og måledata fra målingene utført. Det er vanskelig å verifisere simuleringer mot målingene da simuleringsmodellen er bygget opp annerledes enn det faktiske bygget. I tillegg mangler en fullstendig CFD-beregning for å sette opp modellen tilsvarende løsningen ved Brunla ungdomsskole. Værdata benyttet ved simuleringer er fra

Osloklima, mens skolen ligger i Larvik. Dette bidrar også til at resultatene fra simuleringene avviker fra målingene utført.

Praktiske erfaringer fra Brunla ungdomsskole viser at mixed mode ventilasjon gir brukerne større opplevelse av frisk luft og større personlig kontroll over inneklima enn ved konvensjonell ventilasjon. Kontrollsystemet er brukervennlig og gir mulighet for systematisk oppfølging av energiforbruk, samt kartlegging og optimalisering av ventilasjonen. Mens et avansert kontrollsystem kan være gunstig med tanke på redusert energiforbruk vil det også redusere brukervennligheten, og kan i noen tilfeller føre til høyere kostnad for installasjon og vedlikehold. Ved rehabilitering av skolebygninger gir mixed mode løsningen færre bygningsmessige inngrep i skolen. Ved simulering gir løsningen økt oppvarmingsbehov, men samtidig redusert effektbehov til viftedrift og for kjøling. Dersom kontrollsystemet er riktig utformet og drevet kan dette gi redusert energiforbruk ved at bygninger minimerer bruk av oppvarming og avtrekk gjennom store deler av året. Løsningen imøtekommer delvis kravene for termisk og atmosfærisk inneklima, men løsningen for mekanisk balansert ventilasjon kommer bedre ut ved simulering og gir et mer stabilt inneklima.

Forslag til videre arbeid

- Logge inneklimateparametere og vindusåpning over en lengre tidsperiode, også i de kaldeste og varmeste månedene av året for å se på «ekstreme» tilfeller.
- Utføre spørreundersøkelse, både vinter og sommer, for elever og ansatte om trivsel og komfort.
- Undersøke vindusåpning og tilført luftmengde ved vinduslufting, samt resulterende luftbevegelse i rommet ved topphengte vinduer.
- Undersøke luftstrømning i rommet og lokalisere steder med fare for eventuelle forhøyede trekkproblem.
- Optimalisere simuleringsmodellen for mixed mode ventilasjon og sette opp to ulike driftstrategier for sommer- og vinterdrift.
- Benytte passiv nattkjøling ved simuleringer.

Referanser

Algrøy, M. (2013). Energibruk og inneklima i skoler og barnehager med hybrid ventilasjon. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Norge.

Allard, F., Santamouris, M., Alvarez, S. (1998). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James & James.

Arbeidstilsynet (2012). *Veiledning, best.nr. 444. Veiledning om Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*. Nasjonalt folkehelseinstitutt, Oslo: Gyldendal Akademisk.

Arbeidstilsynet. (2013). *Rapport 2013:7. Anbefalte faglige normer for inneklima. Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer*. Nasjonalt folkehelseinstitutt, Oslo.

Bakke, J.V. (2009). *Inneklima i skoler og barnehager – hva er problemene og hvordan kan de løses?* Arbeidstilsynet, Gjøvik.

Boora Architects. *Ash Creek Intermediate School*.

http://www.boora.com/index.php/projects/k-12-schools/ash_creek_intermediate_school.

[Funnet 20. november, 2013].

Bordass, W.T., Leaman, A.J., Willis, S.T.P. (1994). *Control strategies for building services: the role of the user*. UK: Buildings and the Environment conference, BRE, 16-20 May, 1994.

Brager, G.S., Paliaga, G., de Dear, R. (2004). *Operable windows, personal control and occupant comfort*. ASHRAE Transactions, 110(2).

Brager, G.S., Ring, E., Powell, K. (2000). *Mixed-mode ventilation: Hvac meets Mother Nature*. HVAC Systems, Center for the Built Environment, UC Berkeley.

Byggforsk, Byggetal 421.501 (1999). *Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.

Byggforsk, Byggedetaljer 421.505 (2000). *Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.

Byggforsk, Byggedetaljer 552.323 (2005). *Behovsstyrt ventilasjon*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.

Center for the Built Environment (CBE) (2005). *About mixed-mode*. Center for the Built Environment, UC Berkeley.

Daisy, J.M., Angell, W.J., Apte, M.G. (2003). *Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information*. Indoor Air. 13(1): p. 53-64.

de Dear, R.J. & Brager, G.S. (1998). *Towards an adaptive model of thermal comfort and preference*. ASHRAE Transactions 104.

Dokka, T.H. & Vik, T.A. (2001). *Hybrid ventilasjon: Muligheter og barrierer – Eksempler - Kontrollstrategier – Prosjekteringsverktøy*. STF A01015, Trondheim, SINTEF Bygg og miljø.

Ebbehøj, N.E., Hansen, M.Ø., Sigsgaard, T., Larsen, L. (2002). *Building-related symptoms and molds: a two-step intervention study*. Indoor Air. 12(4): p. 273–277.

Fang, L., Wyon, P., Clausen, G., Fanger, P.O. (2004). *Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance*. Indoor Air. 14: p. 74-81.

Fanger, P.O. (2006). *What is IAQ?* Indoor Air. 16(5): p. 328-334.

Fisk, W., Mirer, A., Mendell, M.J. (2009). *Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates*. Indoor Air. 19(2): p. 159-165.

Fisk, W. (2002). *How IEQ affects health, productivity*. Ashrae Journal.

Gjerstad, F.O., Hansen, S.O., Novakovic, V., Thue, J.C. & Wangensteen, I. (2007). *Enøk i bygninger. Effektivt energibruk*. (3. utg.). Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS.

Hanssen, S. O. (2007). *Feilanalyse. I: V. Novakovic, red. Enøk i bygninger. Effektivt energibruk*. Trondheim: Gyldendal undervisning, p. 376-380.

Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D.J., Shaughnessy, R.J. (2010). *Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement*. Indoor Air. 21(2): p. 121-131.

Heiselberg, P. (2002). *Principles of hybrid ventilation*. Denmark: KOMMUNIK Grafiske Løsninger A/S.

Heiselberg, P., Bjørn, E., True, J.P.J. (2001). *Udvikling af brugervenligt styringssystem for naturlig ventilation*. Aalborg Universitet, Danmark.

Heiselberg, P., Svidt, K., Nielsen, P.V. (2001). *Characteristics of airflow from open windows*. Building and Environment. 36(7): p. 859-869.

Herkel, S., Knapp, U., Pfafferott, J. (2008). *Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings*. Building and Environment. 43(4): p. 588-600.

Islington (2012). *Low energy cooling, Good Practice Guide 5*.
[http://www.islington.gov.uk/publicrecords/library/Planning-and-building-control/Publicity/Public-consultation/2012-2013/\(2012-12-20\)-Good-Practice-Guide-5-Low-energy-cooling.pdf](http://www.islington.gov.uk/publicrecords/library/Planning-and-building-control/Publicity/Public-consultation/2012-2013/(2012-12-20)-Good-Practice-Guide-5-Low-energy-cooling.pdf). [Funnet 12. november, 2013]

Ito, K. & Murakami, S. (2010). *Cost-effectiveness Analysis of Improved Indoor Temperature and Ventilation Conditions in School Buildings*. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 9(2): p. 523-529.

Kjeldsen, B.U., Toftum, J., Wargocki, P., Clausen, G. (2013). *SAMMENHÆNG MELLEM LUFTKVALITET I GRUNDSKOLER OG ELEVERS INDLÆRING*. Technical University of Denmark, Denmark.

- Kleiven, T. (2003). *Natural Ventilation in Buildings. Architectural concepts, consequences and possibilities*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Norge.
- Lan, L., Wargocki, P., Lian, Z. (2011). *Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort*. *Energy and Buildings*. 43(5): p. 1057-1062.
- Mendell, M.J., Eliseeva, E.A., Davies, M.M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W.J., Apte, M.G. (2013). *Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools*. *Indoor Air*. 23: p. 515-528.
- Mochida, A., Yoshino, H., Takeda, T., Kakegawa, T., Miyauchi, S. (2005). *Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve indoor thermal comfort*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 93(6): p. 437-449.
- Nilsson, P.E. (2003). *Achieving the desired indoor climate*. Denmark: The Commtech Group.
- Norges Astma- og Allergiforbund (NAAF), SINTEF og Husbanken.
<http://www.naaf.no/no/subsites/drift-og-helse/tekniskelosninger/ventilasjon/naturlig-ventilasjon/>. [Funnet 10. oktober, 2013].
- Norsk VVS (1969). *Regler for beregning av bygninger varmebehov*. Oslo: Norsk VVS.
- Norsk Standard NS 3031 (2011). *Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data*. Standard Norge.
- Norsk Standard NS-EN ISO 7730 (2005). *Ergonomi i termisk miljø - Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*. Standard Norge.
- Park, J.S. & Yoon, C.H. (2011). *The effects of outdoor air supply rate on work performance during 8-h work period*. *Indoor Air*. 21(4): p. 284–290.

- Roetzel, A., Tsangrassoulis, A., Dietrich, U., Busching, S. (2010). *A review of occupant control on natural ventilation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14(3): p. 1001-1013.
- Satish U, M.M., Shekhar K, Hotchi T., Sullivan D, Streufert S., Fisk, W.J. (2012). *Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance*. Environmental Health Perspective. 120(12): p. 1671-1677.
- Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., Cancianie, M., Sestini, P., Viegi, G. (2010). *School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children*. Eur Respir J. 35(4): p. 742-749.
- Shaughnessy, R.J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A. and Moschandreas, D. (2006). *A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance*. Indoor Air. 16(6): p. 465–468.
- Spindler, H.C. & Norford, L.K. (2009). *Naturally ventilated and mixed-mode buildings—Part II: Optimal control*. Building and Environment. 44(4): p. 750-761.
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W.W., Cain W.S, Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A. K., Pickering, A. C., Samet, J. M., Spengler, J. D., Taylor, S. T., Weschler, C. J. (2011). *Commemorating 20 years of Indoor Air Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature*. Indoor Air. 21(3): p. 191-204.
- Sørensen, H.H., Stampe, O.B., Ludvigsen, F.H. (2004). *Ventilation Ståbi*. 2. utgave, 3. opplag. København: Teknisk Forlag A/S.
- Teknisk forskrift (2010). *Forskrift om krav til byggverk og produkter i byggverk (TEK)*.
- The Carbon Trust (2012). *A natural choice. Lessons learned from low carbon buildings with natural ventilation*. <http://www.carbontrust.com/media/81365/ctg048-a-natural-choice-natural-ventilation.pdf>. [Funnet 18. november, 2013].

The Oregon Office of Energy (2002). *Case Study: Ash Creek Intermediate School*.
<http://www.oregon.gov/energy/CONS/school/docs/ashcreek.PDF>. [Funnet 18. oktober, 2013].

Twardella, D., Matzen, W., Lahrz, T., Burghardt, R., Spegel, H., Hendrowarsito, L., Frenzel, A., Fromme, H. (2012). *Effect of classroom air quality on students' concentration: results of a cluster-randomized cross-over experimental study*. Indoor Air. 22(5): p. 378-387.

Wargocki, P. & Wyon, D.P. (2011). *The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classroom on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)*. HVAC&R Research. 13(2): p. 165-191.

Wargocki, P. & Wyon, D.P. (2011). *The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)*. HVAC&R Research. 13(2): p. 193-220.

WindowMaster A/S. *Komplet anlæg og Styresystem for Naturlig Ventilation, NV AdvanceTM*.
Kjeldsen, J.A: WindowMaster A/S.

WindowMaster A/S (2004). *NV AdvanceTM Betjeningsvejledning*. WindowMaster A/S.

Wyon, D.P. & Wargocki, P. (2006). *Indoor air quality effects on office work. Creating the Productive Workplace*.

Wyon, D.P. & Wargocki, P. (2006). *Research Report on Effects of HVAC On Students Performance*. ASHRAE Journal. 48.

Vedlegg 1: Beskrivelse av ulike bygg ved Brunla ungdomsskole

Ved Brunla ungdomsskole er el-tavlene ved skolen i ferd med å bygges om. Tegninger som er benyttet for å sette opp simuleringsmodellene er hentet inn og bygning C er lagt ved.

Oversikt over de ulike byggene:

Bygning A: Svømme- og gymavdeling med garderober og dusj. Oppvarming av gymsal, dusj og garderober skjer ved et varmebatteri som blåser inn varmluft, og radiatorer i dusj og garderober. Svømmebassenget har et Danterm 5000 anlegg fra 2002. Dusj og garderober har et gammelt elektrisk Villaventanlegg. Bygning A benytter ikke løsningen fra WindowMaster.

Bygning B: Aktivitetsavdeling med sløyd, kunst og håndverk, samt et datarom. Dette bygget benytter løsningen fra WindowMaster.

Bygning C: Klasseromavdeling over to etasjer med læreravdeling. Denne bygningen benytter løsningen fra WindowMaster.

Bygning D: Familiesenter med bomberom i kjeller. Rehabiliteret i 2010 og benytter nå vannbåren radiatorvarme. Har også noen rom med elektriske varmekabler. Bygning D benytter ikke løsningen fra WindowMaster.

Bygning E: Nybygg på 430 m² som stod ferdig i 2005. Første etasje rommer mediatek, datalab og hovedinngang. Bygningen benytter gulvboren varme i rør. I kjelleren er det musikkrom og et lager på cirka 222 m². Her benyttes elektriske varmeovner, men gulvrørene for første etasje, som ligger i taket i forhold til kjelleren, bidrar også til oppvarming. Har balansert ventilasjonsanlegg med varmegjenvinning og benytter ikke løsningen fra WindowMaster

Totalt areal 5666 m²

Vedlegg 2: Energiforbruk

Annen strøm måler 14133:

2013: 306 413 kWh

2012: 365 870 kWh

2011: 328 766 kWh

Elkjel måler 14146:

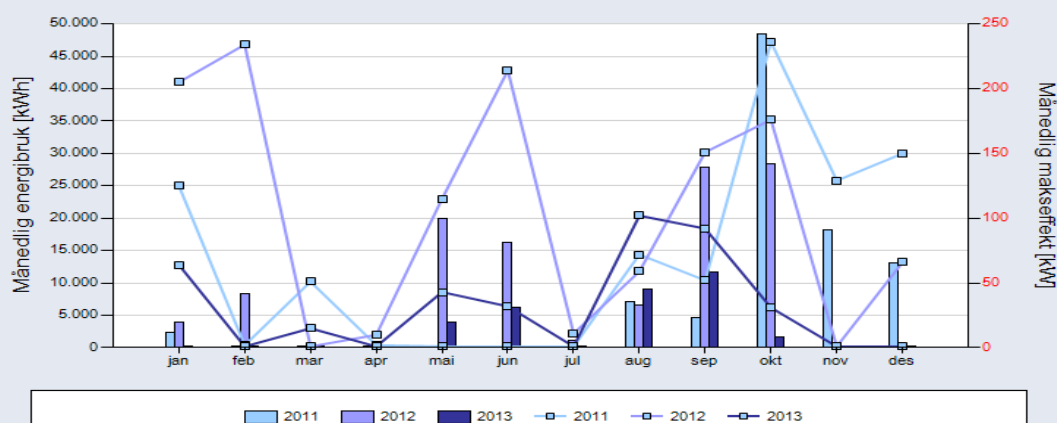
2013: 32 972 kWh

2012: 113 276 kWh

2011: 94 154 kWh

Timesmålte anlegg | Profilmålte anlegg | Alle anlegg

EVEIEN BRUNLA UNGDOMSSKOLE ELK Vardeveien 34 , 3294 STAVERN 56179370, 250



Energi [kWh]

År	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	Totalt
2011	2.388	66	189	82	76	34	30	7.107	4.601	48.459	18.113	13.009	94.154
2012	4.014	8.414	86	81	19.978	16.328	1.152	6.574	27.926	28.311	37	375	113.276
2013	143	30	69	36	3.973	6.213	33	8.995	11.707	1.719	27	27	32.972

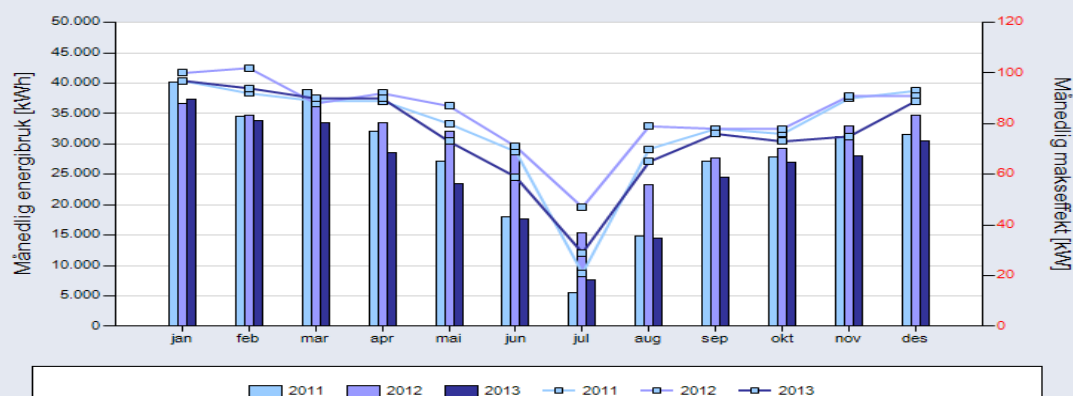
Effekt [kW]

År	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
2011	125	2	51	2	1	1	1	72	52	236	129	150
2012	205	234	1	10	115	214	11	59	151	176	1	66
2013	64	1	15	1	43	32	1	102	92	31	1	1

Velg energibærer: **ALLE** Alle **EL** Fastkraft

Timesmålte anlegg | Profilmålte anlegg | Alle anlegg

DEVEIEN 34 BRUNLA UNGDOMSSKOLE Vardeveien 34 , 3294 STAVERN 56183642, 2501



Energi [kWh]

År	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	Totalt
2011	40.108	34.499	38.890	32.073	27.154	17.968	5.469	14.779	27.145	27.885	31.269	31.527	328.766
2012	36.620	34.780	36.855	33.496	32.085	28.639	15.406	23.220	27.720	29.315	33.037	34.697	365.870
2013	37.418	33.789	33.445	28.605	23.399	17.588	7.647	14.516	24.526	27.016	28.031	30.433	306.413

Effekt [kW]

År	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
2011	97	92	89	89	80	69	21	70	78	76	90	93
2012	100	102	88	92	87	71	47	79	78	78	91	91
2013	97	94	90	90	73	59	29	65	76	73	75	89

Velg energibærer: **ALLE** Alle **EL** Fastkraft

Vedlegg 3: Ulike driftsformer

- **Lukket:** Systemet holder vinduene lukket og tillater ikke manuell håndbetjening.
- **Manuell styring, håndbetjening:** Ved manuell styring er vinduene manuelt styrt, men sikkerhetsfunksjoner som regn, vind og lignende kan overstyre eventuelle åpninger.
- **Pulsventilasjon:** Pulsventilasjon er et typisk valgt under vinterdrift hvor man ønsker et luftskifte i sonen for å sikre god luftkvalitet. Ved pulsventilasjon åpnes vinduene på faste tidspunkt i løpet av døgnet. Hver pulsutluftning er en tidsbegrenset åpning som utfører et forutbestemt luftskifte. Vinduets åpningsgrad er bestemt av pulstiden (åpningstiden), ønsket luftskifte, utendørstemperatur samt fasadens orientering i forhold til vindretning og vindstyrke. I soner med CO₂ måling vil pulsutluftningen utføres såfremt CO₂-nivået overstiger en fastsatt grense, for eksempel 800 ppm.
- **Komfortventilasjon, temperaturstyrt drift:** Komfortventilasjon er et typisk valg om sommeren hvor kjøling oftest er ønskelig. Under denne driftsformen vil vinduene kontinuerlig åpnes eller lukkes for å holde den ønskede romtemperatur (settpunkt). I tilfeller hvor romtemperaturen er under settpunkt (og vinduene derfor holdt lukket) vil systemet kunne skifte til spalte- eller pulsventilasjon inntil romtemperaturen igjen overstiger settpunktet, og driftsformen skifter tilbake til komfortventilasjon. I soner med CO₂ måling vil en økning i CO₂-nivået (over en fastsatt grense) forskyve temperatursettpunktet og dermed føre til en åpning for å oppnå den ønskede luftkvaliteten. I perioder med synkende utendørstemperaturer reduseres maksimalt tillatelig luftskifte under kjøling av sonen for å unngå trekk.
- **Optimert nattkjøling:** I løpet av dagen oppsummerer en energiteller overskuddsvarmen som bygningen i varme perioder har akkumulert. Ved hjelp av optimert nattkjøling utnyttes nattens lavere utendørstemperatur for å fjerne overskuddsvarme fra dagen før, og samtidig kjøle bygningens konstruksjoner som utnyttes til passiv kjøling dagen etter.
- **Friskluft:** Friskluft gir sonen en utlufting på et eller flere forutbestemte tidspunkter. Luftskifte ved friskluft er konstant, men avsluttes først når den etterfølgende driftsformen

settes i drift. Friskluft benyttes oftest tidlig om morgenen før bygningen tas i bruk for å sikre et frisk innneklima til bygget tas i bruk.

- **Temperaturstyring med begrenset åpning:** Driftsformen har samme funksjon som komfortventilasjon, men med begrenset åpningsgrad i %. Formålet er å kjøle bygningen i perioder hvor den ikke er i bruk, for eksempel i helger.
- **Spalteventilasjon:** Ved spalteventilasjon vil vinduene kunne åpnes til en fastsatt åpningsgrad (spalte) for å skape grunnventilasjon, for eksempel som ved en vindusventil /spjeld. Spalteventilasjon kan benyttes i kombinasjon med komfortventilasjon eller som grunnventilasjon mellom pulsventilasjon. I soner med CO₂ måling styres åpningsgraden av CO₂-nivået soner med CO₂ måling styres åpningsgraden av CO₂-nivået og kan derfor være et alternativ til pulsventilasjon.
- **Værbasert sikkerhetsfunksjoner:** Systemet kan lukke vinduene til en bestemt minimumsgrad i tilfeller med regn eller høye vindhastigheter.
- **Reguleringsparameter og åpningsgrad:** For alle driftsformer kan reguleringsparameter endres i forhold til brukernes komfortgrenser. Alle driftsformer kan enkeltvis begrense den maksimale åpningsgrad.

Vedlegg 4: Risikovurdering, feltmålinger

I masteroppgaven skal jeg besøke og gjøre målinger ved Brunla ungdomsskole i Larvik. Hensikten med målingene er å undersøke inneklimate og energibruk. Målingene som skal utføres er målinger av CO₂-konsentrasjon, temperatur og lufthastighet. Forsøket vil bli utført i et vanlig klasserom og i avtrekk over korridor. Vaktmester ved Brunla skal bistå med hjelp til å sette opp utstyr og tilgang til bygget.

Ved logging av CO₂-konsentrasjon og lufthastighet vil håndholdte målere plasseres nær avtrekk. For temperatur-logging vil dataloggere plassert i klasserommet benyttes. For måling av lufthastighet vil håndholdte målere plasseres på ulike steder i klasserommet. Alle målere vil behandles og festes på en forsvarlig måte, og målingene vil bli utført i høyder fra gulv- til taknivå. Arbeidsoppgavene som kan føre til risiko for skade på mennesker, materiell/utstyr eller ytre miljø:

- Utstyret kan falle ned/skades ved montering;
Sannsynlighet: svært liten
Konsekvenser: kan treffe en person, kan ødelegge utstyr
Minimere/ redusere risiko: feste alt måleutstyr på en forsvarlig måte, planlegge målinger og plassering på forhånd
- Elever kan ødelegge utstyr;
Sannsynlighet: svært liten
Konsekvenser: kan ødelegge utstyr
Minimere/ redusere risiko: feste alt måleutstyr på en forsvarlig måte, tilstedeværelse, opplyse elevene om hva utstyret skal benyttes til og gi beskjed om ikke røre utstyret
- Skader ved bruk av gardintrapp;
Sannsynlighet: svært liten
Konsekvenser: kan ødelegge utstyr, skade på personer
Minimere/ redusere risiko: passe på å benytte trappa på en forsvarlig måte, få hjelp av vaktmester til å sette opp

Vedlegg 5: Datablad for sensor benyttet i klasserom

Data sheet
AMUN 716 KNX
Article number: 7169200

SYSTEMS
KNX

AMUN 716 KNX

Article number: 7169200

Description

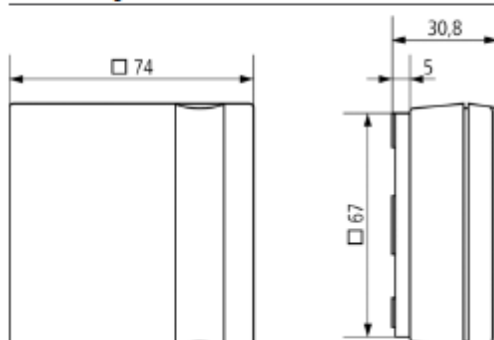


- CO2 airquality sensor
- Measures CO2 level, relative humidity and temperature
- Three independent, configurable thresholds for the CO2 level and relative humidity
- A threshold for the temperature
- Actions can be carried out if thresholds are exceeded or not reached (send, priority, switching, value)
- Display of achieved threshold of CO2 level and relative humidity through multi-coloured LEDs
- CO2 setting range of 500-2250 ppm (threshold)
- Relative humidity of 1 % to 100 %
- "Physical value" object of 0-9999 ppm
- Power supply via KNX bus voltage, 230 V mains supply not required

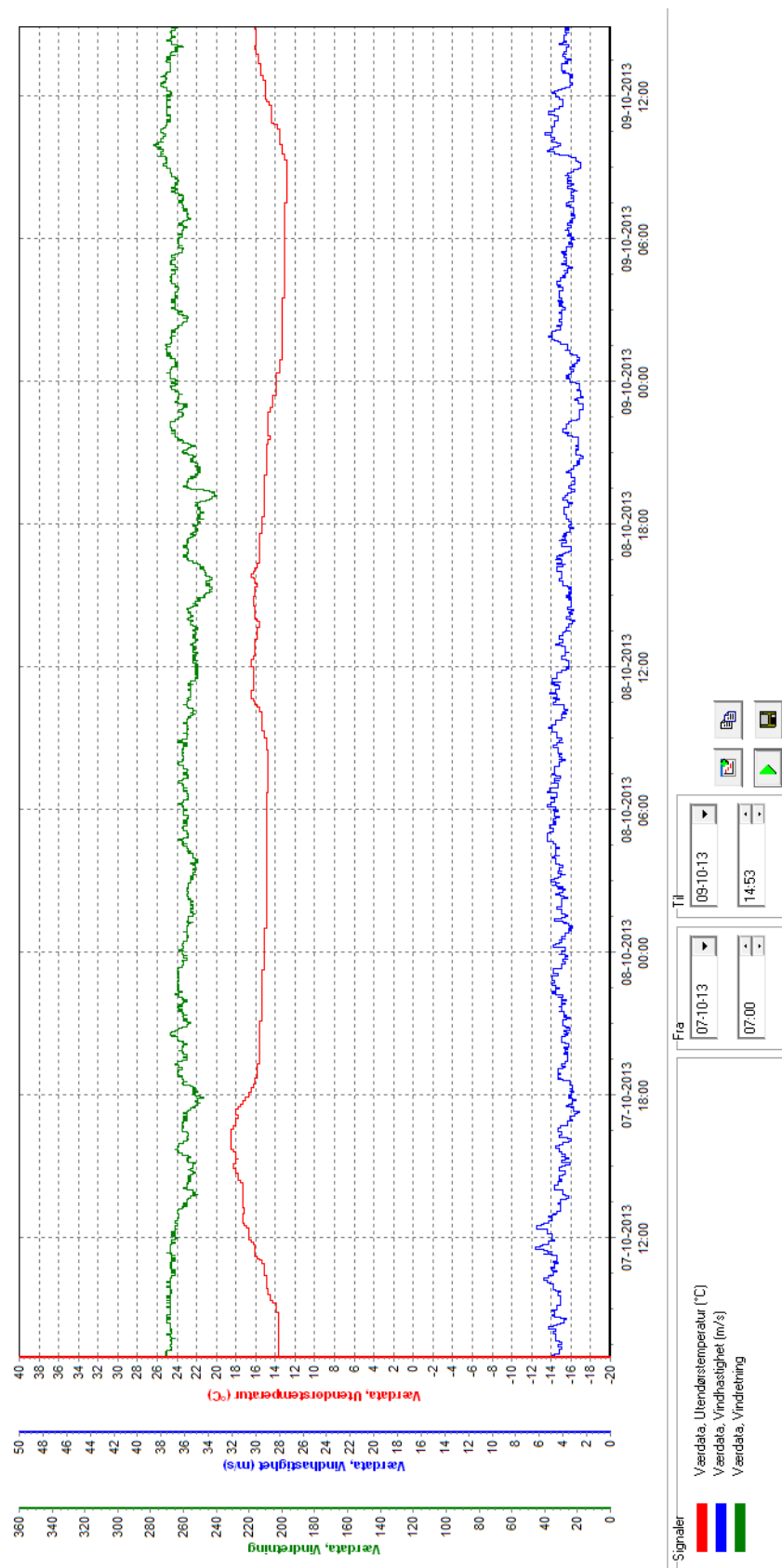
Technical data

Operating voltage KNX	Bus voltage, ≤10 mA
Measuring range CO2	300 – 9999 ppm
Measuring range temperature	+ °C ... +40 °C
Measuring range humidity	
Ambient temperature	-5 °C ... +45 °C
Installation type	Wall installation
Type of protection	IP 20
Protection class	III as per EN 60 730-1

Scale drawings

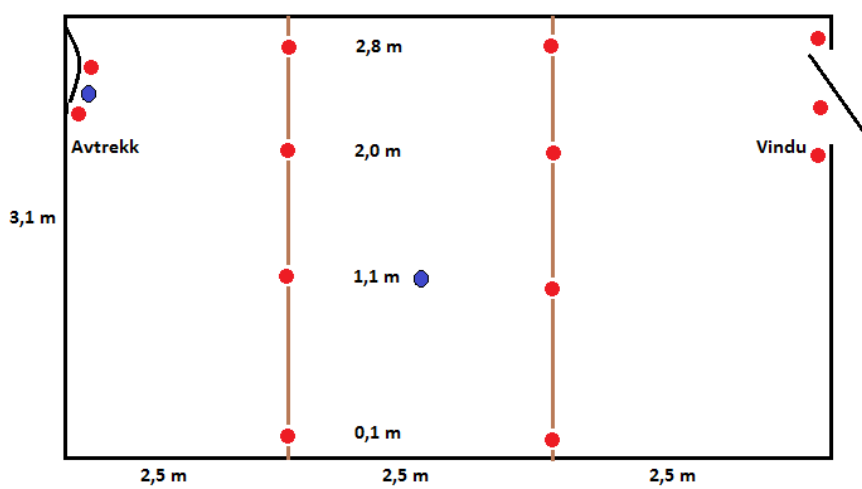


Vedlegg 6: Værdata fra SD-anlegget ved skolen for 8.oktober

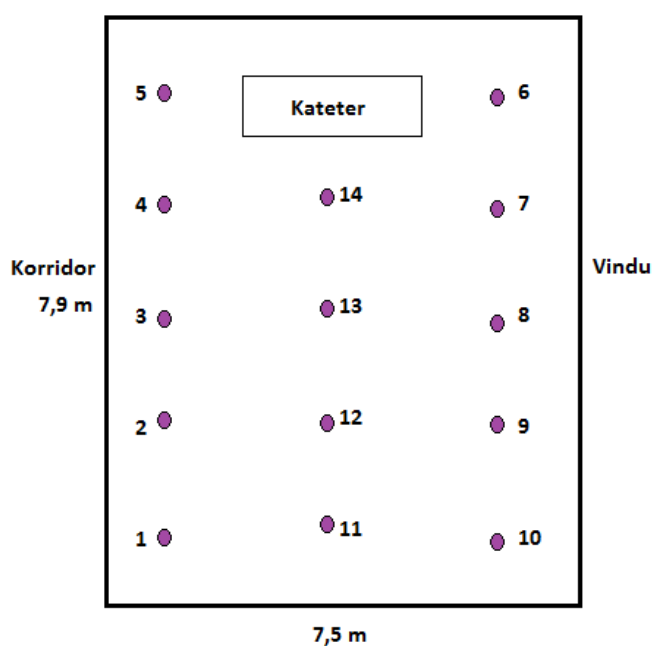


Vedlegg 7: Plassering av målepunkter

Den første figuren viser en skisse av klasserommet med plassering av temperatur- og CO₂-loggere. De røde punktene markerer temperaturloggere og de blå markerer CO₂-loggere. Det ble satt opp to planker i klasserommet hvor temperaturloggerne ble hengt opp. Videre ble tre loggere hengt opp ved vindu og to ved avtrekk. Den ene CO₂-loggeren ble plassert for å måle i avtrekk, mens den andre loggeren ble plassert på kateteret omtrent 1,1 meter over gulv.



Den andre figuren viser en skisse av målepunktene for lufthastigheten. Det ble målt momentanverdier ved 14 punkter i klasserommet ved vanlig driftsmodus og ved full åpning av vinduene.



Vedlegg 8: Lufthastighet

Automatisk styrte vinduer etter satt timeplan i SD-anlegg. Målingene er utført med elever til stede, måling ett minutt per punkt fra klokken 12.35 til 13.05:

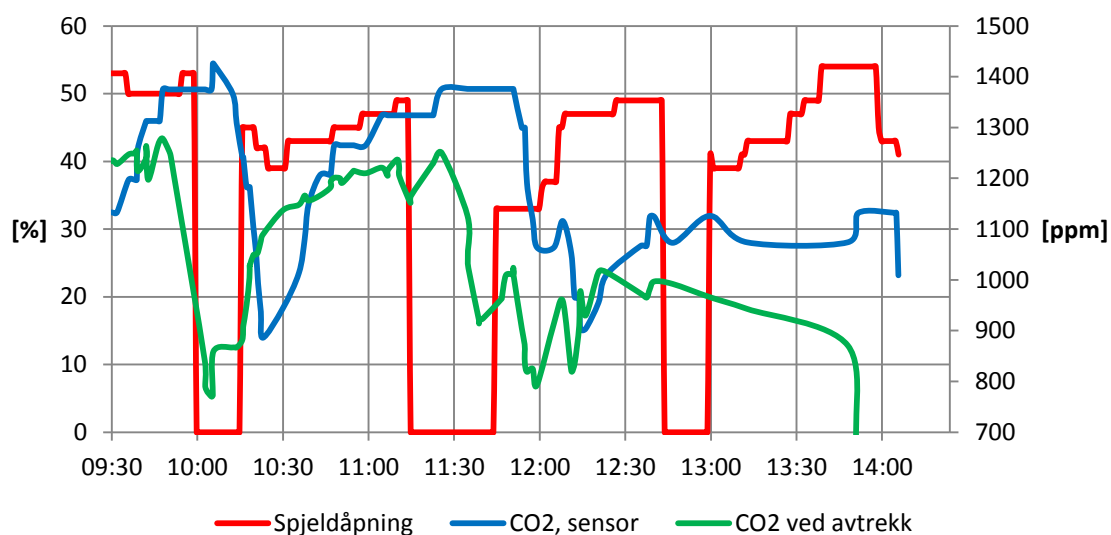
	Vindusåpning cm	2,5 m over gulv m/s	gjennomsnitt m/s	1,1m over gulv m/s	gjennomsnitt m/s
1	2,07	0,00 - 0,07	0,07	0,00 - 0,06	0,01
2	2,09	0,03 - 0,15	0,13	0,00 - 0,09	0,01
3	2,14	0,05 - 0,09	0,07	0,00 - 0,06	0,03
4	2,14	0,00 - 0,19	0,11	0,00 - 0,19	0,02
5	2,14	0,01 - 0,16	0,09	0,00 - 0,19	0,02
6	1,78	0,00 - 0,08	0,02	0,00 - 0,08	0,01
7	2,01	0,01 - 0,10	0,09	0,00 - 0,08	0,07
8	2,01	0,00 - 0,01	0,01	0,00 - 0,08	0,01
9	2,03	0,00 - 0,06	0,01	0,00 - 0,08	0,01
10	2,05	0,00 - 0,07	0,03	0,00 - 0,07	0,01
11	2,09	0,00 - 0,12	0,06	0,00 - 0,08	0,03
12	2,09	0,00 - 0,13	0,08	0,00 - 0,12	0,05
13	1,91	0,00 - 0,10	0,06	0,00 - 0,06	0,01
14	1,78	0,00 - 0,04	0,01	0,00 - 0,07	0,01

Vinduer i maksimal åpning i tidsperioden fra klokken 14.15 til 14.45.

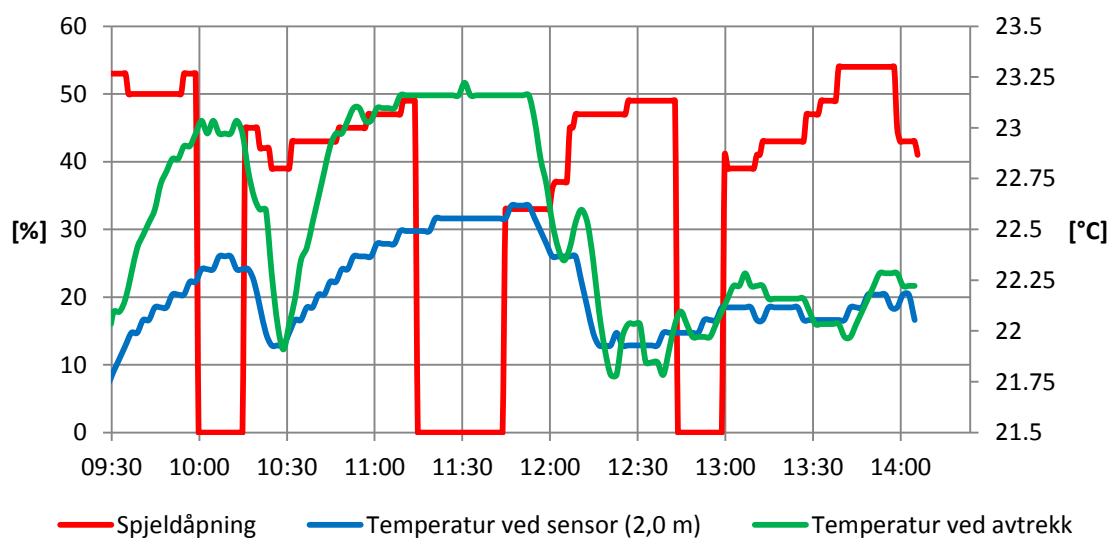
	Vindusåpning cm	2,5 m over gulv m/s	gjennomsnitt m/s	1,1 m over gulv m/s	gjennomsnitt m/s
1	2,12	0,00 - 0,09	0,06	0,00 - 0,03	0,01
2	2,12	0,02 - 0,20	0,18	0,00 - 0,09	0,01
3	2,12	0,00 - 0,12	0,06	0,00 - 0,17	0,09
4	2,12	0,00 - 0,08	0,02	0,00 - 0,07	0,01
5	2,12	0,01 - 0,05	0,02	0,00 - 0,09	0,01
6	2,12	0,00 - 0,01	0,01	0,00 - 0,08	0,04
7	2,12	0,00 - 0,08	0,01	0,00 - 0,01	0,01
8	2,12	0,00 - 0,04	0,01	0,00 - 0,08	0,01
9	2,12	0,00 - 0,01	0,01	0,00 - 0,00	0,00
10	2,12	0,00 - 0,08	0,02	0,00 - 0,00	0,00
11	2,12	0,00 - 0,06	0,03	0,00 - 0,09	0,07
12	2,12	0,00 - 0,08	0,03	0,00 - 0,08	0,03
13	2,12	0,00 - 0,11	0,05	0,00 - 0,10	0,04
14	2,12	0,00 - 0,01	0,01	0,00 - 0,07	0,01

Vedlegg 9: Spjeldåpning

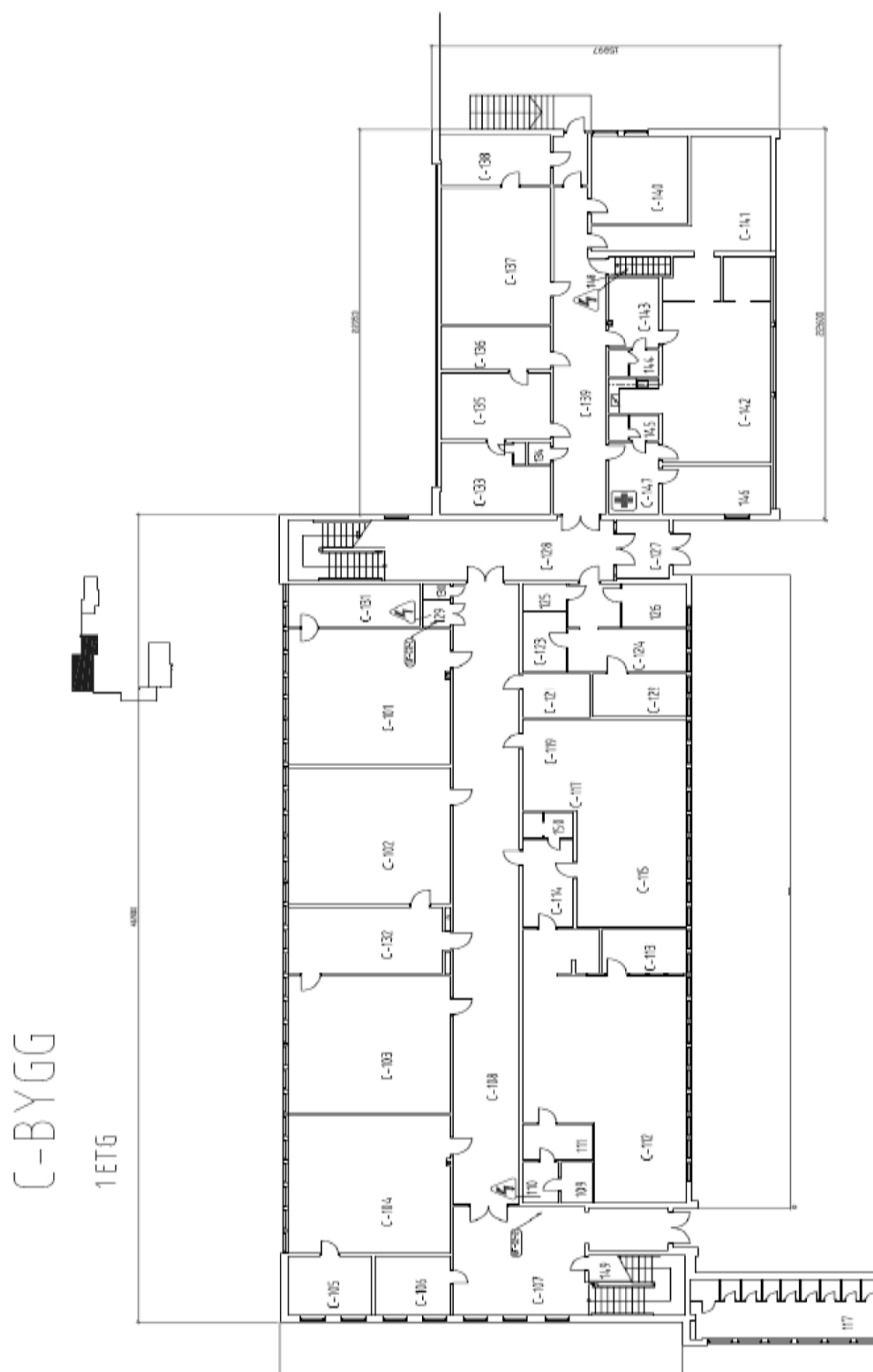
Variasjon i spjeldåpning og CO₂-konsentrasjon i klasserommet:



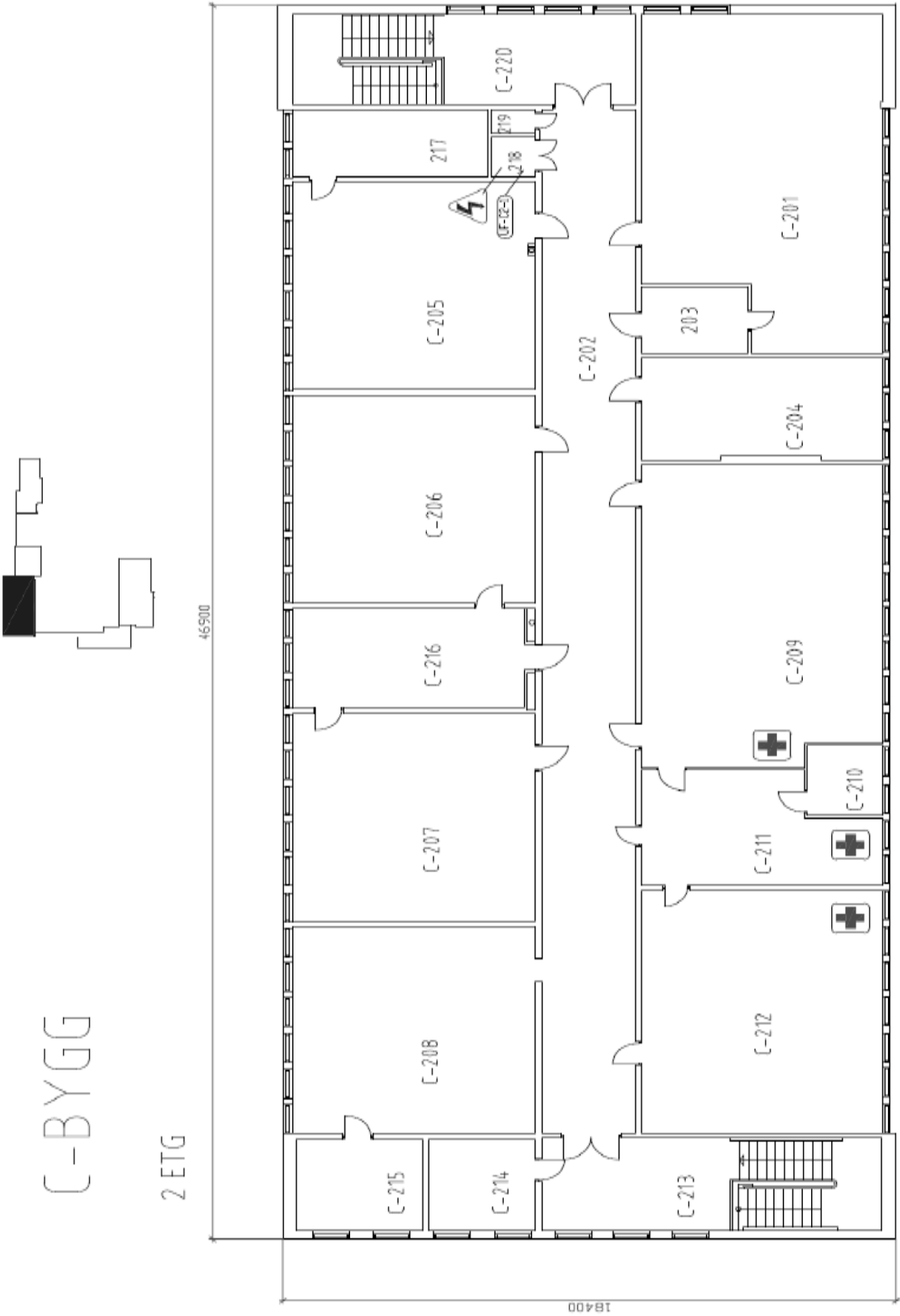
Variasjon i spjeldåpning og temperatur i klasserommet:



Vedlegg 10: Plantegning av C-bygning, 1. etasje



Vedlegg 11: Plantegning av C-bygning, 2. etasje



Vedlegg 12: Datablad for nye vinduer ved Brunla ungdomsskole

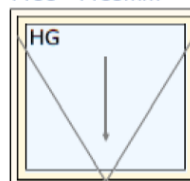


LEVERANSESKJEMA • NO.0256771.A

Tegningene viser produktene sett utenfra

Lnr	Mrk	Ant	Beskrivelse
005		1	ND Toppsving Utførelse NTech Lavenergi U-verdi produkt: 1,00W/m²K Uten ventil Utadslående toppsving ramme SKN154 m/ES/Ar/TGI7035 Oppbygning 6*+10G+4+12G+ES4 Aluminiumsbelagt Produkt NCS S0502Y Hvit, Pulver lakkert Overflatebehandling Produkt NCS S0502Y Hvit Detaljer: Festehull
998		1	Miljøvederlag glassretur

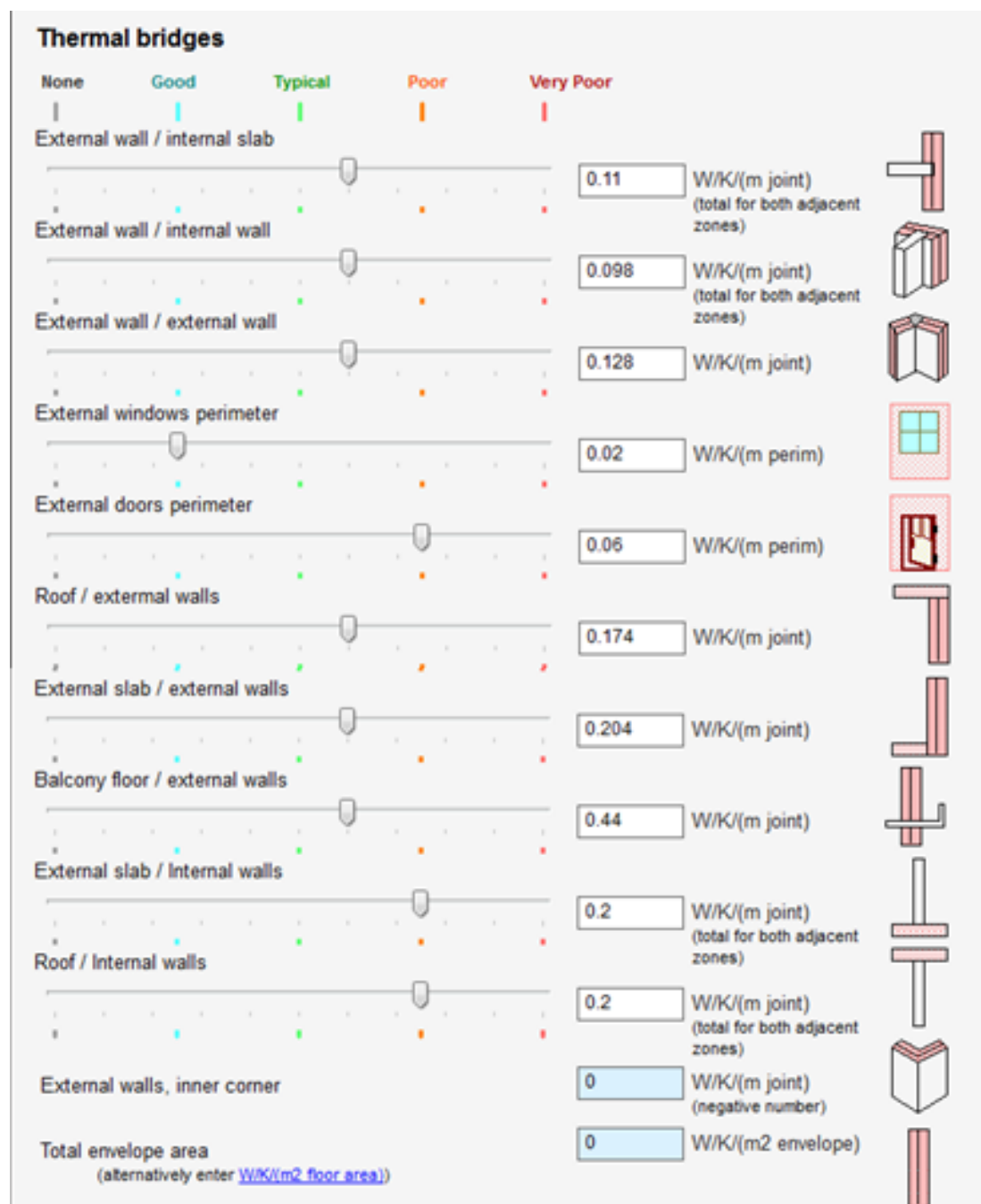
1188 × 1188mm



Gjennomsnitt U-verdi: 1,00W/m²K







Beregning av U-verdi er utført i henhold til NS-EN ISO 10077-1, 10077-2 og programmet "Therm".
Senter U-verdi for glasset er beregnet i henhold til NS-EN 673. Beregningsmetodikken er kvalitetsikret av SINTEF Byggforsk.

Vedlegg 13: Verdier for ulike kuldebroer i simuleringsmodellene









Vedlegg 14: Sommer- og vintersimulering, mixed mode ventilasjon

Energi- og effektbehov ved sommersimulering av mixed mode ventilasjon:







		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m ²	kW
	Lighting, facility	111	0.1	13.84
	Electric cooling	0	0.0	0.0
	HVAC aux	169	0.1	13.51
	Total, Facility electric	280	0.2	
	Fuel heating	0	0.0	0.0
	Domestic hot water	72	0.0	8.98
	Total, Facility fuel*	72	0.0	
	Total	352	0.2	
	Equipment, tenant	27	0.0	3.4
	Total, Tenant electric	27	0.0	
	Grand total	379	0.2	

Energi- og effektbehov ved vintersimulering av mixed mode ventilasjon:







		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m ²	kW
	Lighting, facility	111	0.1	13.84
	Electric cooling	0	0.0	0.0
	HVAC aux	0	0.0	0.0
	Total, Facility electric	111	0.1	
	Fuel heating	1423	0.8	96.6
	Domestic hot water	72	0.0	8.98
	Total, Facility fuel*	1495	0.9	
	Total	1606	0.9	
	Equipment, tenant	27	0.0	3.4
	Total, Tenant electric	27	0.0	
	Grand total	1633	0.9	

Vedlegg 15: Sommer- og vintersimulering, mekanisk balansert ventilasjon

Energi- og effektbehov ved sommersimulering av mekanisk balansert ventilasjon:

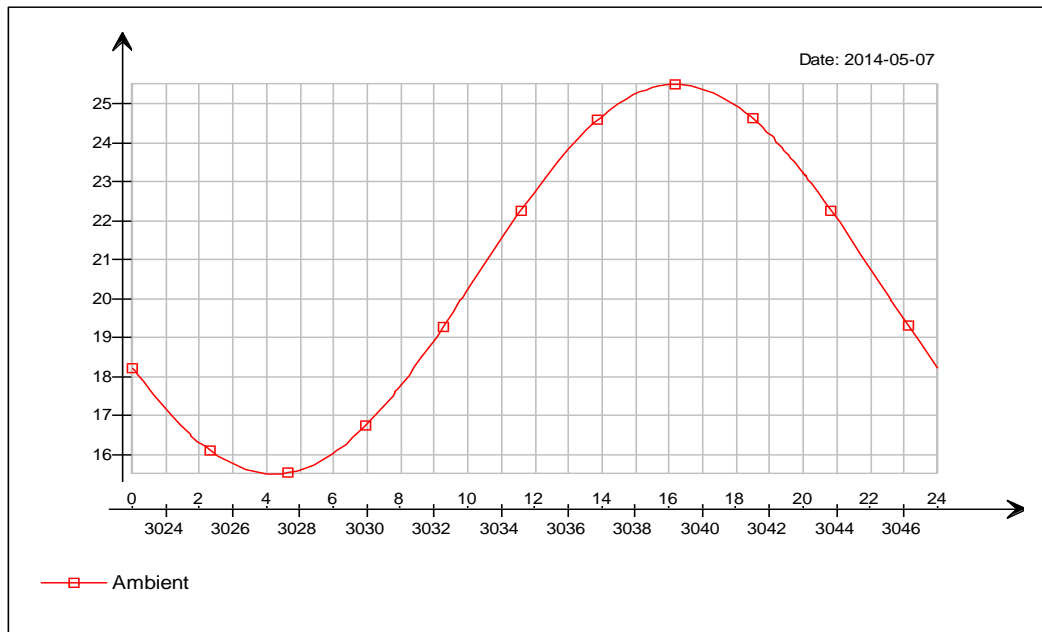
		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m ²	kW
	Lighting, facility	111	0.1	13.84
	Electric cooling	217	0.1	23.02
	HVAC aux	254	0.2	23.34
	Total, Facility electric	582	0.3	
	Fuel heating	0	0.0	0.0
	Domestic hot water	72	0.0	8.98
	Total, Facility fuel*	72	0.0	
	Total	654	0.4	
	Equipment, tenant	27	0.0	3.4
	Total, Tenant electric	27	0.0	
	Grand total	681	0.4	

Energi- og effektbehov ved vintersimulering av mekanisk balansert ventilasjon:

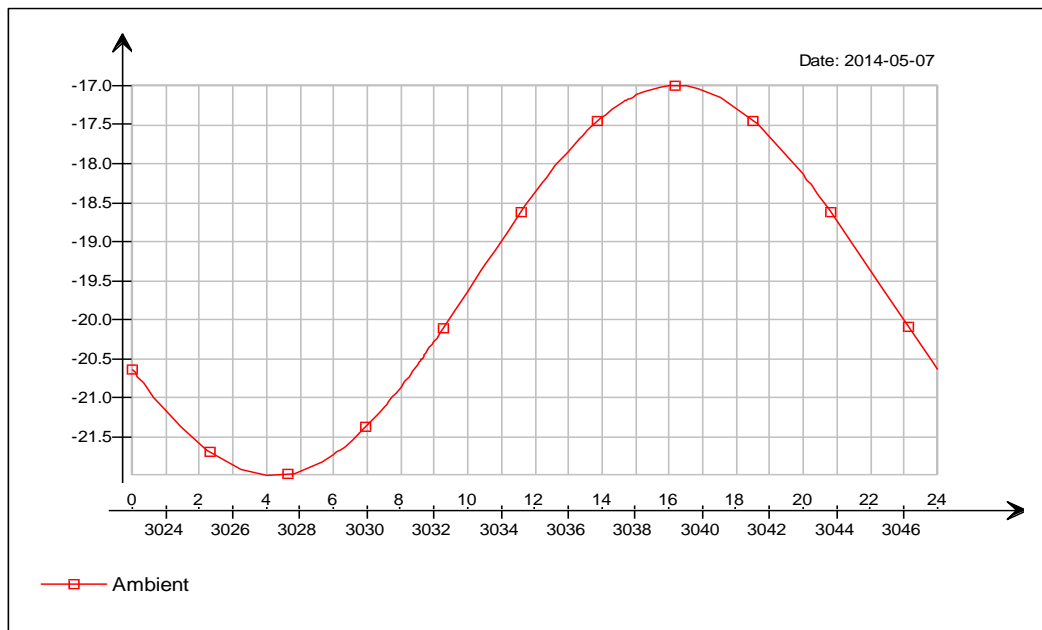
		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m ²	kW
	Lighting, facility	111	0.1	13.84
	Electric cooling	0	0.0	0.0
	HVAC aux	57	0.0	8.25
	Total, Facility electric	168	0.1	
	Fuel heating	1316	0.8	74.61
	Domestic hot water	72	0.0	8.98
	Total, Facility fuel*	1388	0.8	
	Total	1556	0.9	
	Equipment, tenant	27	0.0	3.4
	Total, Tenant electric	27	0.0	
	Grand total	1583	0.9	

Vedlegg 16: Utetemperatur ved sommer- og vintersimulering

Sommersimulering:

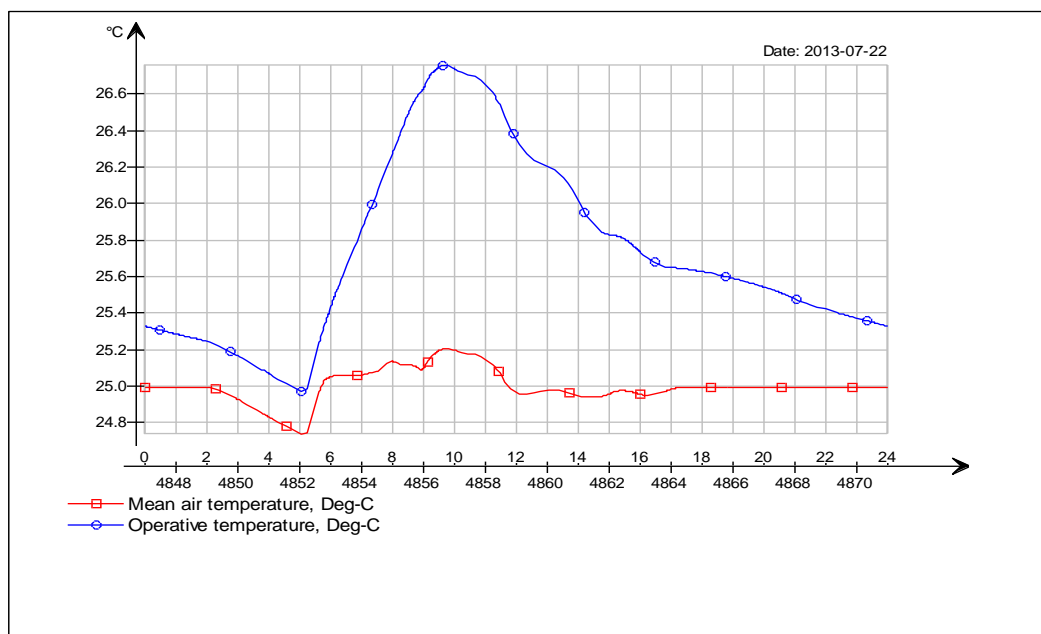


Vintersimulering:

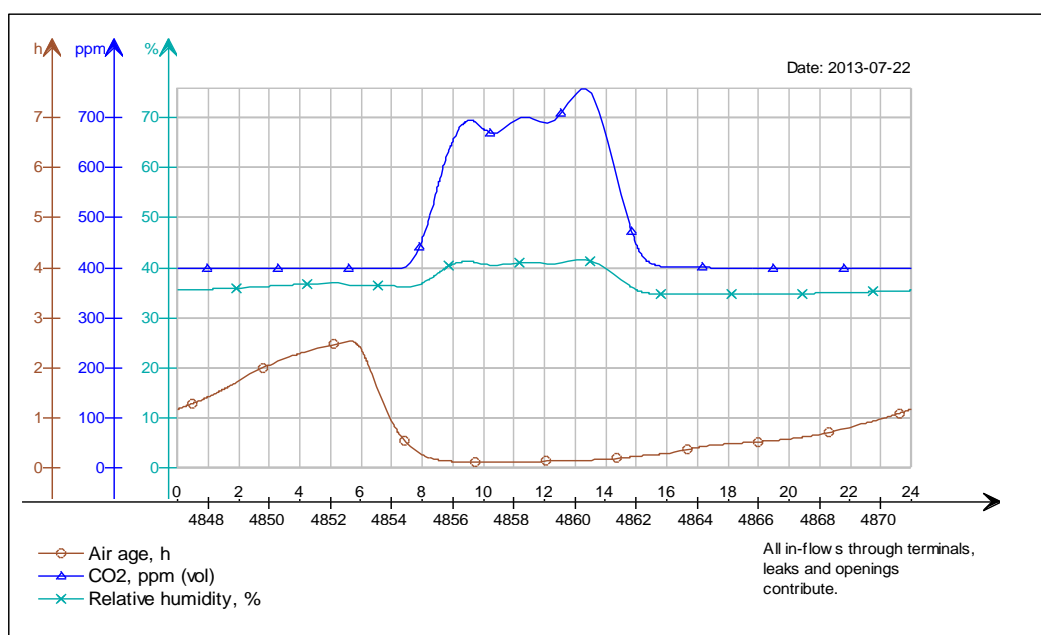


Vedlegg 17: Termisk og atmosfærisk komfort ved sommer- og vintersimulering, mekanisk balansert ventilasjon

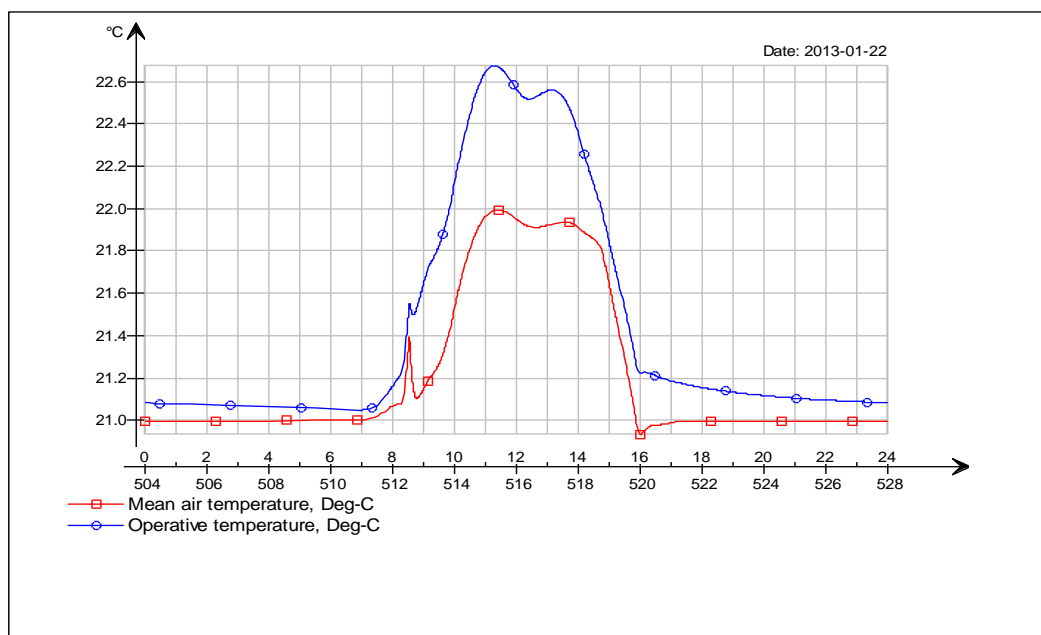
Termiske forhold i klasserom 201 ved sommersimulering:



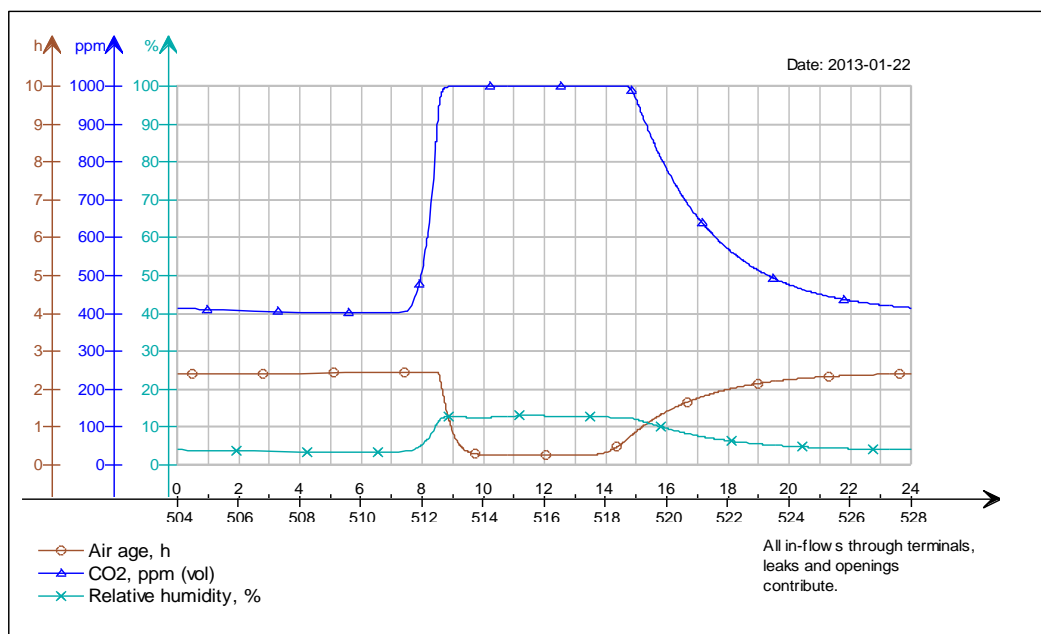
Atmosfæriske forhold i klasserom 201 ved sommersimulering:



Termiske forhold i klasserom 201 ved vintersimulering:

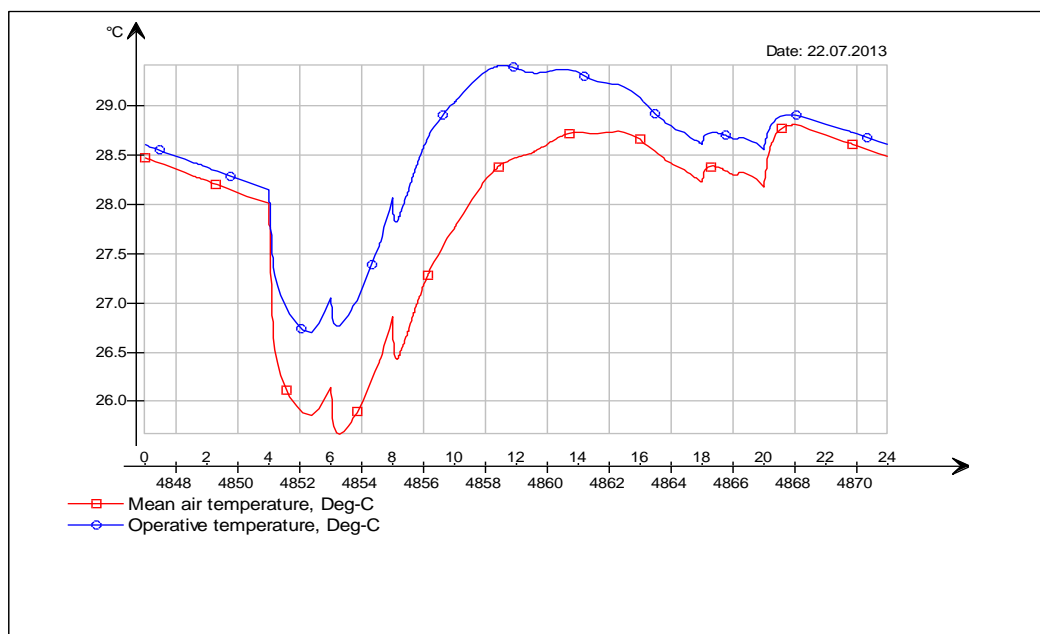


Atmosfæriske forhold i klasserom 201 ved vintersimulering:

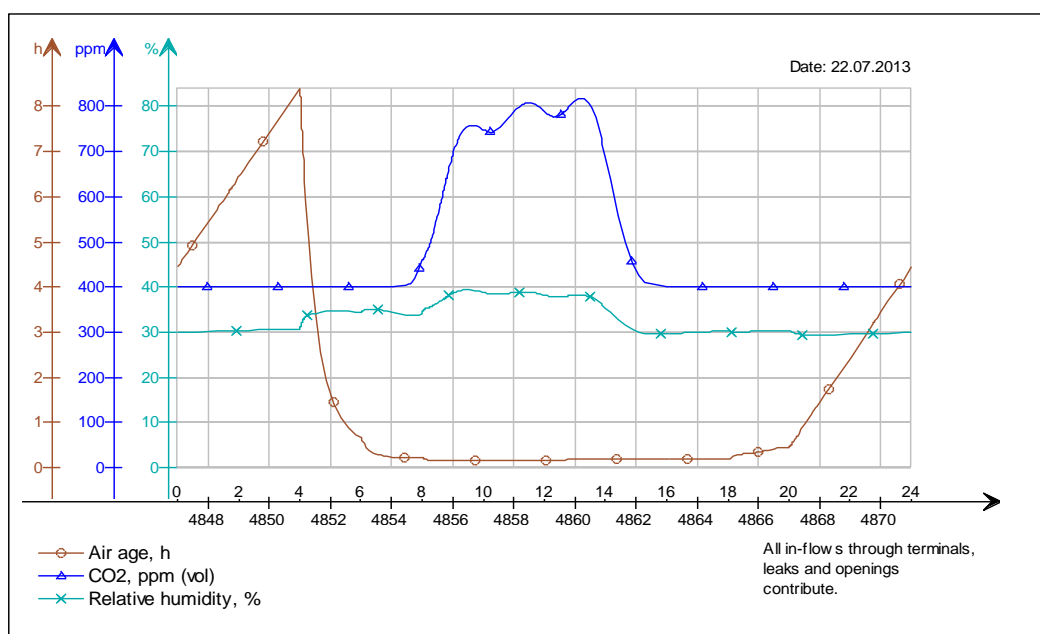


Vedlegg 18: Termisk og atmosfærisk komfort ved sommer- og vintersimulering, mixed mode ventilasjon

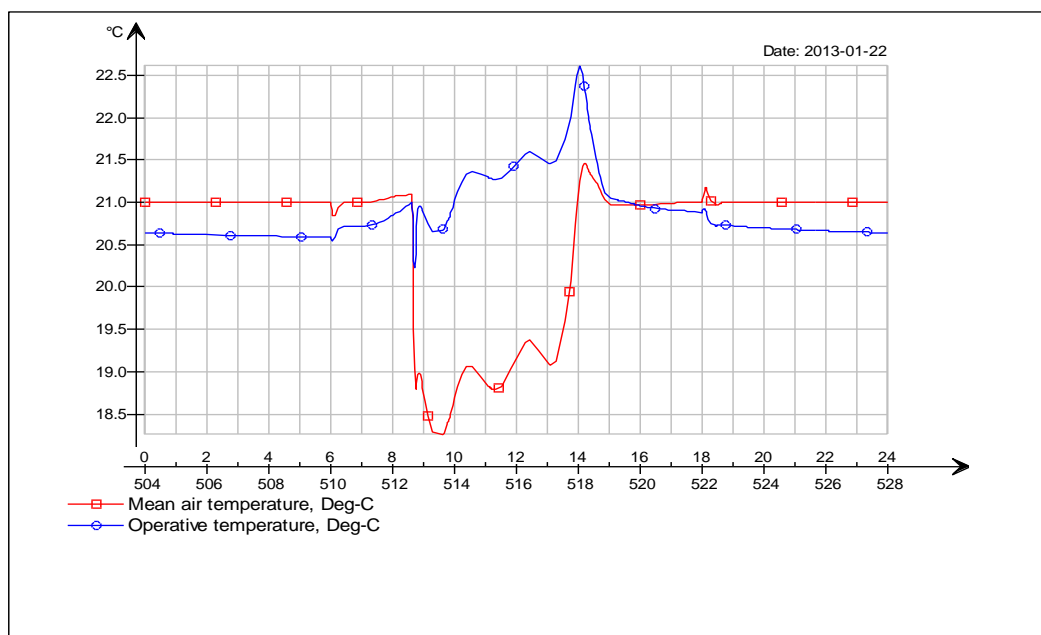
Termiske forhold i klasserom 201 ved sommersimulering:



Atmosfæriske forhold i klasserom 201 ved sommersimulering:



Termiske forhold i klasserom 201 ved vintersimulering:



Atmosfæriske forhold i klasserom 201 ved vintersimulering:

