



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København
Statens Byggeforskningsinstitut
A. C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Danmark

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto
Telefon: 9940 2285
master@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

4. semester

Titel på masterprojekt:

Indeklimaets variationer i folkeskolen

Projektperiode:

Februar – Juni 2021

Vejleder:

Hovedvejleder: Lars Gunnarsen

Bivejleder: Jørgen Rose
Kim B. Wittchen

Studerende:

Jakob Olskær Holland

Antal normalsider:

56 sider

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato:

10.06.2021

Resume:

Formålet med nærværende projekt er at foretage indeklimamålinger på en traditionel dansk folkeskole, og med udgangspunkt i disse, få et indblik i hverdagen, samt få en forståelse af hvordan det står til med kvaliteten, og ikke mindst brugernes oplevelse af indeklimaet. I projektet undersøges variationerne i indeklimaet i et klasselokales højde og bredde, samt variationerne mellem flere lokaler. Derudover undersøges også nogle tiltag der har en effekt på indeklimaet, så som øget personbelastning, ingen solafskærmning og udskiftning til mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding. Projektet består dermed først og fremmest af praktiske målinger i op til fire klasselokaler, hvor der måles på CO₂-koncentration, samt lufttemperatur og relativ luftfugtighed inde og ude. Resultaterne fra målingerne afspejler i høj grad brugernes oplevelse af indeklimaet, men afspejler også mønsteret i brugernes adfærd i forhold til udluftning, der på de målte dage viser sig at være forskellige. CO₂-koncentrationen overstiger også 1000 ppm i løbet af undervisningstimerne. Der er små variationer i CO₂-koncentrationen i højden, hvor laveste koncentration befinder sig lige over gulvet. I bredden fordeler CO₂-koncentrationen sig jævnt. Temperaturerne fordeler sig som forventet uens i lagdelingerne, i højde og bredde. Ud fra målinger estimeres luftskiftet i fire klasselokaler. På baggrund af indeklimasimuleringer, vurderes den årlige overskridelse af kravene til temperaturer, CO₂-koncentrationen samt variationer i varmebalancen. Der ville kunne ses på at optimerer brugernes styring af indeklimaet, hvilket vurderes at ville forbedre indeklimaet, men disse tiltag vurderes ikke at være tilstrækkelige. Der bør udføres yderligere undersøgelser, hvor der udføres kvalificeret energiberegning der kan tydeliggøre energibesparelser, der også gavner indeklimaet.



Indeklimaets variationer i folkeskolen

Master i Bygningsfysik
Jakob O. Holland

10. juni 2021



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Abstract

The purpose of this project is to carry out, indoor climate measurements, at a traditional Danish primary and lower secondary school and, gain an insight into an everyday life, and then an understanding about the quality and the users experiences, of the indoor climate. Based on these days increasing focus of several aspects of the teaching environment, that should lead to better learning and health, the topic for this project is chosen.

This typical school in Holbæk with floorplan in one level is built in 1973. The school and classroom represent a large proportion of the Danish schools, where the ventilation system and partly the thermal resistance in the exterior constructions is outdated (kilde). The school is partly naturally ventilated and supplemented with mechanical exhaustion.

In addition to assessing the issues in the indoor climate, some parameters that have a varied effect on the indoor climate will be tested. The testing will include increased person load, no sunscreens and replacement with mechanically balanced ventilation with heat recovery.

The measurement must provide an insight into the internal air temperature, relative humidity, and the level of CO₂-concentration. An insight is also sought into the variations of the parameters between classrooms, as well as the variations within the individual room, where horizontal dimension and the vertical stratifications of the temperature and the CO₂-concentration is measured.

The measurements have included four periods from the beginning of February to the beginning of March 2021, the equipment has been moved around between the periods.

Initially the results of the measurements are held up against the narrative and the experience of the indoor climate from the users. The results are used to estimate existing air changes and compare these up with today's standards and current requirements in building regulation (BR18).

In a combination of the result from the measurement, and the estimate for the air change, its attempt to make a model for the building to assessing a profile for the indoor climate and make it similar to the profile for the measurements, in purpose to simulate heat balance and indoor climate for a year.

Based on the Bsim-building model, the effect of three parameters will be put into a test and the establishment of the total hours, where temperatures and CO₂-concentration exceeds limits, will be illustrated as well as the variations in the heat balance, that represent the consequence to the net energy consumption for one room.

The result from the measurements reflects the users experience of the indoor climate and further an example, to the practical venting by the users, that appears different. It's possible to optimize the procedures for the venting, possibly adapt these to the seasons. The results also show the rate for the air changes and some internal temperature in cold winters is under recommended limits. The CO₂-concentration exceeds 1000 ppm during lessons.

There are minor variations in the CO₂-concentration in vertical direction. The lowest concentration is just above the floor. Horizontal the CO₂-concentration is evenly distributed. As expected, the distribution of the vertical temperature stratification is unequally. In horizontal direction is the distribution of the temperature also unequally.

However, the optimization, in relation to user behavior, will not be sufficient to achieve an optimal indoor climate. The effect and the control system from existing installation should be checked up for any faults. It should be investigated whether the existing ventilation system can be integrated in the classrooms. The possibilities of integrating or expanding automatic demand control for the ventilation should be considered.

Forord

Dette masterprojekt er udarbejdet i forbindelse med afslutning på uddannelsen som Master i Bygningsfysik, på Aalborg Universitet København og indeholder en praktisk og teoretisk del, berørt med nogle af de emner uddannelsen omfatter. I dette projekt sættes der fokus på indeklimaet på en udvalgt folkeskole, hvori der indgår målinger på stedet med efterfølgende analyseringer og beregninger ud fra måleresultaterne.

Projektet er tillige udarbejdet efter gode råd og vejledning. Og i den forbindelse takkes Lars Gunnarsen som hovedvejleder, samt Jørgen Rose og Kim B. Wittchen som bivejledere.

Derudover skal der også lyde en stor tak til Bjergmarksskolen i Holbæk og dets personale for brug af lokaler, forbrug af tidsressourcer til rundvisning og besvarelse af spørgsmål. Og ikke mindst, så er der takken til familiens tålmodighed.

Indholdsfortegnelse

Abstract	2
Forord	4
Indholdsfortegnelse	5
1. Indledning.....	6
2. Baggrund og teori	8
2.1 Hvad er status på viden	8
2.2 Opgaveformulering	9
2.3 Afgrænsning	11
2.4 Teori.....	11
3. Metoder og materialer	21
3.1 Bygningsregistrering.....	22
3.2 Målinger	26
3.3 Interviews.....	28
3.4 Designværdier	29
3.5 Beregninger	32
4. Resultater	40
4.1 Målinger (Trin 1)	40
4.2 Vurdering af luftskifte (Trin 2)	47
4.3 Bsim (Trin 3)	57
5. Diskussion	64
5.1 Validering af resultater	64
5.2 Diskussion af resultater	64
6. Konklusion.....	73
6.1 Identificering af indeklimaproblemerne.....	73
6.2 Identificering af variationerne	73
6.3 Optimering indeklimaet.	74
7. Litteraturliste.....	75

Bilag 1	Måledata og bearbejdet data
Bilag 2	Datagrundlag for luftskifte
Bilag 3	Dataudtræk fra Bsim
Bilag 4	Kalibrering
Bilag 5	Billedregistrering



Figur 1. Vestfacade på blok A og C.

1. Indledning

Der har i de senere år været en øget fokus på indeklima og adfærd, i de danske folkeskoler, der på baggrund af flere undersøgelser, har en betydelig indvirkning på elevernes indlæringssevne og sygefravær. Eleverne bruger mange timer af deres tidlige liv på at opholde sig i et undervisningsmiljø, hvis mange faktorer i mere eller mindre grad påvirker elever og lærer. Opgørelser over den samlede bygningsmasse der udgør de danske folkeskoler, viser at ca. 50 % af bygningsmassen er opført mellem år 1960 og 1980 hvor der var markant mere lempelige krav til energiforbrug og indeklima. Der er i samme periode også blevet anvendt byggematerialer, som vi i dag ved er skadelige for menneskers trivsel og for den globale biomasse, som bly, PCB og asbest. Dermed er forbedring af indeklimakvaliteten, i forhold til elevers indlæring og ikke mindst eleverne og de ansattes sundhed og trivsel en vigtig faktor, og hertil skal tillægges det store efterslæb der er med at fjerne miljøfarlige stoffer fra bygningsmassen. I sidste ende skal indeklimaforbedringerne samtidig også udføres og driftes uden at det kræver et unødigt stort energiforbrug. Vi har således en ældre andel af bygningsmassen hvor indeklima og energiforbrug ikke lever op til nutidens standarder. Så er der en andel af skolerne der har været renoveret, med det hovedformål at spare energi, men hvor energiforbedringer har forringet indeklimaet (Vorre et al., 2017a). Og så er der en mindre andel af nyere skoler, der er opført efter nutidens standarder, men hvor nogle af skolerne alligevel kæmper med dårligt indeklima så som overtemperaturer (Clausen et al., 2017).

Hensigten med nærværende projekt er at redegøre for indeklimaets tilstand, og dets udfordringer på en dansk folkeskole, der er opført i 1973 og dermed repræsentere en stor del, af de danske skoler der er opført i denne periode. Redegørelsen omfatter en kortvarig måleperiode i februar og marts måned, hvor der måles på CO₂-koncentration, inde- og ude-temperaturer af luften samt relativ luftfugtighed.

Målingerne omfatter to fokusområder, hvor det ene er lodrette variationer i temperaturlagdelinger og CO₂-koncentration i et klasselokale, samt variationer af samme parametre i det vandrette plan. Det andet fokusområde er variationer imellem fire klasselokaler.

Der er foretaget mindre interviews med de ansatte, herunder skoleleder, lærer, pædagoger og det tekniske personale, hvor brugernes oplevelser af indeklimaet sammenholdes med målingerne.

Der kastes også et blik på nogle faktorer der har betydning for indeklimaet og energiforbruget, i et enkelt klasselokale. Her anvendes målinger til at estimere de luftskifter, der har været til stede under måleperioden.

Målinger og estimeringer af luftskifter skal videreføres til en tilpasset bygningsmodel, i bygningssimuleringsværktøjet Bsim, der kan simulere indeklima og varmebalance over en periode på 1 år.

Faktorerne og metoderne der skal fremvise betydningen for energiforbruget, er dog i dette projekt behæftet med væsentlig stor usikkerhed. Det vil kræve en gennemgående energimæssig tilstandsregistrering, både på klimaskærm og installationer, der med kvalificering ved hjælp af dynamiske simuleringsværktøjer, kan redegøre for egentlige energiforbedringer.

Opstillingen af metode- og resultatafsnittet skal derfor betragtes som værende gennemført i tre trin:

- Trin 1: Udførelse af målinger og bygningsregistrering og dertil tilhørende analysering af resultater.
- Trin 2: Estimering af luftskifte.
- Trin 3: Opbygning af Bsim-model til simulering, der kan redegøre for indeklima og varmebalance over et år, der tilmed reguleres ved at ændre person belastning, solafskærmning og ventilationssystem.

Resultaterne fra målingerne afspejler i høj grad brugernes oplevelse af indeklimaet, men afspejler også mønsteret i brugernes adfærd i forhold til udluftning, der på de målte dage viser sig at være forskellige. Behovsstyring i form af optimering af manuel udluftningsprocedure og evt. tilpasning af disse i forhold til årstiderne kan være en mulighed at arbejde videre med. Resultaterne viser også at de nuværende tilførte luftmængder er for lidt, i forhold til nutidens standarder, samt at indetemperaturene i kolde vinterperioder kan være for lave, når der udluftes over uhensigtsmæssige lange intervaller. CO₂-koncentrationen overstiger også 1000 ppm i løbet af undervisningstimerne. Der er i nogle situationer mindre variationer i CO₂-koncentrationen i højden, hvor laveste koncentration er lige over gulvet. I bredden fordeler CO₂-koncentrationen sig jævnt. Temperaturerne fordeler sig, som forventet, uens i højden og i bredden.

Optimeringen i forhold til brugeradfærd vil dog ikke være tilstrækkeligt, til at opnå optimalt indeklima. Det bør undersøges nærmere, om eksisterende installationer yder efter hensigten, og at der ikke er fejl på styringsanlægget. Herefter bør det undersøges om det eksisterende ventilationssystem kan integreres mere i klasselokalerne. Mulighederne for at integrerer eller udbygge automatisk behovsstyring på ventilationen, bør ligeledes overvejes.

2. Baggrund og teori

Der ligger en stor samfundsopgave og et væsentligt potentiale i at optimere, den eksisterende og ældre bygningsmasse, der omfatter folkeskolars indeklima og energiforbrug. Hovedparten af skolerne er opført i mellem 1960 og 1970 hvor standarten var en anden. Der har i de senere år været fokus på energibesparelser, hvilket i nogle tilfælde har bidraget til forringelse af indeklimaet, så som for mange timer med for høje temperaturer og tætning af klimaskærm, uden samtidig at sikre at luftskiftet kompenserer for den manglende infiltration som tætningen medfører (Clausen et al., 2017).

En væsentlig udfordring i at skabe et godt indeklima, der på alle tidspunkter skal opleves acceptabelt, er at vekslende faktorer, som antallet af elever og lærer igennem skoledagen påvirker, at indeklimaet ændres næsten konstant. Og modsat vej; indeklimaet variationer påvirker elever og lærer. Derfor skal indeklimaet og dermed ventilationssystemet hele tiden kunne tilpasses den enkelte situation. Det forekommer særligt på skoler hvor der er et højt antal personer til stede i undervisningslokaler, og hvor eleverne har varierende aktivitetsniveauer, hvilket har en indvirkning på indeklimaet. Elever der kommer tilbage fra pause må i visse tilfælde vurderes at have et højere aktivitetsniveau, der med metabolismen bidrager til omgivelserne med varme-, kuldioxid- og fugtafgivelse, i en periode inde i undervisningstimen, hvor man bedst trives i lave temperaturer. Frem mod slutningen af undervisningstimen er aktivitetsniveauet og dermed afgivelsen fra personer faldet, her kan scenariet være at mennesket bedst trives ved lidt højere temperaturer (DS/EN ISO 7730, 2006), (Bergsøe & og Afshari, 2012).

Behovsstyring kan dermed være en vigtig forudsætning for at skabe det rigtige indeklima, på det rigtige tidspunkt ud fra belastningerne. Behovsstyringen kan etableres som automatisk styret ventilationsanlæg eller som manuel brugerstyring, hvor elever og lærer orienteres om hvornår og hvor længe der f.eks. skal udluftes (Bergsøe & og Afshari, 2012).

2.1 Hvad er status på viden

Med et gennemsnit på 10.960 timer er eleverne i de danske folkeskoler blandt dem i verden der i dag, tilbringer flest timer i folkeskolen i løbet af en 10 års skolegang, kun overgået af Australien. De mange timer i folkeskolen er kun blevet forøget efter folkeskolereformen fra 2014 (Clausen et al., 2017).

Det vurderes også samtidigt at den danske befolkning lever 90% af sit liv indendørs, hvilket gør at indeklimaet spiller en væsentlig rolle i menneskers trivsel og udvikling. En uheldig kombination af dårligt indeklima i hjemmet og skolen, kan have stor betydning for elevens sygefravær og indlæringssevne. Undersøgelser har påvist at elever klar sig op til 9 % dårligere i test i et dårligt indeklima, i forhold til elever der sidder i et acceptabelt indeklima (Toftum et al., 2011).

Mennesket påvirker bygningerne og bygningerne påvirker mennesket, og der har i de seneste år været foretaget en række undersøgelser af de danske folkeskoler, for at skabe et overblik over tilstanden på indeklimaet. Der har været undersøgt parametre som temperaturer og CO₂-koncentration m.v. men også hvordan brugeradfærden påvirker indeklimaet.

En af indeklimaundersøgelserne har omfattet 60 skoler, af forskellige opførelsesår og bygningstyper, herunder 250 klasselokaler og 27 faglokaler. Resultaterne viste at 90 % af klasselokalerne havde en CO₂-koncentration der lå over myndighedernes

grænseværdier på 1000 ppm, i løbet af skoledagen. Ca. 90 % af alle danske skoler er opført før år 1995 hvor ventilationskravene var mere beskedne (Clausen et al., 2017).

2.2 Opgaveformulering

Med udgangspunkt i tidens fokus, og seneste undersøgelser, omkring indeklima og dets udfordringer i folkeskoler, er nærværende projekt udarbejdet.

Der er til projektet udvalgt en folkeskole i Holbæk, der i forvejen har udfordringer med indeklimaet og hvis art og bygningstype antages at være meget almindelig i Danmark og det afspejler dermed også bredt, de udfordringer der omtales i de seneste undersøgelser.

Indeklimaproblemerne i den udvalgte skole er blandede, da skolen primært består af en ældre del der er opført i starten af 1970'erne og en nyere fløj der er opført i år 2010.

I projektet er der behov for at præcisere hvilke indeklimaproblemer der forekommer og opleves, i et eller flere udvalgte klasselokaler. Præciseringen af problemerne bestemmes indledningsvist, ved at spørger personalet på skolen. Brugernes oplevelse af indeklimaet skal så holdes op imod målinger og beregninger af indeklimaet. Der opstilles en beregningsmodel til indeklimasimulering i beregningsværktøjet Bsim, der tilpasses med brugernes oplysninger og resultater fra målinger, for at undersøge årsagerne og betydningen af nogle af de indgående parametre, der er forbundet med det dårlige indeklima.

Undersøgelserne omfatter således:

- Identificering af indeklimaproblemet i det udvalgte klasselokale og omkringliggende klasselokaler.
- Hvordan er variationerne af temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂-koncentrationen inden for det enkelte lokale?
- Undersøg hvad der skal til for at optimerer indeklimaet.
- Analyser på hvilken løsning potentielt set, vil være mest energieffektiv.

Til undersøgelserne er flere underliggende spørgsmål:

- Hvordan er belastningernes variationer i brugstiden?
- Og hvilken betydning har disse?
- Kan der findes en eller flere energieffektive løsninger, som kan gøres mere energieffektive hvis der indgår behovstilpasning?

Der måles i februar og marts på parametrene CO₂-koncentration, relativ luftfugtighed, temperatur for fremskaffelse af reelt datagrundlag. Der udføres mindre interviews med brugerne, for at bestemme oplevelsen af indeklimaet under målingen.

- Tegningsmateriale fremskaffes eller evt. optegnes.
- Bygningsdelene i klasselokalerne registreres.

De tekniske installationer registreres. Og der tilsigtes hvis muligt at indhente oplysninger fra skolens tekniske personale.

Der oprettes Bsim-model der kalibreres med de registrerede og målte forhold. Den kalibrerede Bsim-model anvendes til teoretisk at teste konsekvensen, ved justering af tre af de indgående parametre som:

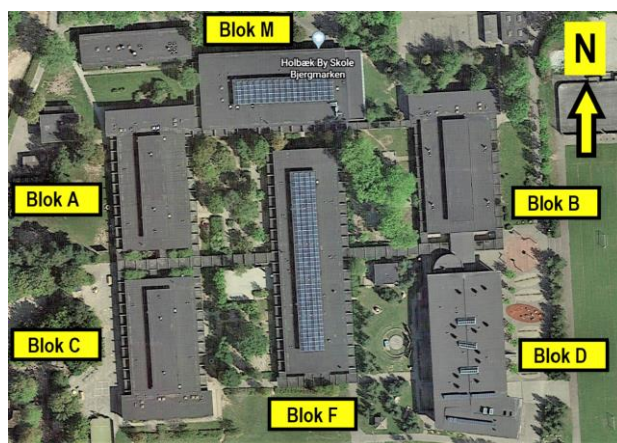
- Maksimal personbelastning i brugstiden hele året.
- Fjerne indvendige solafskærmende gardiner.

- Ændring fra eksisterende ventilationssystem til mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding.

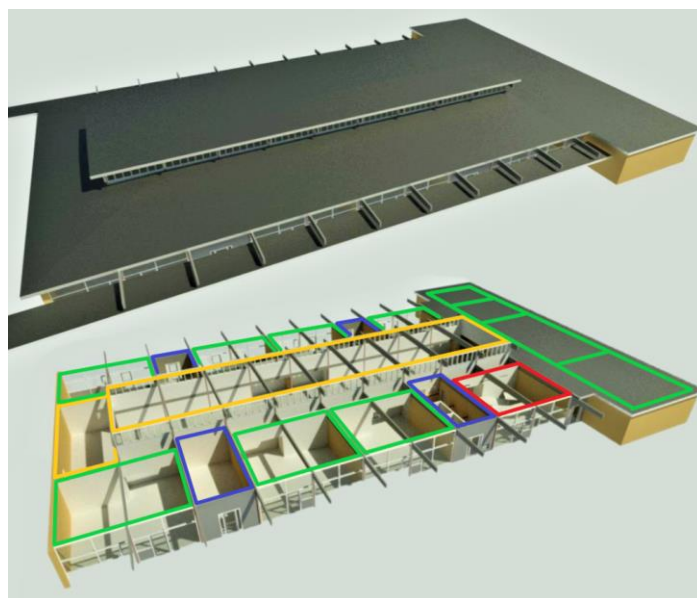
2.2.1 Om skolen

Projektet omhandler Bjergmarkskolen i Holbæk der er en traditionel tre- til firesporet folkeskole. Skolen er primært en etplans kamskole der ifølge BBR-oplysningerne er opført i år 1973, og senere er udbygget med en fløj i år 1977 og med en fløj i to etager i år 2010. Dermed repræsenterer skolen byggetraditioner og byggelovgivning for to betydeligt forskellige perioder, der er underlagt bygningsreglementet fra 1972 og 2008.

Selv om bygningsformen hører ind under kategorien kamskole, som vist på Figur 2, så er skolens fløje inddelt i seks selvstændige bygninger hvor fem af bygningerne der udgør kamskolens "fingrer", indeholder selve undervisningslokalerne og SFO-faciliteter.



Figur 2. Luftfoto fra Google Earth over skolen. Nærværende projekt omhandler primært indeklimaet i Blok C og enkelte målinger i blok A.



Figur 3. Perspektiv af Blok C med og uden tag. Blok C er som skolens øvrige blokke, en selvstændig bygning. De fleste af blokkene har et højt fællesrum beliggende centralt i bygningen (vist med gul). Klasselokalerne (vist med grøn) ligger placeret omkring fællesrummet med lavere rumhøjde. Mellem klasserne er der delte garderober (vist med blå). Den røde ramme indikerer klasselokalet for 2.C, hvor de primære målinger til nærværende projekt er udført.

Blok C der også er illustreret på Figur 3, består af et stort gennemgående fællesrum, som et centralt lokale der omkranses af klasselokaler, garderober og lokaler til øvrige formål. Den røde markering på figuren viser 2.C's klasselokale, der anvendes til de primære målinger og hvor fra resultater fra indeklimasimuleringer udtrækkes. Alle målinger omfatter lufttemperatur og relativ luftfugtighed i udvalgte klasselokaler, fællesrummet samt udendørs. Den fjerde måling udføres i yderligere tre klasselokaler i blok C og blok A. I de udvalgte klasselokaler måles der tillige på CO₂-koncentration.

2.3 Afgrænsning

Elevernes indlæringssevne og koncentration i folkeskolen består af flere indgående faktorer end der fremgår af dette projekt. Disse øvrige faktorer er fravalgt af hensyn til begrænsningen af projektets størrelse.

Det har ikke været muligt af fremskaffe det præcise energiforbrug for skolen. Gasmåleren har dog være aflæst over nogle få dage i et forsøg på at estimere et forbrug i kombination med graddage. Resultatet er dog forbundet med for stor usikkerhed. Og i forhold til projektets begrænsninger, så beregnes der ikke på besparelser eller variationer på det samlede energiforbrug. Der foretages kun vurderinger ud fra variationerne, i den årlige varmebalance for det enkelte klasselokale.

Indblæsningstemperaturen på de bibeholdte armaturer i klasselokalet er målt for at teste om der skulle være en funktion. Der har dog ikke vist sig nogle resultater, der skulle modsige det tekniske personales påstand om at kanalerne er afblændet, derfor fremgår resultaterne af disse målinger ikke af projektet.

Resultatet fra indeklimamålingerne i fællesrummet er kun kortfattet beskrevet, og fremgår ikke i den egentlige analysering af indeklimaet, da projektet begrænses til at omfatte undervisningslokalerne.

Indeklimaets variationer i forhold til rumgeometri var også med i det indledningsvise oplæg til opgaven, men er også på grund af begrænsninger i opgaven fravalgt.

2.4 Teori

Der findes flere teorier om hvordan menneskers aktivitetsniveau, i forskellige situationer påvirker indeklimaet med metabolismen i forhold til varme, kuldioxid og fugt. En af teorierne er bygget op omkring PMV- og PDD-indekset, hvor det i dag gældende bygningsreglement (BR18) henviser til, når det termiske indeklima skal dimensioneres.

2.4.1 Menneskets påvirkning af indeklimaet

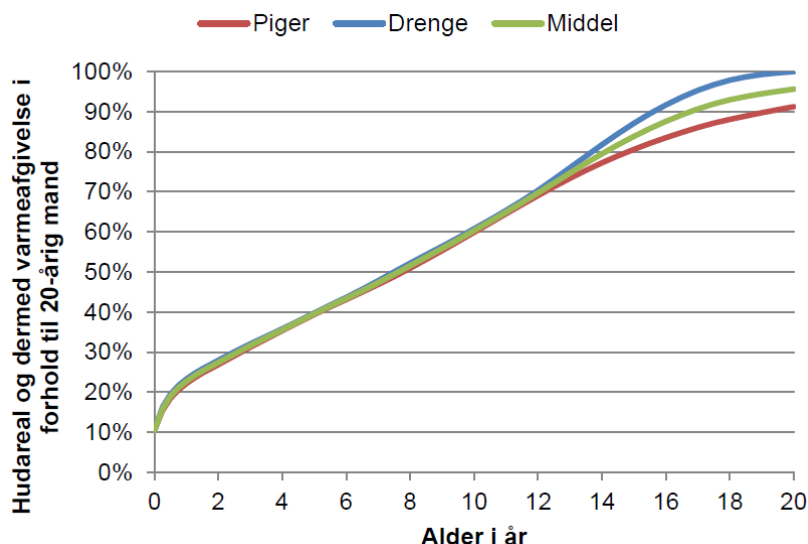
Fysiologisk og termisk set trives mennesket bedst med god komfort. Og optimal termisk komfort opnås når kroppen er i termisk neutralitet, hvilket vil sige at der er balance i imellem den varmemængde, kroppen producerer ved metabolismen og den varmemængde der afgives til omgivelserne (Valbjørn, 1993). Metabolisme er et synonym for stofskifte i menneskets celler hvor i, der sker en forbrænding af den ilt, der tilføres via blodbanerne og herefter omdannes til kuldioxid og vand der udåndes til omgivelserne. Stofskiftet indeholder dog flere elementer end der her er beskrevet (Sundhed.dk, 2021). Kroppens energimængde der omsættes til varme ved forbrændingen, er mange gange større end den energimængde der omsættes til fysisk aktivitet (Valbjørn, 1993).

Mængden som kroppen producerer af varme, fugtighed og CO₂ afhænger af kroppens fysiske aktivitetsniveau. Jo højere aktivitet jo højere produktion. For at kropstemperaturen ikke skal stige, skal den samme varmemængde, kunne afgives til omgivelserne for at opretholde kroppens varmebalance (DS/EN ISO 7730, 2006), (Valbjørn, 1993).

Indåndingsluften består ud over andre dele, af 20,86 % ilt, 0,035 % CO₂ og 1,2 % vand. For en voksen mand ved 1,2 met, vil metabolismen resultere i at der udåndes 15,3 % ilt, 3,6 % CO₂ og 6,2 % vand (Gunnarsen, 2020a).

Varmeafgivelsen fra en person afhænger dels af personens aktivitetsniveau og beklædningens varmeisoleringssevne. Disse to faktorer vedrører personen. De eksterne faktorer der påvirker varmeafgivelsen, er lufttemperaturen, middelstrålingstemperatur, luft-hastighed og luftfugtighed (Valbjørn, 1993).

Menneskets afgivelse af varme, fugt og CO₂ afhænger også af personens alder og køn, hvilket kan aflæses af Figur 4, (Vorre et al., 2017b).



Figur 4. Varmeafgivelse ved en given alder i forhold til en 20-årig mand. Den blå kurve viser varmeafgivelsen fra drenge og den røde for piger. Den grønne kurve er en middelværdi mellem piger og drenge. Kilde: Branchevejledning for indeklimaberegninger, bilag 1 – Baggrund og analyser (Vorre et al., 2017b).

Selve varmeafgivelsen, der fremgår af Figur 4, afhænger nærmere bestemt af hudarealet, der for det meste afhænger af alderen og kønnet. Forholdet mellem alder og varmeafgivelse, kan overføres til CO₂-afgivelsen og tager udgangspunkt i en voksen dansk mand på 20 år der ifølge, Danske Vækstkurver, (Rigshospitalet & EDMaRC, 2021) har en gennemsnitlig vægt ca. 74,1 kg og har en middelhøjde på ca. 181,5 cm. En gennemsnitlig kvinde på 20 år har en kropsvægt på ca. 67 kg og en middelhøjde på ca. 168 cm. En gennemsnitlig dansk mand på 20 år har et hudareal på ca. 1,94 m² (Vorre et al., 2017b). Tilsvarende vil en gennemsnitlig dansk kvinde på 20 år, ved aflæsning på Figur 4, have et hudareal og varmeafgivelse på 91 % i forhold til en dansk mand, hvilket svare til 1,77 m². Og ser man på en elev i 2. klasse på op til 8 år, har barnet et gennemsnitligt hudareal og en varmeafgivelse på ca. 51 % i forhold til en gennemsnitlig dansk mand på 20 år. Barnets hudareal svare således til 0,99 m².

Menneskets aktivitetsniveau angives i enheden met, hvor 1 met svare til en varmeafgivelse på 58 W/m² hudareal (DS 474, 1995) for en voksen mand. Enheden met kan anvendes som metabolisk faktor for tilpasning af en persons varmeafgivelse ved et givent aktivitetsniveau. F.eks. så svare 1,2 met til et aktivitetsniveau hvor der udføres stillesiddende arbejde på kontorer eller lignende. Ved anvendelse af ovenstående, vil en voksen mand ved 1,2 met have en varmeafgivelse på:

$$1,2 \text{ met} \cdot 58 \text{ W/m}^2 \text{ hudareal} \cdot 1,94 \text{ m}^2 \text{ hudareal} = \underline{135 \text{ W}}$$

De 135 W er den samlede varmeafgivelse fra en person, hvoraf en andel på 30 – 40 %, afgives som fugt til luften, og en andel på 60 – 70 % afgives som tør varme, hvoraf det er den tørre varme der bidrager til rumopvarmningen. Dvs. af de 135 W så afgives 81 – 94,5 W som varmebelastning.

Ved typiske indeklimaberegninger anvendes værdierne for en voksen mand som designværdier. Dvs. 1,2 met med varmeafgivelse på 143 W og for børnehavebørn regnes der med et aktivitetsniveau på 1,6 met og varmeafgivelse på 60 W. For skoler anvendes værdierne for en voksen mand. (Vorre et al., 2017a).

I virkeligheden er varmeafgivelsen og aktivitetsniveauerne langt mere nuanceret på flere områder. Dels er de met-værdier der anvendes, vægtede middelværdier på baggrund af statistiske aktivitetsniveauer, og tager ikke højde for at der er en periode, på op til eller flere timer efter, hvor kroppen er mere aktiv med varmeafgivelsen, før den indfinder sig på et nyt stadie med f.eks. et lavere aktivitetsniveau (DS 474, 1995).

Forskningsprojekter har også vist at der tilmed er forskel i aktivitetsniveauer, mellem etniciteter, hoppey m.v. (EPA, 2011).

I nærværende rapport er det nærliggende differentiere i aldersgrupper og aktivitetsniveauer, for at kunne estimere virkeligheden mest muligt på baggrund af målingerne.

Mængden af CO₂-afgivelsen er også afhængig af en persons alder og aktivitetsniveau. Med udgangspunkt i at en voksen mand på 20 år udånder 17 l CO₂ i timen pr. met (Vorre et al., 2017b), kan CO₂-mængden via Figur 4 overføres til bestemte aldersgrupper.

Mennesker og dyr også en række andre bioeffluenter, som bakterier, vira og kemiske stoffer der også resulterer i lugte.

Ud over at menneskets organisme selv regulerer på hvornår og hvor meget varme og CO₂ der afgives, er der også behov for at kunne regulere varmeafgivelsen med kropsbeklædninger. Og her indgår beklædningsdelens isolans, som det andet af de to led, hvor i varmeafgivelsen relaterer sig til mennesket (Valbjørn 1993). Beklædningernes isolans, overføres typisk til enheden clo (DS 474, 1995). Det er også typisk for mennesket at ved et højt aktivitetsniveau, bæres der beklædning med minimum varmeisoleringssevne og ved meget lav aktivitet, vil man typisk bære beklædning med højere varmeisoleringssevne.

2.4.2 Indeklimaets påvirkning af mennesket

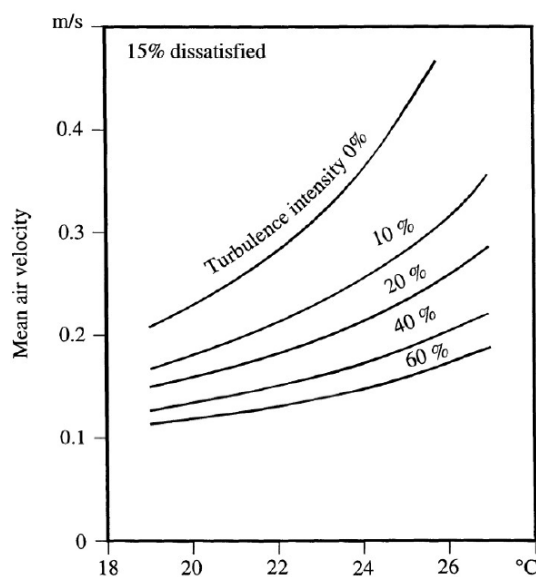
For opnåelse af god komfort og stabil varmebalance indgår der fire eksterne faktorer som: Lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed og luftens fugtighed. Disse fire elementer relaterer sig til omgivelserne.

Her indgår kombinationen af lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen som den temperatur mennesket oplever, også kaldet operativ temperatur. Dvs. det er den varme der er i lufttemperaturen, hvoraf der sker en varmetransport til og fra kroppen som varmeledning, og middelstrålingstemperaturen hvoraf der sker varmetransport til og fra kroppen som stråling til og fra omkringliggende overflader (Valbjørn 1993). Det er derfor den operative temperatur er interessant og i dette projekt, anvendes i resultatudtræk fra f.eks. indeklimasimuleringer.

Middelstrålingstemperaturen er defineret som de vægtede gennemsnitstemperaturer, på de omkringværende bygningsdeles overflader. I velisolerede huse iht. nutidens krav vil lufttemperatur og middelstrålingstemperatur være næsten ens. Vægtningen af overfladetemperaturerne skal foretages med vinkelforholdet mellem overfladerne og personen (Hvenegaard et al., 2008). For store forskelle mellem lufttemperaturen og

middelstrålingstemperaturen kan påvirke komforten negativt, og samtidigt med øget lufthastighed. Øget lufthastighed har en større negativ indflydelse på komforten, hvis lufttemperaturen er lavere end middelstrålingstemperaturen, i forhold til hvis lufttemperaturen er højere end middelstrålingstemperaturen. Forholdet mellem lufttemperatur, middelstrålingstemperatur og lufthastighed får mere betydning jo højere indetemperaturen er i forhold til 26 °C (DS/EN ISO 7730, 2006).

Lufthastighedens påvirkning af menneskets varmeafgivelse og ikke mindst oplevelsen og komforten har en også en effekt, der kan virke afkølede på kroppen. De oplevede gener ved afkølingen er størst ved lave temperaturer, hvor mindre lufthastigheder kan være tilstrækkelig, til at opnå utilfredshed og træk blandt personer. Stigende lufthastighed ved lave temperaturer vil dermed øge utilfredsheden. Hvor i mod der kan accepteres højere lufthastigheder ved varmere temperaturer.



Figur 5. Diagrammet forudsætter at der er 15 % af personerne i et lokale, der er utilfredse med indeklimaet. Det kan aflæses at ved stigende turbulensintensitet, så reduceres grænsen for maksimal middellufthastighed.

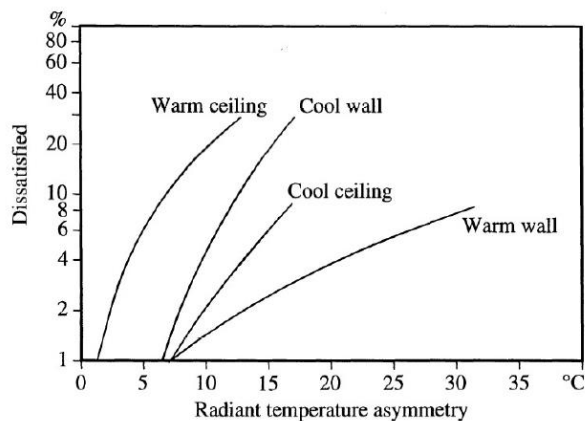
Lufthastighedens og temperaturens påvirkning forstærkes yderligere i samspil med turbulensintensiteten. Turbulensintensiteten er forholdet mellem den gennemsnitlige afvigelse fra middellufthastigheden og selve middellufthastigheden. Og jo højere turbulensintensitet, jo højere utilfredshed er der blandt personer, ved en given temperatur og middellufthastighed, hvilket kan aflæses af diagrammet på Figur 5, der tager udgangspunkt i 15 % utilfredse personer (DS 474, 1995). Det kan f. eks aflæses at der ved en turbulensintensitet på 40 %, ved 22 °C maksimalt må være en middellufthastighed på ca. 0,14 m/s, for at maksimalt 15 % af personerne i et lokale er utilfredse. Procentandelen af utilfredse personer angives i draught rate (DR), hvilket der som udgangspunkt ifølge byg-

gningsreglementet (BR18) ikke bør overstige 20 %. Af Tabel 1 fremgår bygningsreglementets anbefalede lufthastigheder i forhold til temperaturer ved DR på 20 % (BR18).

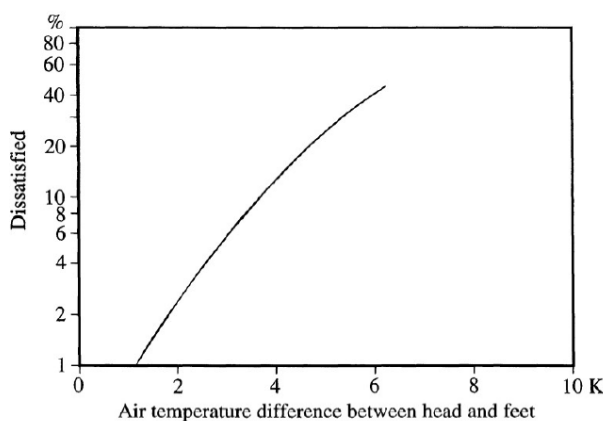
Tabel 1. Værdierne i tabellen der er et udtræk fra bygningsreglementet 2018, viser maksimale anbefalinger til lufthastigheder (m/s) ved bestemte temperaturer (°C) for overholdelse af draught rate på maksimalt 20 %.

Lufttemperatur	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Lufthastighed	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,31

Der kan også opleves lokal termisk ubehag på kroppen ved asymmetrisk varmestråling, der opstår ved for store forskelle i strålingstemperaturen i to modsatte retninger set i forhold til en plan flade. Oplevelsen er dog forskelligt alt efter i hvilken retning, at strålingsasymmetrien opleves samt om overfladerne omkring personen er varme eller kolde. Som for draught rate, sættes også strålingstemperaturasymmetrien op i forhold til en procentandel af utilfredse personer, der kan ses på Figur 6, der er et udtræk fra DS 474. Her kan det f. eks ses, at personer vil føle større ubehag ved varmestråling fra et varmt loft, end fra et koldt loft. Og føle større ubehag fra en kold væg, end fra en varm væg. (DS 474, 1995).



Figur 6. Diagrammet viser procent af utilfredse som funktion af strålingstemperaturasymmetrien. Temperaturen (°C) på X-aksen skal ses som temperaturforskellen mellem strålingstemperaturen i to modsatte retninger, set i forhold til en plan overflade (DS 474, 1995).



Figur 7. Diagrammet viser hvor stor forskellen i lufttemperaturen (K) må være imellem hoved og fødder, ved overholdelse af en given procentandel utilfredse på Y-aksen (DS 474, 1995).

Mennesker føler også ubehag ved for store lodrette temperaturforskelle mellem fødder og hoved. Der er størst ubehag ved temperaturforskelle når der er varmere ved hoved i forhold til fødder end når der er koldere ved hovedet i forhold til fødder. På Figur 7 der er et udtræk fra DS 474 ses forholdet mellem en procentandel af utilfredse i forhold til den lodrette temperaturdifference. Der bør ikke være mere end 3 °C forskel mellem hoved og fødder (Valbjørn 1993).

Yderligere føler personer også ubehag ved for kolde eller for varme gulvtemperaturer. Ved omkring 19 °C er der færrest utilfredse. Procentsatsen af utilfredse stiger herfra ved køligere

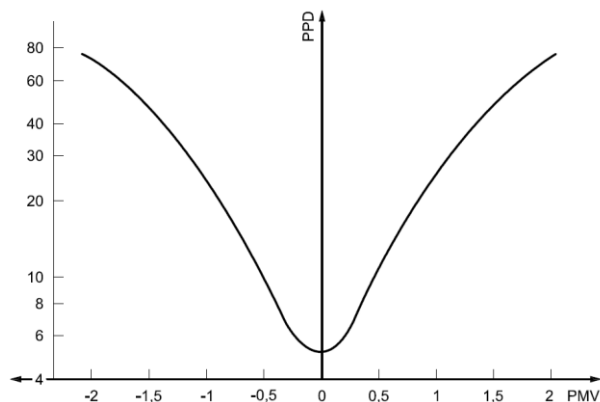
eller varmere gulvtemperaturer (DS 474, 1995).

2.4.3 PMV- og PDD-indekset

De seks parametre som nævnt i ovenstående dvs. aktivitetsniveauet (metabolic rate), beklædningens varmeisolering, lufttemperaturen, middelstrålingstemperaturen, luftfugtigheden og luftfugtigheden er således rammerne, omkring en persons varmebalance, der i sammenspil har betydning for, om en person oplever god komfort eller ubehag. Og som der også fremgår af ovenstående, så indgår utilfredshed som et måleparameter både i forhold til hvad der angår parametre der har indflydelse på generel komfort, og parametre der har indflydelse på lokalt ubehag på kroppen.

Da det er meget varierende fra individ til individ, om hvornår det termiske indeklime opleves som acceptabelt, eller utilfredsstillende, bygger en af de mest anvendte metoder til at estimere eller redegøre for kvaliteten af et termisk indeklime, på tidligere studier af en gruppe mennesker der har været anvendt som testpersoner. DS/EN ISO 7730 der beskriver metoden med PMV- og PDD- indekset, tager således udgangspunkt i

undersøgelser af 1300 personer (Valbjørn 1993). Personernes oplevelse af det termiske indeklima har således fastslået en sammenhæng, mellem PMV (Predicted mean vote) og PDD (Predicted Percentage of Dissatisfied) hvilket illustreres i Figur 8. PMV-indekset repræsenterer en værdi inden for en 7-trinsskala, hvor værdien 0 er voteringen for det bedste opnåelige termiske indeklima, herefter står værdierne +1 for let varmt, +2 for varmt og +3 for hedt. -1 står for let køligt, -2 for køligt og -3 for koldt.



Figur 8. Ved beregning af PMV-indeks iht. DS/EN ISO 7730 kan PMV -indekset af dette diagram overføres til at aflæse procentandelen af utilfredse på Y-aksen.

Figur 8 kan således anvendes til at bestemme en procentsats af utilfredse, ved at beregne en PMV-værdi. Det kunne f.eks. være at der i et klasselokale har været udført målinger og på den baggrund, er de seks parametre der indgår i varmeafgivelsen fra en person, bestemt til en værdi på +1. Og af Figur 8 kan det så aflæses at der så estimeres at være 27 % af personerne i lokalet, der er utilfredse og som synes der er for varmt, eller nærmere bestemt "let varmt".

Selve beregningen af PMV-værdien beregnes iht. DS/EN ISO 7730 og kan enten udføres ved at anvende standartens ligninger, eller beregne værdien med et computerprogram. PMV-værdien kan enten bestemmes ud fra en statisk betragtning, eller dynamisk over en længere periode.

Som Figur 8 også viser, kommer utilfredsheden aldrig ned på 0, og der er derfor anbefalede retningslinjer for hvornår, man kan anse det termiske indeklima for at være acceptabelt. Ved de seks parametre der også repræsenterer den operative temperatur, bør andelen med utilfredse ikke overstige 10 %. Ved lokalt termisk ubehag bør andelen af utilfredse være på mellem 5 og 15%, og der regnes derfor med at der i en større gruppe maksimalt, vil være 80 % tilfredse personer (Valbjørn 1993. Der er dog udarbejdet designværdier, der er mere nuanceret, i forhold til hvor meget frihed brugerne selv skal have og har, for selv at kunne tilpasse indeklimaet. I de danske metoder som også fremgår af *Branchevejledning for indeklimaberegninger* (Vorre et al., 2017a), så inddeles grænsen for procentdelen med utilfredse, i tre indeklimaklasser som er henholdsvis, Minimum, Standart og Ambitiøs.

2.4.4 CO₂ og luftkvalitet

Det er ikke kun det termiske indeklima der påvirker og opleves af mennesket. Det gør også selve luftkvaliteten. Og ud af mange elementer, så bliver indeluften også påvirket af CO₂-udledning og vanddamp fra mennesker, samt fra bad og køkkenfaciliteter, afgasninger af forskellige VOC'er fra bygningsdele, inventar og materiel. Derud over påvirkes indeklimaet af forbrændingspartikler fra varme overflader, på over ca. 100 °C og fra udeluften. Og så kan bygninger også være eksponeret for, for høje radonkoncentrationer. Yderligere påvirker mennesker og dyr også indeklimaet med bioeffluenter som bakterier, vira og kemiske forbindelser, der også kan forårsage lugte der kan være til gene for personer i et lokale (Vorre et al., 2017a), (Hansen et al., 2018), (Brandt et al., 2013), (Rasmussen, 2018), (Gunnarsen, 2020b).

Der bliver i lokaler med større forsamlinger som institutioner skoler og fællesrum, ofte refereret til CO₂-koncentrationen, da denne virker som indikator for tilstedeværelsen af

de øvrige elementer i indeluften, hvilket ikke er tiffældet for temperatur og relativ fugtighed.

Som sporgas er CO₂-gassen, er til stede, såfremt der er en personbelastning (Bergsøe & og Afshari, 2012). Det er grundlæggende kendt at ved at for hver gang man øger ventilationen og der med luftskiftet med ude luft, så øges menneskets koncentrations- evne indlæring og derud over viser undersøgelser også at sygefraværet falder ved for- øgelse af luftskiftet (Toftum et al., 2011). I sidste ende peger studier også på, at god livslang luftkvalitet øger livslængden og mindsker risikoen for nogle af de betydeligste folkesygdomme, som hjertekarsygdomme og lungekræft (Jantunen et al., 2011).

Diverse forureningsniveauer i indeluften så som CO₂-koncentrationen, afhænger såle- des af emissionen og luftskiftet. Ved at kende CO₂-koncentrationens forløb hen over en given tidsperiode, kan luftskiftet der er til stede i lokalet estimeres. Der vil dog skulle tages forbehold for fejlkilder, som personer der puster i måleapparater, vil give et falsk udslag. CO₂-konstrationen over en bestemt tid og med et bestemt luftskifte, kan be- stemmes med fortyndingsligningen (Valbjørn et al., 2000):

$$C_t = C_i + \frac{Q_s}{V \cdot n} (1 - e^{-nt}) \quad (1)$$

hvor

C_t er koncentrationen til tiden t

C_i er koncentrationen i ventilationsluften

Q_s er tilført forurening i rummet pr. time

V er rummets volumen, m³

n er rummets luftskifte, antal gange pr. time

Som fortyndingsligningen viser så beregnes CO₂-koncentrationen efter en given en tids- periode C_t ved, at der med en startkoncentration i luften C_i tillægges tilført forurening, der divideres med rummets volumen, ganget med luftskiftet, der ganges med 1 minus eksponentialfunktionen af minus luftskiftet gange tiden.

CO₂-koncentration angives ofte i ppm (parts pr. million) dvs. kubikmeter CO₂ pr. kubik- meter luft, ganget med 1.000.000.

Eksempel:

Hvis en voksen mand udleder 17 liter CO₂ i timen, så har han i alt udledt 0,017 m³ CO₂.

I et rum med et volumen på 10 m³, bliver CO₂-koncentrationen efter en time således:

$$0,017 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 / 10 \text{ m}^3 \text{ luft} = \underline{0,0017 \text{ m}^3/\text{m}^3}$$

Og ved at gange 0,0017 m³/m³ med 1.000.000 fås koncentrationen angivet i ppm dvs. 1700 ppm.

Fortyndingsligningen fortæller ikke noget om hvornår, der er opnået en ligevægtskon- centration, mellem den konstant tilførte forurenings- og luft-mængde. Men der kan reg- nes med at 99,9 % af ligevægtskoncentrationen er opnået, efter hvad der i timer svarer til $6,9/n$. Det vil sige at ligevægtskoncentrationen med et luftskifte 0,5 h⁻¹ i ovenstående eksempel er opnået efter (Valbjørn et al., 2000):

$$6,9 / 0,5 \text{ h}^{-1} = \underline{13,8 \text{ timer}}$$

$$C_t = 400 \text{ ppm} + \frac{17000 \text{ ppm/time}}{10 \text{ m}^3 \cdot 0,5 \text{ h}^{-1}} (1 - e^{-0,5 \text{ h}^{-1} \cdot 13,8 \text{ timer}})$$

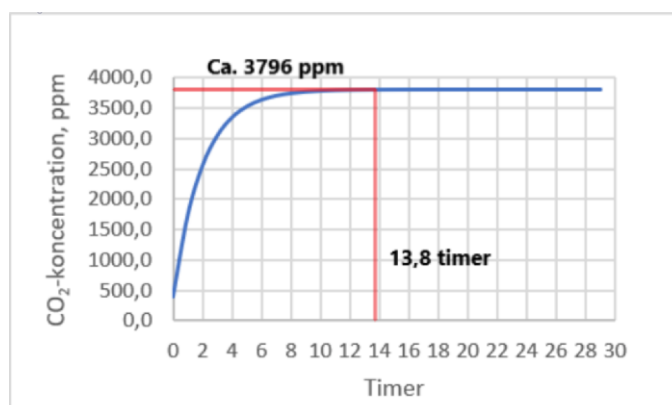
$$C_t = \underline{\underline{3796,6 \text{ ppm}} \text{ efter } 13,8 \text{ timer}}$$

Ved at anvende ligningen for hvert timeinterval opnås følgende værdisæt i Tabel 2.

Tabel 2. Ved anvendelse af fortyndingsligningen (Ligning(1)) til ovenstående eksempel, resultere det i værdierne i denne tabel. Kolonnerne viser henholdsvis timer og CO₂-koncentration i ppm. Det kan af tabellen ses at 99,9 % af ligevægtskoncentrationen (Valbjørn et al., 2000), er opnået efter ca. 14 timer ved et konstant luftskifte på 0,5 h⁻¹.

Timer	ppm	Timer	ppm	Timer	ppm	Timer	ppm	Timer	ppm
0	400,0	6	3630,7	12	3791,6	18	3799,6	24	3800,0
1	1737,8	7	3697,3	13	3794,9	19	3799,7	25	3800,0
2	2549,2	8	3737,7	14	3796,9	20	3799,8	26	3800,0
3	3041,4	9	3762,2	15	3798,1	21	3799,9	27	3800,0
4	3339,9	10	3777,1	16	3798,9	22	3799,9	28	3800,0
5	3520,9	11	3786,1	17	3799,3	23	3800,0	29	3800,0

Indsættes værdierne fra Tabel 2, i et kurvediagram fås følgende kurve i Figur 9.



Figur 9. Diagrammet viser værdierne fra Tabel 2. Hvis 13,8 timer på X-aksen og ca. 3796 ppm Y-aksen aflæses, skærer de to linjer hinanden ved kurven for CO₂-koncentrationen.

Ved udluftning, uden forureningstilførsel, vil CO₂-koncentrationen være aftagende med følgende ligning, hvor C_0 er CO₂-koncentrationen ved udluftningens begyndelse (Valbjørn et al., 2000):

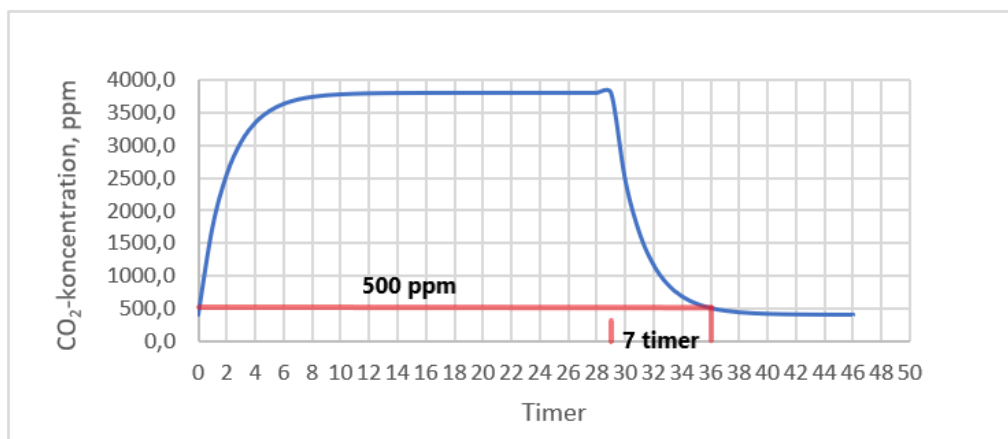
$$C_t = (C_0 - C_i) \cdot e^{-nt} \quad (2)$$

C_i er CO₂-koncentrationen i udeluften. Overført til ovenstående eksempel så er der her dog ikke tale om reel udluftning, men blot at forureningskilden er fjernes, der er dermed stadig et luftskifte på 0,5 h⁻¹. Efter 7 timer er CO₂-koncentrationen:

$$C_t = (3800 \text{ ppm} - 400 \text{ ppm}) \cdot e^{-0,5 \text{ h}^{-1} \cdot 7 \text{ timer}}$$

$$C_t = \underline{\underline{102,7 \text{ ppm}}}$$

Til de 102,7 ppm skal der så tillægges 400 ppm fra udeluftkoncentrationen. Dermed er den endelige CO₂-koncentration efter 7 timer på 502,7 ppm. Overført og som tillæg til diagrammet i Figur 9, så bliver aflæsningen på Y-aksen i Figur 10, efter 7 timers udluftning på ca. 500 ppm.



Figur 10. Diagrammet viser udviklingen fra Figur 9, hvor der efter 29 timer er tilføjet et forløb hvor forureningskilden er væk, men luftskiftet stadig er konstant med $0,5 \text{ h}^{-1}$. Efter yderligere 7 timer er CO_2 -koncentrationen reduceret fra ca. 3796 ppm til ca. 500 ppm.

Den aftagende kurve er en eksponentielt aftagende kurve og som nævnt uden forureningstilførsel.

Når CO_2 -koncentrationen i forvejen er kendt som f.eks. ved målinger, så kan man ved at isolere n i ligning (2), bestemme luftskiftet, såfremt den kurve man beregner ud fra, er eksponentielt aftagende. Isoleringen af n udføres herunder, dog med udeluftkoncentrationen fjernet fra ligningen.

$$\begin{aligned}
 C_t &= C_0 \cdot e^{-nt} \\
 \Downarrow \\
 \frac{C_t}{C_0} &= e^{-nt} \\
 \Downarrow \\
 \ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) &= -nt \\
 \ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) &= nt \\
 \Downarrow \\
 \ln(C_0) - \ln(C_t) &= nt \\
 \Downarrow \\
 \frac{\ln(C_0) - \ln(C_t)}{t} &= n
 \end{aligned} \tag{3}$$

Det er også muligt indsætte sine måledata i et regneark, som f.eks. excel, og bede computerprogrammet ligge en tendenslinje hen over henfaldskurven. Når tendenslinjen er lagt, kan programmet fremvise den tilhørende formel som dette eksempel:

$$y = 193,14e^{-0,283x} \tag{4}$$

EkspONENTEN i ligningen med værdien 0,283 er således luftskiftet h^{-1} .

2.4.5 Opholdszone

Opholdszonen i et lokale afgrænses inden for et bestemt volumen, hvor personer normalt forventes at opholde sig og hvor termiske og atmosfæriske betingelser skal opfyldes. Opholdszonen afgrænses lodret af gulvet og et vandret plan 1,8 meter over gulvet. Derudover afgrænses opholdszonen 0,2 meter fra indervægge og ydervægge. Er der tale om ydervægge bestående af større vinduesflader og døre, er afgrænsningen 0,6

meter fra disse. Er der spjæld i facade med direkte tilluft bør afgrænsningen af opholds-zonen være 1,0 meter fra denne (DS 447, 2013).

2.4.6 Varmebalance

Under ikke stationære forhold udtrykkes varmebalancen ved at den tilførte varme, er lig summen af varmetabet og den akkumulerede varme. (Steen-Thøde, 1976). Beregningen kan f.eks. foretages over en periode på 1 år og kræves på grund af kompleksiteten, udført i et computerprogram, som f.eks. Bsim. Parametrene der har indflydelse på den tilførte varme, er bl.a. opvarmningssystemer, personer og belastning fra solstråling.

Resultatet kan begrænses til at omfatte et enkelt lokale og hvor energiforbruget i kWh fremstår som nettoopvarmning (Wittchen et al., 2015).

.

3. Metoder og materialer

Nærværende metodeafsnit skal forstås som værende beskrivelser af måden hvorpå resultaterne fremskaffes eller beregnes. Da rapporten omhandler målinger hvor af resultater udtrækkes, og hvoraf resultater ligger til grund for luftskifteestimeringerne, der videre er med til at opstille en Bsim-model, foregår metodeafsnittet i flere trin.

- Trin 1: Metoder til måling er beskrevet i kapitel 3 og resultater af disse fremgår af kapitel 4.
- Trin 2: Metoder til estimering af luftskiftet, ud fra målingerne i resultatafsnittet i kapitel 4, er beskrevet i kapitel 3, hvor af resultaterne for estimeringerne fremgår af kapitel 4.
- Trin 3: På baggrund af resultater fra trin 1 og 2 i kapitel 4, beskrives metoder i kapitel 3, til at opstille og beregne indeklimasimulering. Resultaterne fra indeklimasimuleringen fremgår til sidst i kapitel 4.

De fleste af klasselokalerne i blok A og C er stort set identiske, hvor den største forskel er, at klasserne er orienteret mod øst og vest. Alligevel så opleves der forskellige indeklimaproblemer i de enkelte klasselokaler og fællesrum.

Projektet blev indledt ved en kort rundtur i blok A og blok C den 29. januar 2021. Her beskrev skolelederen, at blok A døjede med dårligt indeklima i form af dårlig luftkvalitet og høje temperaturer. Blok C blev beskrevet som med vekslende temperaturer, i de enkelte klasser. Temperaturforholdene er bedre i nogle af de vestvendte lokaler hvor i mod de østvendte, har for høje temperaturer. Der bliver jævnlige luft ud ved åbning af vinduer og døre. Formålet med den indledende gennemgang var også at planlægge og bestemme placeringen af måleudstyret.

På grund den igangværende coronapandemi og regeringens nedlukning af samfundet, her under folkeskoler, er der begrænsede muligheder for at kunne udføre kvalificerede indeklimamålinger, da målingerne indebærer at der er personophold. Der var ved opstart af første måleperiode ikke udsigt til hvornår folkeskolerne igen ville åbne op. I blok C var der dog alligevel enkelte lokaler, der var i brug til fysisk undervisning på grund af nødpasningsordning. Og valget faldt derfor på det lokale med flest elever hvilket var 2.C.

For at løse problemstillingen er der først foretaget målinger som skal danne grundlag for den videre analyse. Da den konkrete bygning, efter brugernes oplysninger, ofte udluftes til det fri hen over dagen, vurderes det indledningsvist at der kan være store og hurtige variationer i temperatur, CO₂-koncentration og relativ luftfugtighed hen over en skoledag. Der er derfor valgt at der måles og registreres i minutværdier.

Et af formålene med målingerne er at kunne estimere luftskiftet hen over dagen, for at kunne vurdere det aktuelle luftskifte i forhold til de nutidige gældende krav, der er stillet for netop at kunne sikre et godt indeklima med en god luftkvalitet. Her forsøges der at adskille de forskellige luftskifter i hvad, der er grundluftskifte i, og uden for brugstiden. Her ses der også på at underopdele grundluftskiftet i hvad der er passivt luftskifte og grundluftskifte der aktivt opretholdes med f.eks. mekanisk udsug. Ud over grundluftskiftet forsøges der også at fremvise luftskiftet ved forcering, f.eks. når der udluftes til det fri. Perioder hvor det er mest optimalt at beregne luftskiftet er når lokalet er helt tomt for elever, dermed er der ingen forureningskilder der påvirker henfaldskurven for den aftagende CO₂-koncentration og dermed kan luftskiftet estimeres, når luftskiftet i

fortyndingsligningen (ligning(4)) sættes som ubekendt. Dette scenarie har dog været vanskeligt at opnå, da klasserne anvendes til SFO fra slutningen af undervisningen og frem til kl. 17.00 hvor skolen lukker. Men det er dog i eftermiddagsperioderne at det er mest optimalt at estimere luftskifterne. Der blev dog også forsøgt at estimere luftskiftet under stigende CO₂-koncentration med personbelastning (ligning(1)). Se nærmere om dette i afsnit 3.5.1 estimering af luftskifter, og 3.5.2 Beregning af CO₂ pr. person.

Under opsætning og flytning af måleudstyret blev der samtidigt foretaget en bygningsregistrering og nogle korte interviews med brugerne. Det var nærliggende tale med personalet, der kunne fortælle om personantal og oplevelsen af indeklimaet i lokalerne under målingerne. Der er til projektet indhentet eksisterende tegningsmateriale, der i sidste ende har været anvendt til at opbygge en bygningsmodelleringsmodel i Bsim.

3.1 Bygningsregistrering

Det har været muligt at fremskaffe originalt tegningsmateriale med stor detaljeringsgrad. Tegningsmaterialet omfatter bl.a. af detaljerede planer, tværsnit, facader samt detaljer af opbygninger af glasfacadesystemer. Af tegningsmaterialet fremgår også oprindelig ventilationsplan fra år 1973.

Bygningsregistreringen foretages dels for at kontrollere, at det originale tegningsmateriale stemmer overens med nuværende forhold, men også for at konstatere om der er eventuelle svigt i bygningsdelene, der kan have indflydelse på indeklimaet.

3.1.1 Bygningsdele

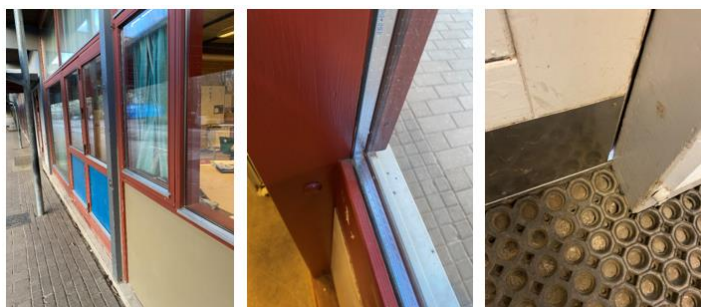
Bygningsregistreringen blev foretaget tirsdag d. 2. februar 2021 og omfattede kun det respektive klasselokale, hvor der samtidigt foretages målinger. Registreringen omfattede også den tilstødende garderobe og fællesrum. Her blev eksisterende plan og snit-tegning sammenholdt med forholdene på stedet og førstehåndsindtrykket indikererede hurtigt at bygningen, Blok C, fremstår i tæt på original stand.



Figur 11. Klasselokalet i 2.C i blok C. Bagerst ses tværvæggen af blankt murværk. I flere af klasselokalerne er gardinerne trukket for det meste af dagen.

Klasselokalernes tværskillevægge består af gule helstens teglvægge som vist på Figur 11. Skillevæggen ind mod fællesrummet består af lette gipsvægge. Facaden består i klasselokalet af et glasfacadesystem der vurderes at være oprindeligt, se venstre billede på Figur 12. Facadesystemet er opbygget med trækarme med primært glasfyldninger, men også isolerede blendefelter. Ruderne er tolagsruder der vurderes at være blandede med ældre og nyere ruder. I hvert klasselokale er der i facadesystemet en yderdør og et tophængt vindue uden umiddelbare utætheder. Facaden bærer præg af at der tidligere kan have været en glasskydedør i stedet for den nu sidehængte.

Yderdøren i garderoben der fremgår af højre billede på Figur 12 fremstår utæt. Der er anvendt papirstrimmeltest i vindue og yderdøre til at teste tætheden.



Tagkonstruktionen er en ventileret tagkonstruktion bestående af træåse, der hviler af på limtræsbjælker.

Linoleumsgulvet ligger på et delvist uisolaret betondæk

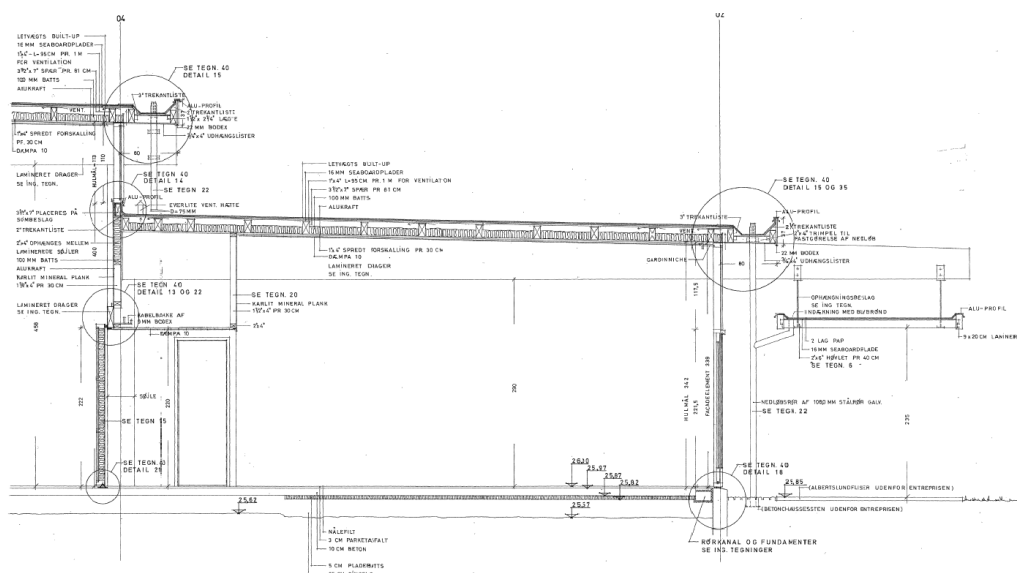
Figur 12. Billede tv: Let facadesystem. Billede mf: Der er tolagsglas i alle vinduer. Billede th: Yderdør i garderobe. Her ses utætheder mellem karm og dørblad.



De bærende bygningsdele består primært af limtræskonstruktioner. Af billedet på Figur 13 fremgår et view fra det høje fællesrum, der er det centrale rum i henholdsvis blok A og C. Oppe til venstre i billedet ses vinduesbåndet, der strækker sig i hele bygningens længde i begge sider.

Af Figur 14 ses et oprindeligt detailsnit af klasselokalet, hvor der i venstre side ses en lille del af fællesrummet.

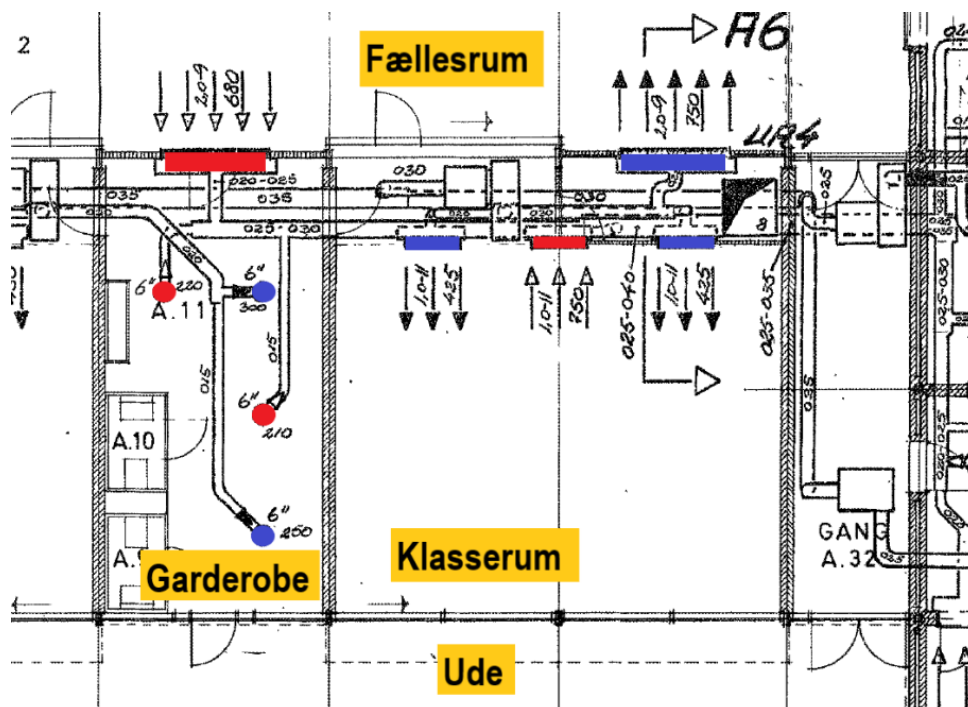
Figur 13. Fællesrummet i blok C med højt placerede vinduesbånd og radiatorer.



Figur 14. Oprindeligt detailsnit af klasselokale og delvist fællesrum.

3.1.2 Tekniske anlæg

Af den originale ventilationsplan fremgår ventilationssystemet, som et mekanisk ventilationsanlæg med indblæsning og udsugning som vist på Figur 15.



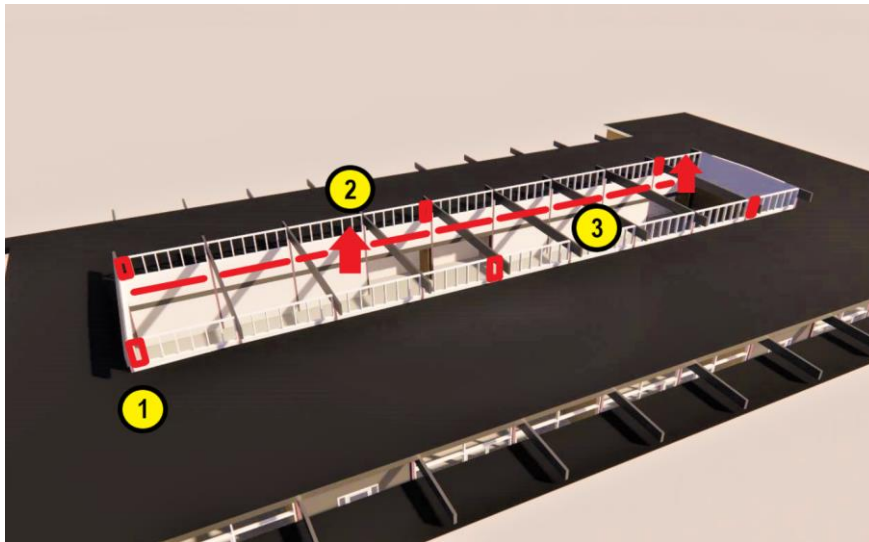
Figur 15. Oversigt over klasselokale med tilstødende garderobe og fællesrum. Oversigten er et udsnit fra den oprindelige ventilationsplan fra 1973 da skolebygningen blev opført. Ventilationssystemet bestod af mekanisk ventilationsanlæg med indblæsning markeret med blå og udsugning markeret med rødt.

I dag er det oprindelige ventilationssystem afblændet, efter oplysninger fra skolens tekniske personale. Ventilationsarmaturerne er dog stadig bevaret i klasserummene og garderober, som vist på Figur 16. Der var ved registreringen heller ingen indikation på at der var luftcirkulation gennem armaturerne. Udsugningsarmaturet i fællesrummet, vist på Figur 15 ud for garderoben, var udskiftet og ændret således at der nu sidder en jalousirist med permanent åben forbindelse mellem garderoben og fællesrummet. I hvert toiletrum i garderoben er der et aftræk i loftet, der vurderes at føre direkte til det fri over tag.



Figur 16. Billedet viser de to af de tre bevarede ventilationsarmaturer i klasselokalet, der er indbygget i et lukket loftskørt. Indblæsningsarmaturet er vist med blå ramme og udsugningsarmaturet er vist med rød ramme.

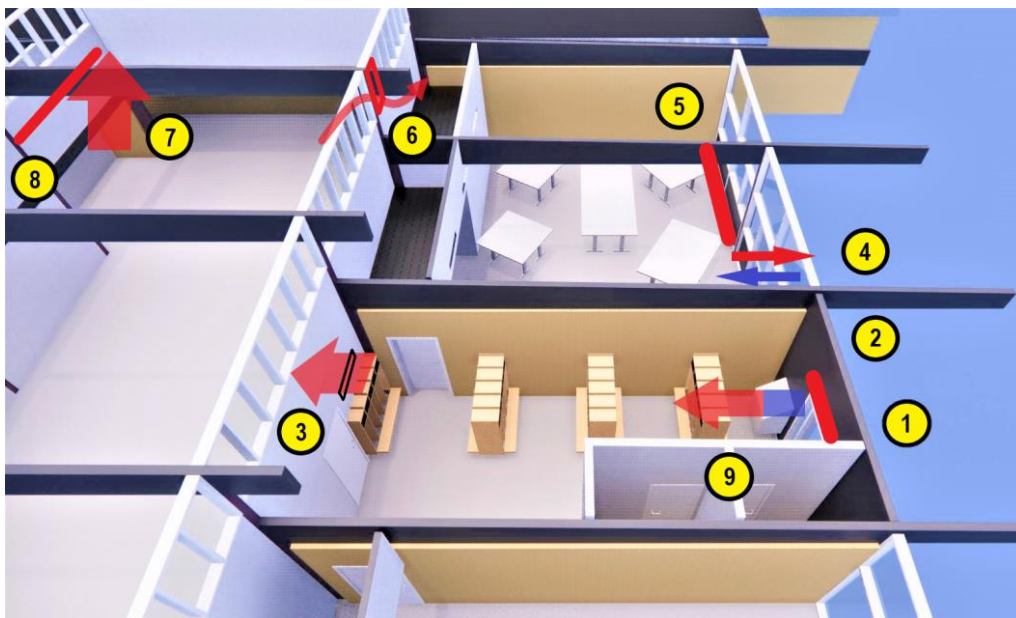
Til forskel for den oprindelige ventilationsplan er der i dag installeret 2 stk. mekaniske udsug der er centreret i det høje loft i fællesrummet som vist på Figur 17. Af figuren ses også at langs fællesrummets vinduesbånd mod øst og vest, sidder der i hvert bånd tre vinduesopluk bestående af tophængte vinduer. Vinduesopluk og de to mekaniske udsug i fællesrummet er automatisk styret. Skolens tekniske personale har ikke kunnet oplyse hvorledes disse er styret. Men styringerne formodes at være på CO₂, temperatur og tid. Som det også ses af Figur 17, så sidder der lige under vinduesbåndene, radiatorer der er placeret over opholdszonen.



Figur 17. Perspektiv af fællesrummet. [1] Tophængte vinduer i fællesrum. Vinduerne er automatisk styret. [2] Mekanisk udsugning direkte til det fri over tag uden varmegenvinding. [3] Under hvert vinduesbånd i fællesrum er der monteret radiatorer.

Af Figur 18 ses ventilationsprincippet og princippet for varmfordelingsanlægget. Blok C har kælder i den nordlige og sydlige ende. Kælderen i den nordlige ende indeholder teknikrummet, hvor centralvarmeanlægget drives af en naturgaskedel der også forsyner bygningen med varmt brugsvand. Hver bygningsblok på skolen har sit eget teknikrum og egen naturgaskedel.

Centralvarmeanlægget forsyner radiatorerne, og som det fremgår af Figur 18 er der, ud over i fællesrummet, placeret en radiator i klasselokalet, der dækker facadevæggens ene halvdel.



Figur 18. Perspektiv over klasselokale, garderobe. En del af fællesrummet er vist i venstre side. [1] Radiator over indgangsdør. [2] Varmeflade drevet af centralvarmeanlægget hvor igennem der trækkes udeluft ind i garderoben. [3] Åben jalousirist mellem garderobe og fællesrum. [4] Sekundær udgangsdør fra klasserum samt tophængt vindue. [5] Radiator. [6] Tophængt vindue i fællesrum. Vinduet er automatisk styret. [7] Mekanisk udsugning direkte til det fri over tag uden varmegenvinding. [8] Under hvert vinduesbånd i fællesrummet er der monteret radiatorer. [9] Der er naturligt aftræk til det fri i loftet på begge toiletter.



Figur 19. I alle garderober er der monteret en varmeblade i facaden kombineret med luftindtag til erstatningsluft.

I hver garderobe er der i facaden monteret en varmeblade som vist på billedet i Figur 19, der drives af centralvarmeanlægget. Ud fra det tekniske personales oplysninger er tilstanden og dermed funktionen blandede. Nogle af varmebladerne virker og andre lades ikke til at virke. På fremløbet til varmebladerne er der monteret automatiske ventiler, der formodes at være styret i sammenhæng med det mekaniske udsug, samt vinduesopluk i fællesrummet.

Igennem varmebladen trækkes luften ind igennem garderoben og videre gennem jalousiristen, såfremt døren mellem garderobe og fællesrum skulle være lukket, ind i fællesrummet. Herfra suges luften ud af de mekaniske udsug i toppen af fællesrummet, eller ventileres ud via tværventilation der opstår når vinduesopluk åbnes i fællesrummet. Ventilationssystemet har således kun en mærkbar effekt på klasselokalerne hvis dørene står åbne.

I klasselokalet er der kun mulighed for ventilering hvis dørene til fællesrum og garderobe står åbne, eller hvis der udluftes til det fri fra klasselokalets yderdør eller vindue. Her vil ventilationsprincippet være ensidig ventilering. Når dørene til klasselokalet er lukkede, formodes det at der, fra de mekaniske udsug i fællesrummet, trækkes luft under dørene der ikke har bundstykke og dermed, bidrager minimalt til luftsiftet med erstatningsluft fra garderobe og evt. utætheder i klimaskærmen. Billeder fra registreringen fremgår af bilag 5.

3.2 Målinger

Lufttemperaturer, relativ luftfugtighed og belysningsstyrke blev målt med batteridrevne HOBO-dataloggere. Til hver af HOBO-loggerne blev der tilkoblet CO₂-målere, der drives af 240 V strømforsyning. Under alle målingerne har de samme CO₂-målere, været tilkoblet de samme HOBO-loggere og det er ID-nummeret fra HOBO-loggerne der gennemgående fremvises i projektet.

ID-numrene er således: 10028340, 10028360, 10028373, 10028379, 10028381 og 10028385.

Der er også blevet målt med EASY-dataloggere der ligeledes er batteridrevne der dog kun måler lufttemperaturer og relativ luftfugtighed.

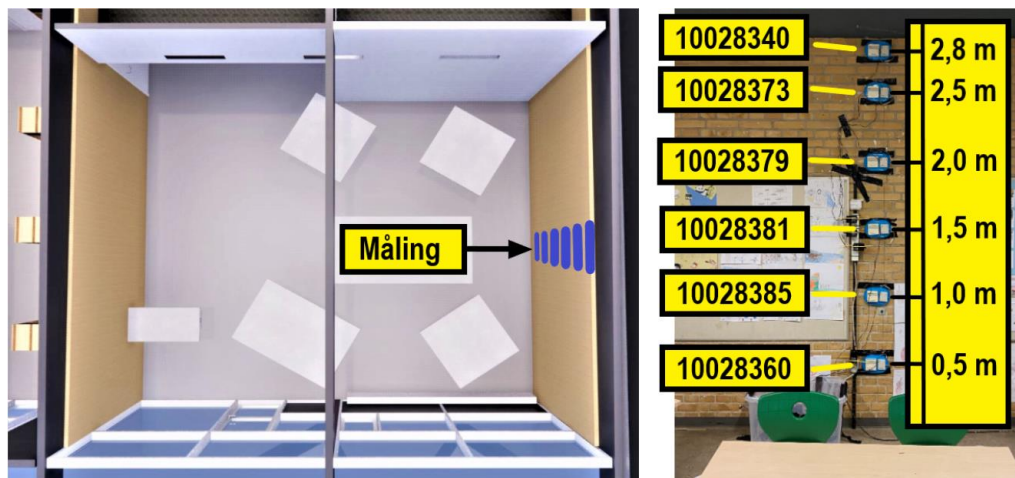
ID- numrene på EASY-loggerne er: 5195, 5449 og 5511

Måleudstyret har inden målingerne været testet for evt. unøjagtigheder, således at evt. unøjagtighederne medtages i vurderingerne af resultaterne. Se test og kalibrering af måleudstyret på bilag 4.

Der er i alt blevet foretaget fire målinger, hvor der samtidigt også har været målt på udvendig lufttemperatur og relativ luftfugtighed. På trods af at HOBO-loggerne måler belysningsstyrke, er dette dog ikke viderebearbejdet i projektet.

De tre første målinger blev udført med henblik på at undersøge 2.C's klasselokale i blok C. Der er også under målingerne blevet målt på lufttemperatur, og relativ luftfugtighed i fællesrummet.

Formålet med den fjerde måling var at sammenligne 2.C's klasse lokale, med 3.B der også er placeret i blok C, samt 0.B og 1.B i blok A. Der blev også her samtidigt, målt på lufttemperaturer og relativ luftfugtighed i begge tilhørende fællesrum, samt på udeluften.

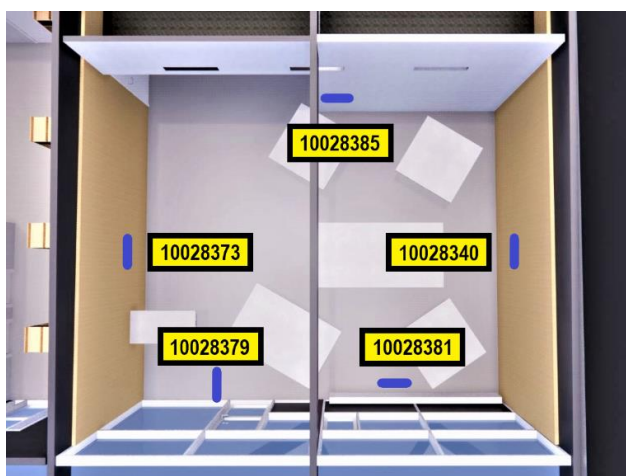


Figur 20. Placering af måleudstyr ved første og anden måling i 2.C i blok C. Målerne består af en HOBO-datalogger med tilkoblet CO₂-måler og er placeret på en nordvendt vægflade. ID-numrene beskriver nummeret på de enkelte HOBO-loggere og er gennemgående anvendt i figurene i projektet. Målerne er placeret med 0,5 m afstand med undtagelse af den øverste der er placeret med 0,3 m afstand.

Den første måling blev foretaget fra d. 1. til d. 5. februar og den anden måling blev foretaget mellem d. 8. til d. 9. februar. Der blev ved begge målinger anvendt samme opstilling som fremgår af Figur 20.

De første to målinger går ud på at måle temperaturlagdelingen i højden, samt evt. forskel i CO₂-koncentrationen. Årsagen til at der blev udført to ens opstillinger ved de første målinger, er at personbelastningen under første måling var hæmmet af nedlukket, forårsaget af coronapandemien. Under første måling blev der af underviseren indberettet et elevantal på mellem 7 og 10 elever. Under anden måling blev der indberettet et elevantal 26 elever.

Udover at måle på forskelle i CO₂-koncentration og lufttemperaturer i højden er det også interessant at finde ud af hvor hurtigt forskellene variere og opfører sig ved pludselige ændringer i luftskiftet som f.eks. ved udluftning til det fri. Målerne er placeret lodret over hinanden med en afstand på 0,5 m i klasselokalets midterakse parallelt med facaden.



Figur 21. Vandret placering af målere ved tredje måling i 2.C i blok C. Målerne er alle placeret ca. 1 m over gulv.

Den tredje måling blev udført fra d. 9. til den 12. februar, og her blev der målt fem forskellige steder i lokalet i 2.C i vandret plan, og med målerne placeret ca. 1 m over gulv, som vist på Figur 21. Der blev af klasselokalets underviser angivet, at der under målingen har været 26 elever i klassen.

Formålet med opstillingen er ligesom ved første og anden måling, at undersøge variationerne i lufttemperatur og CO₂-koncentration igennem en skoledag.

[illegible]

Hensigten med den fjerde måling var at måle evt. variationer i indeklimaet i forskellige klasselokaler, med 2.C's klasse som reference til første, anden og tredje måling.

Under flytning af måleudstyr er der udført små korte interviews med undervisere og pædagoger i nærområderne, til de respektive klasselokaler samt med teknisk personale.

Gennemgangen med lederen var med henblik på at finde et passende lokale, til at måle CO₂-koncentration. Og på grund af nedlukket var udvalget begrænset. Vi gik igennem blok A. Her er der udfordringer med indeklimaet, både i forhold til varme og dårlig luftkvalitet. I blok C er der de samme problemer. Her er det særligt lokalerne mod øst der har problemer med høj varme. Skolelederen oplyser at brugerne selv åbner vinduer og døre til det fri, som det nu passer. De regulerer dog ikke umiddelbart selv på termostatventilerne til radiatorerne.

Under kontrol af måleudstyr blev der af underviseren oplyst, at det pågældende lokale er 2.klasse. Aktivitetsniveauet er for det meste koncentreret og stillesiddende. Dags dato har der både i klasselokalet og i fællesrummet, været koldt og oplevet træk. Gardinerne er trukket for af hensyn til, at eleverne bedre kan se den interaktive tavle.

Ud fra et lille telefoninterview med en medarbejder fra det tekniske personale d. 4. februar, blev det oplyst at blok C og så vidt også blok A, er naturligt ventileret men suppleret med to mekanisk udsug i fællesrummet. Der sidder en jalousirist med varmeflade i hver garderobe, hvor erstatningsluften trækkes ind. Der er ikke installeret nogen former for varmegenvinding. Ellers foregår øvrig ventilering ved at der manuelt luftes ud til det fri, via klasselokalernes vinduer eller yderdøre, nogle gange om dagen, ofte i pauser. Eleverne bliver også oplært i at åbne vinduer og døre i pauserne.

Side 28

personale ikke klarhed over, om vinduerne styres efter CO₂, relativ luftfugtighed, lufttemperatur eller efter et ur. Der er en styring på der gør, at vinduerne ikke er åbne efter kl. 17.00 hvor skolen er lukket.

Der nævnes at der oprindeligt har været mekanisk balanceret ventilation, hvor armaturer i klasselokaler og garderober stadig er placeret i henholdsvis vægge og loft. Kanalerne til systemet er afblændet.

Varmeanlægget kører med samme kapacitet i hele døgnet, da erfaringer har vist at det er billigere. Elever og lærer har adgang til selv at regulerer termostatventilerne, på radiatorerne i klasselokalerne. I fællesrummet sidder termostaterne for højt, til at kunne reguleres. Der er centralvarmeanlæg i hver blok, der drives af hver deres gaskedel. Det tekniske personale kan ikke fremskaffe oplysninger om gasforbruget, da forbruget ikke bliver arkiveret af skolens tekniske personale. Gasmålerne bliver aflæst her måned og indberettet til Holbæk Kommune.

Der nævnes også at indeklimaet i blok C er nogenlunde i orden, hvilket nok skyldes utætheder. Der bliver dog brugt forholdsvist meget energi på opvarmning. Det står værre til med indeklimaet i den nye blok, der er opført i ca. år 2009.

3.3.4 Interview 5. februar

I forbindelse med flytning af måleudstyret fra første måling i uge 5, blev der d. 5. februar oplyst af underviseren fra 2.C, at der tirsdag til torsdag har været mellem 10 og 11 elever. Fredag har der været 7 elever.

3.3.5 Interview 9. februar

I forbindelse med flytning af måleudstyr efter anden måling i uge 6, blev der d. 9. februar oplyst af personalet at der i 2.C er koldt, og eleverne der sidder ved vinduessiden, oplever mere træk og kulde end de andre. Det blev også oplyst at der under den anden måling d. 8. til 9. februar, har været 24 elever i klassen. Når klassen er fuldtallig, er der 26 elever i klassen. I andre rum i samme blok, opleveres temperaturen varmere, og i blok A opleves luftkvaliteten værre end i blok C.

3.3.6 12. februar

I forbindelse med nedtagning af måleudstyr, d. 12. februar efter tredje måling, blev det oplyst at der har været 26 elever i klassen.

3.3.7 2. marts

Den fjerde måling blev udført mellem 2. og 5. marts. Og her blev det oplyst at der i 3.B er 27 elever, og i 0.B er der 26 elever.

3.4 Designværdier

Måleresultater og estimerede værdier opstilles og sammenlignes, med designværdier der repræsenterer de nødvendige nutidige krav, til opnåelse af et acceptabelt indeklima ud fra et nutidigt perspektiv.

3.4.1 Termisk indeklima

Jf. BR18 skal det sikres at der, i rum hvor personer opholder sig i længere tid, er et sundheds- og komfortmæssigt godt indeklima. Metoderne til at specificerer kravene til det termiske indeklima, er i nærværende projekt anvendt, med udgangspunkt i *DS 474 Norm for specifikation af termisk indeklima* og *DS/EN ISO 7730 Bestemmelse af termisk komfort*, samt *Branchevejledning for indeklimaberegninger*.

Ved bestemmelse af det termiske indeklima, refereres der i dag til *Branchevejledning for indeklimaberegninger* (Vorre et al., 2017a). Her inddeles bygningen eller lokalet, som nævnt under teori afsnittet, i en af tre indeklimaklasser, Minimum, Standard eller Ambitiøs. I DS/EN ISO 7730 benævnes det indeklimakategori A, B og C hvor A svarer til Ambitiøs. I DS-EN 15251 hedder kategorierne I, II, III og tilmed IV hvor I svarer til Ambitiøs, denne standard er dog i dag tilbagetrukket. Iht. *Branchevejledning for indeklimaberegninger*, hører skoler under indeklimaklassen standard, og af Tabel 3 ses krav fra DS/EN ISO 7730 der svarer samme indeklimaklasse. Og af tabellen kan det ses at PPD-indekset, dvs. procentandelen med utilfredse, skal være under 10 % og dermed skal PMV-indekset ved beregning, ligge mellem -0,5 og + 0,5. Draught rate skal være under 20 %. Ved lodret temperatur difference, må maksimalt 5 % være utilfredse og der skal være under 3 °C i forskel mellem hoved og gulv.

I yderste højre kolonne fremgår kravene til strålingsasymmetrien med hvilket, under 5 % af personerne i et lokale må være utilfredse. For et varmt loft må der maksimalt være 5 °C varmere, end i forhold til personerne. For kolde vægge skal der være under 10 °C forskel. For et koldt loft er det 14 °C og for en varm væg er det 23 °C.

Tabel 3. Kravsspecifikation til det generelle termiske indeklima i undervisningslokalet iht. DS/EN ISO 7730. Kategorien er B for undervisningslokaler, hvilket betyder at procentandelen af utilfredse (PPD) skal være på under 10 %. Her skal den beregnede PMV-værdi tilsvarende være mellem -0,5 og 0,5 for at kravet til PPD-indekset er opfyldt. Udover kravet til det generelle termiske indeklima er stilles der også i yderste højre skema krav til lokalt termisk ubehag, som trækgener, lodret temperaturdifference, gulvtemperatur og strålingstemperatursymmetrien.

Klasselokale Kategori/Inde- klimaklasse	PMV- og PPD- index		Lokal diskomfort					
	PPD	PMV	DR* (draught rate) iht. ISO/EN 7730	Lodret temperatur- difference	Gulv- temperatur	Strålingstemperatursymmetri		
B/II/standard	<10%	-0,5 < PMV < 0,5	<20% (PD**)	<5% (PD**) og <3 °C	<10% (PD**) og 19-29 °C	<5% (PD**)		
						Varmt loft	Kold væg	Koldt loft
						<5 °C	<10 °C	<14 °C
								Varm væg
								<23 °C

*Kravet til DR i BR18 er <20%

**PD procentandel af utilfredse

Anbefalingerne til den dimensionerende operative temperatur i et klasselokale, der i BR18 henviser til DS/EN ISO 7730 fremgår af Tabel 4, hvor der fremgår anbefalinger til sommer og vintersæsonen, med henholdsvis en middel operative temperaturer på 24,5 og 22 °C.

Tabel 4. Af DS/EN ISO 7730 fremgår der krav til den dimensionerende operative temperatur, ved et givent aktivitetsniveau i sommer og vinterperioden. I "Branchevejledning for indeklimaberegninger" fremgår der desuden også krav til overgangsperioderne ved forår og efterår. Kravet til max. middellufthastighed i m/s fremgår af DS/EN ISO 7730. Beklædningen angivet i clo og som isolans (m²K/W), er af samme standard aflæst på diagram, med den optimale operative temperatur, som funktion aktivitetsniveau og beklædning, hvilket også er illustreret på figur 23.

Krav til dimensionerende operative temperaturer				
Aktivitetsniveau		Sommer	Overgang	Vinter
1,2	70 W/m ²	22,0 – 26,0	21,0 – 26,0	21,0 – 24,5
		24,5 +- 1,5		22 +- 2
Max. middel lufthastighed m/s				
		0,19		0,16
Beklædning				
Isolering	clo	0,55	0,7	0,8
	m ² K/W	0,88	0,11	0,125

ISO/EN 7730

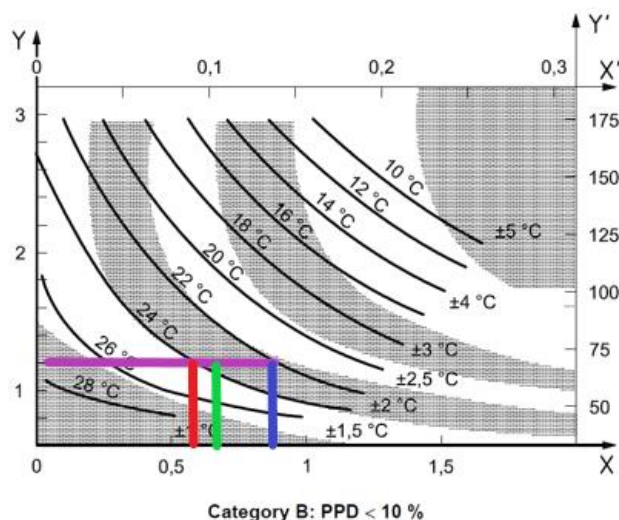
Aflæst på diagram på Figur 23

Temperaturerne afviger lidt fra *Branchevejledning for indeklimaberegninger* (Vorre et al., 2017a), hvor der også fremgår anbefalinger til operativ temperatur i overgangsperioderne, dvs. forår og efterår. Det fremgår samtidigt også af DS/EN ISO 7730 at anbefalingerne til temperaturerne, er med udgangspunkt i et aktivitetsniveau på 1,2 met.

Anbefalingerne i DS/EN ISO 7730 til maksimal middellufthastighed, er om sommeren 0,19 m/s og om vinteren 0,16 m/s.

Af BR18 og *Branchevejledning for indeklimaberegninger*, fremgår kravspecifikationer for hvor mange timer i brugstiden, at den operative temperatur må overskride henholdsvis 26 og 27 °C. I brugstiden må den operative temperatur maksimalt overskride 26 °C i 100 timer om året, og maksimalt overskride 27 °C med 25 timer om året.

Det pågældende aktivitetsniveau i forhold til beklædning, der opleves behageligt i forhold til bestemte operative temperaturer, kan aflæses af Figur 23, hvor af der fremgår diagram udtrykt fra DS/EN ISO 7730. Den lilla streg markerer aktivitetsniveauet på 1,2 og ved 24 °C, der er anbefalede temperaturer om sommeren, svare det til en varmeisolering, med isolans på ca. 0,88 m²K/W, hvilket svare til ca. 0,55 clo. I overgangsperioderne kan der aflæses ca. 0,7 clo og i vinterperioden aflæses der ca. 0,8 clo.



Figur 23. Diagrammet med den optimale operative temperatur, som funktion aktivitetsniveau og beklædning iht. DS/EN ISO 7730 tilhørende kategorien B. Den lilla streg markerer et aktivitetsniveau på 1,2 met (Y-aksen) og samtidig, en varmeafgivelse på ca. 70 W (Y'-aksen). Den lilla streg krydser kurven for den operative temperatur på 24 °C, der er kravet om sommeren, ved ca. 0,55 clo (X-aksen) eller isolansen for beklædningen på ca. 0,9 m²°C/W (X'-aksen), (rød streg). Grøn-streg indikerer tilsvarende clo i overgangsperioden og blå streg indikerer clo i vinterperioden.

3.4.2 Ventilation

I et undervisningslokale stilles der i dag iht. BR18 krav, til at der ventileres efter lokalets personbelastning og nettoareal, som angivet i Tabel 5. Ventilationsbehovet skal sikre at indeklimaet, i bygningen holdes på et sundhedsmæssigt forsvarligt niveau. Der skal indblæses og udsuges luftmængder på 5 l/s pr. person samt 0,35 l/s pr. m² i brugstiden. Der regnes i denne sammenhæng med samme luftmængder for skolebørn som for voksne.

De angivne luftmængder kan anvendes såfremt der er anvendes lavforurenende byggematerialer.

Hvis der etableres mekanisk ventilation, skal der udover indblæsning og udsugning, være varmegenvinding. Der kan reduceres i luftmængderne såfremt, at ventilationssystemet er behovsstyret efter belastningen, dog med minimum 0,35 l/s pr. m² i brugstiden. Nettoarealet i klasselokalet er 61,2 m² og rumvolumen er 203,8 m³. Den pågældende skole har ikke over 27 elever i et klasselokale, også påregnes der 1 lærer.

Tabel 5. Oversigt over areal, rumvolumen og personantal i klasselokalet i 2.C, samt BR18 krav til ventilation. Med 27 elever og 1 lærer samt et nettoareal på 61,17 m², er ventilationsbehovet i alt 525.410 l/h. Omregnet med et rumvolumen på 203.754 l så svare det til et luftskifte på 2,5 h⁻¹.

Klasselokale			Ventilationskrav BR18	Ventilationsbehov	
Nettoareal	61,17 m ²		5,0 l/s pr. person	140,0 l/s	504.000 l/h
Rumvolumen	203,75 m ³	203.754 l	0,35 l/s pr. m ²	21,4 l/s	21.410 l/h
Antal personer	27 elever		Ventilationsbehov i alt		525.410 l/h
	1 lærer		Luftskifte		2,5 h ⁻¹

Ventilationsbehovet er derfor med 28 personer 140 l/s + 21,4 l/s i alt 525.410 liter i timen eller et luftskifte på 2,5 h⁻¹.

Derud over skal det sikres at der under de dimensionerende forhold ikke forekommer en CO₂-koncentration der overstiger 1.000 ppm iht. BR18.

Ud over indeklimakravende i BR18 er læren også underlagt arbejdsmiljøkrav.

3.4.3 Luftkvalitet

DS 15251 er tilbagetrukket og der er i dag et krav om, at der skal være et tillæg til luftmængder ved anvendelse eller forekomst, af ikke lavforurenende byggematerialer (BR18).

3.5 Beregninger

Luftskiftet og indeklimabelastningen fra personer i de enkelte klasselokaler, vurderes på baggrund af indeklimamålingerne.

Der opbygges en Bsim-model der kalibreres i forhold til måleresultaterne. Klasselokalet for 2.C i blok C, er det primære lokale for målingerne. Målinger i andre lokaler er udført samtidig med referencemålinger i det primære klasselokale. Eleverne i 2.C har en alder på mellem 7 og 8 år.

3.5.1 Estimering af luftskifte

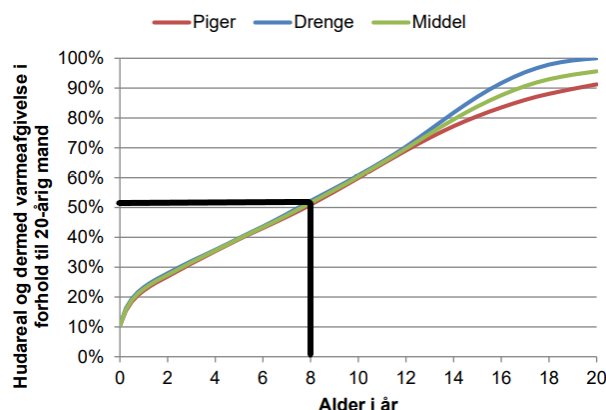
På baggrund måleresultaterne estimeres luftskiftet og dets variationer hen over en dag. Til beregningen anvendes fortyndingsligningen (ligning(1),(2),(3) og (4)), som tidligere nævnt, men hvor fortyndingsligningen anvender timeværdier, og måleresultaterne er minutværdier, så er fortyndingsligningen tilpasset til minutværdierne. Et lille udtræk af metoden er vist på bilag 2.

3.5.2 Beregning af CO₂ pr. person

For at inddrage CO₂-belastningen er det nødvendigt, at tilpasse belastningen i forhold til elevernes alder og antal, inkl. én voksen lærer, samt deres aktivitetsniveauer. For at kunne sammenligne resultaterne, estimeres luftskifter for den fjerde måling, over den samme dag i henholdsvis 2.C og 3.B i blok C og 0.B og 1.B i blok A. Der skal derfor korrigeres for fire forskellige aldersgrupper, i forhold til CO₂-belastningen fra en voksen.

Alderen for børn i 0.B klasse er mellem 5 og 6 år, i 1.B er alderen mellem 6 og 7 år. I 2.B er alderen mellem 7 og 8 år og i 3.B er alderen mellem 8 og 9 år.

Som tidligere nævnt afgiver et voksent menneske en CO₂-mængde på ca. 17 l/h pr. met (Vorre et al., 2017b). Ifølge *Branchevejledningen for indeklimaberegninger – Bilag 1, Baggrundsanalyser*, kan der for skolebørn regnes med en varme- og CO₂-afgivelse fra en 16-årig skoleelev. Men i dette tilfælde hvor luftskiftet skal estimeres på baggrund af CO₂-målingerne, så bliver afgivelserne tilpasset de ovenstående aldersgrupper. For justering af varme- og CO₂-afgivelse anvendes diagrammet i Figur 24, der er med udgangspunkt i en 20-årig dansk mand.



Figur 24. Varmeafgivelse i forhold til alder. Ved en alder på 8 år afgives der 51% varme i forhold til en voksen mand (Vorre et al., 2017b).

Den markerede aflæsning på Figur 24, viser varme- og dermed CO₂-afgivelsen fra et 8-årigt barn, er på 51 % forhold til en voksen mand. Samme aflæsning fra de øvrige aldersgrupper er overført på Tabel 6, hvor aflæsningen også fremstår, som varmeafgivelse, samt andelen der afgives som tør varme. Under fjerde måling lykkedes det ikke at få fremlagt elevtallet på de pågældende dage. I 3.C er der til dagligt 27 elever, i 0.B er der 26 elever. For 1.B er elevantallet ikke fremskaffet. I Tabel 6 er varme- og CO₂-afgivelse omsat, til samlet afgivelse for 26 elever og 1 lærer i hver klasse. Således er samlet CO₂-afgivelse fra personer i 0.B 244 l/h, i 1.B er det 265 l/h, i 2.C er det 291 l/h og i 3.B er afgivelsen 312 l/h.

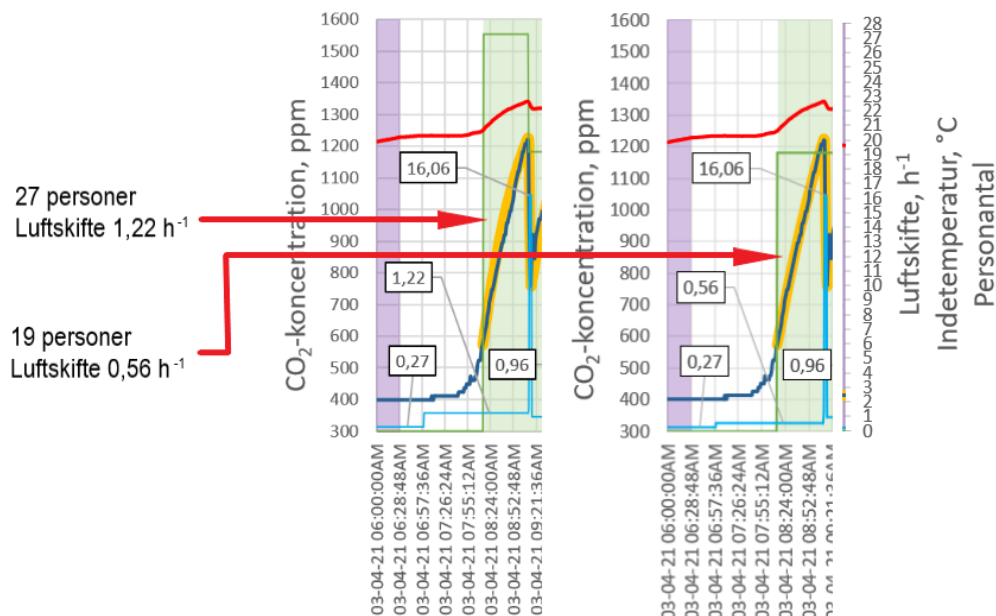
Tabel 6. Alderskorrektion i forhold til en voksen 20 årig mand. Af korrektionen kan der ses afgivelse af CO₂ og varme fra én person, samt for alle personer i klassen. Antallet af elever i klasserne er generelt 26 til 27 elever.

Alderskorrektion ved aktivitetsniveau på 1,2 met								
	Alderskorrektion	CO ₂ -forurening pr. person	Varmeafgivelse pr. person	Andel af tør varme pr. person	Antal elever	Antal lærer	Samlet CO ₂ -afgivelse	Samlet afgivelse af tør varme
Voksen, 20 år	100%	20,4 l/h	143 W	100 W	-	-	-	-
0.B, 5-6 år (6 år)	42%	8,6 l/h	60 W	42 W	26	1	244 l/h	1192 W
1.B, 6-7 år (7 år)	46%	9,4 l/h	66 W	46 W	26	1	265 l/h	1296 W
2.C, 7-8 år (8 år)	51%	10,4 l/h	73 W	51 W	26	1	291 l/h	1426 W
3.B, 8-9 år (9 år)	55%	11,2 l/h	79 W	55 W	26	1	312 l/h	1530 W

Under estimeringen af luftskiftet, har det dog vist sig at være nødvendigt, at nedsætte personantallet en del. Som eksempel vises på Figur 25, et udtræk fra estimeringen af luftskiftet fra Figur 40 i resultatafsnittet. På Figur 25, er den målte CO₂-koncentration vist med mørkeblå kurve i 2.C. Den bagvedliggende gule fede kurve, er en estimeret CO₂-koncentration. For beregning af den estimerede CO₂-kurve, er fortyndningsligningen ((ligning(1),(2),(3) og (4)) anvendt i et excel-ark, og om sat til minuttværdier. Og her ses det at ved et personantal på 27 personer (grøn kurve), vist i venstre side på Figur 25,

skal der et luftskifte på $1,22 \text{ h}^{-1}$ til, for at kurven følger den målte kurve, og for at CO_2 -koncentrationen ender på ca. 1220 ppm kl. 9.00. Dette resulterer i en lidt krum kurve i forhold til den målte. I højre side er personantallet nedjusteret til 19 personer, dvs. 18 elever og 1 lærer der afgiver 207,7 liter CO_2 i timen. Her skal der være et luftskifte på ca. $0,56 \text{ h}^{-1}$ for at den estimerede CO_2 -kurve følger den målte.

2.C - Luftskifte



Figur 25. Diagrammet viser baggrunden for estimeringen af luftskiftet (lysblå kurve). I det venstre diagram ses den gule fede kurve, der er den estimerede CO_2 -koncentration i forhold til den målte, vist med mørkeblå. Her er der regnet med 27 personer (grøn kurve). Den gule kurve der er mere krum, følger ikke den blå hvilket skyldes det højere luftskifte der skal til, for at ramme en CO_2 -koncentration på ca. 1220 ppm. I det højre diagram er personantallet reduceret til 19 personer, med et luftskifte på $0,56 \text{ h}^{-1}$ hvilket, får kurven til tilnærmelsesvist, at følge den målte. Denne metode er anvendt i vurderingen af luftskiftet i resultatafsnittet. Etiketterne i diagrammet viser udtræk af det estimerede luftskifte.

Hvis der var tale om at få de 26 elever på 8 år til at passe med CO_2 -afgivelsen fra 19 elever dvs. 207,7 l/h vil det svare til, at hvis man regner baglæns til en voksen person, så er CO_2 -afgivelsen på 14,1 l/h:

$$(207,7 \text{ l/h} - 20,4 \text{ l/h}) / 26 \text{ elever} = 7,2 \text{ l/h pr. elev}$$

$$7,2 \text{ l/h pr. elev} / 51\% \cdot 100\% = \underline{14,1 \text{ l/h pr. voksen person}}$$

Hvilket svare til et aktivitetsniveau på:

$$14,1 \text{ l/h} / 20,4 \text{ l/h} = \underline{0,83 \text{ met.}}$$

Det svarer til et liggende/hvilende aktivitetsniveau. Det virker dog urealistisk og derfor er personantallet i stedet for reduceret:

Tendensen til at nedjusterer personantallet, er nogenlunde den samme igennem alle beregningerne dog med et par undtagelser.

På diagrammerne for estimering af luftskifter, fremgår også det anvendte personantal som grøn kurve og luftskiftet som lys blå kurve.

I 2.C og 3.B er der ved estimering af luftskifter, regnet med et aktivitetsniveau på 1,2 met. For 0.B og 1.B er der i estimeringerne regnet med 1,6 met.

Den estimerede CO₂-koncentration er beregnet i flere led dvs. ved opadgående CO₂-kurve anvendes ligning (1) og ved aftagende kurver er der vekslet mellem ligning (2) og (3). Og ligning (4) har været anvendt som kontrol, med pålægning af tendenslinje, for at se om kurven er eksponentielt aftagende. Det har f.eks. betydet at en aftagende kurve skulle deles op i tre led, med tre forskellige luftskifter, for at få tendenslinjen til at passe.

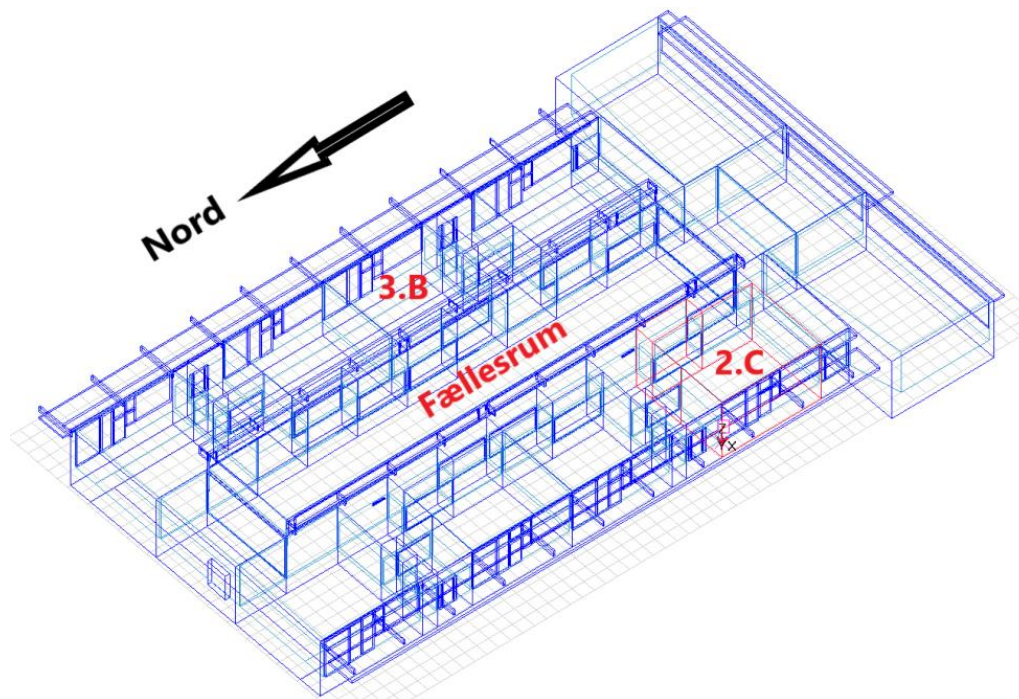
3.5.3 Bsim

Hensigten med Bsim-beregningen er at se på indeklimaforholdene over en dag, der er nogenlunde sammenlignelig med dagene, hvor der er foretaget målinger, og derefter se på hvordan indeklimaet forholder sig over et år. Indeklimaforholdene over et år præsenteres i resultatafsnittet som varmebalance, og opsummering af timer, med hvor meget, den gennemsnitlige operative temperatur og CO₂-koncentration evt. vil overskride de gældende grænseværdier.

Det er ikke målet at der af beregningen, skal opnås et resultat der rammer virkeligheden præcist men, at resultatet, der vil være forbundet med nogen usikkerhed, vil være kvalificeret nok til således, at der ved beregning af forskellige tiltag, kan ses hvilke parametre der har indflydelse på indeklimaet.

Med oprettelse og analysering af Bsim-model sigtes der efter først, at opnå en tilnærmelsesvis teoretisk udgave af det aktuelle indeklima i 2.C's klasselokale. I første omgang medtages også 3.B og fællesrummet, med henblik på at modellen skal afspejle en gennemsnitlig brug af lokalerne over en dag.

Bsim-modellen, der fremgår af Figur 26, omfatter hele blok C eksklusiv kælder. Hensigten var at skabe en så tro model som muligt, med optimal termisk masse til beregning af dynamisk varmebalance. Bygningens kraftige limtræsbjælker og udhænget der indgår som fast solafskærmning er i den hensigt også modelleret.



Figur 26. Isometri af Bsim-modellen i blok C, der er anvendt til beregning af indeklimaet over en periode på 1 år. 2.C, 3.B og fællesrummet er hver sin termiske zone i beregningsmodellen, hvorfra der er udtrukket resultater. De øvrige lokaler er enten grupperede termiske zoner eller fiktive termiske zoner.

U-værdierne for bygningsdelene der indgår i Bsim-modellen er angivet, svarende til de nuværende konstruktioner iht. tegningsmaterialet, der er valideret med bygningsregistreringen på stedet. Varmeledningstallet for de indgående bygningsmaterialer er fremskaffet fra Bsim-databasen og er stemt overens med DS418 *Beregninger af bygningers Varmetab*, hvilket fremgår af bilag 3.

I modellen indgår der syv termiske zoner hvor 2.C, 3.B, fællesrummet og garderoberne der støder op til 2.C og 3.B, er hver deres egen termiske zone. De øvrige klasser mod øst er slået sammen til én termisk zone og det samme er gældende for klasserne mod vest.

De øvrige lokaler uden for de termiske zoner er oprettet som fiktive zoner.

Åbninger

Der er udover Windoors i facaderne, indtegnet fysiske indvendige åbninger. Imellem garderobe og fællesrummet er der indtegnet en permanent åbning, der svarer til jalousristen. I klasselokalet er der indtegnet det der svarer til en luftspalte under døren, mellem klasselokale og fællesrum. Dermed medregnes der luftudveksling imellem lokalerne ved anvendelse af Multizone model funktionen i Bsim.

Belastninger

Til forskel fra måleresultaterne, hvor temperaturerne fremgår som lufttemperaturer, er det den gennemsnitlige operative temperaturer der fremgår af Bsim-resultaterne, da det er denne der er interessant for mennesker, i forhold til oplevelsen af indeklimaet.

Analysen af måleresultaterne fremgår på baggrund af minutværdier, hvor det også kan ses i måleresultaterne, at indeklimaet i praksis, kan ændres markant fra minut til minut. Ved overførelse til Bsim skal de mange variationer der reelt er over en dag omsættes til timeværdier. Det skaber i stedet for de meget spidsformede diagrammer mere afrundede kurver.

Da det er vejrdataene DRY 2013 der er anvendt til indeklimasimuleringen, hvilket indeholder vejrdataværdier fra 2001 til 2010, anvendes år 2006 i beregningen. Der anvendes helt præcist onsdag d. 1. marts 2006, for at sammenligne med målingen d. 3. marts 2021.

I Figur 27 vises den tilpassede Bsim-model der her sammenlignes med målingen onsdag d. 3. marts 2021. I praksis ses det, at temperaturen i 2.C er lavere, end 3.B hvilket skyldes at der i 2.C, bliver foretaget flere udluftninger til det fri. 2.C stemmer nogenlunde overens, med brugernes oplysninger om at de foretager daglige udluftninger. Det er derfor også modellen, der passer med 2.C's målinger, der tages udgangspunkt i, for at simulere konsekvenser ved forskellige tiltag. Dvs. hvor målingerne viser forskellige temperaturer og CO₂-koncentrationer i 2.C og 3.B, så er Bsim-modellen tilpasset så begge klasselokaler har samme udluftningsforløb som i 2.C hen over dagen.

For at få modellen til at passe er der regnet med 19 personer i 2.C med en samlet varmeafgivelse, på 1,216 kW og en CO₂-forurening på samlet 206,72 l/h. Det svarer til henholdsvis 0,064 kW pr. person og 10,88 l/h pr. person.

I 3B er der regnet med 18 personer med en samlet varmeafgivelse på 1,242 kW og en CO₂-forurening på samlet 211,14 l/h. Det svarer til henholdsvis 0,069 kW pr. person og 11,73 l/h pr. person.

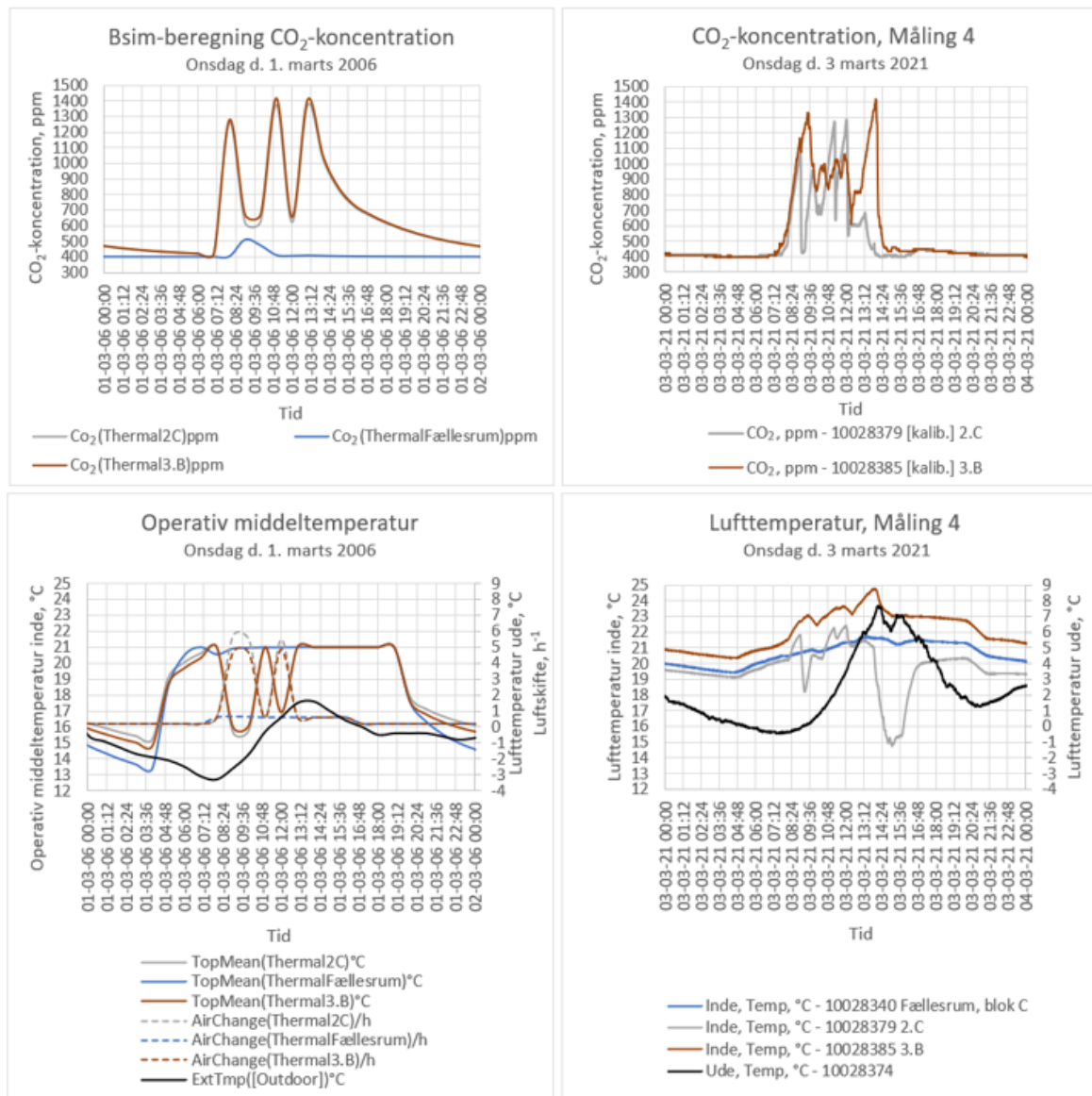
Belastningerne fra personerne er altså i Bsim-modellen en smule lavere end i forhold til Tabel 6 der blev anvendt til estimeringen af luftskiftet under trin 2.

Der er i begge klasselokaler medregnet at indvendige gardiner, er trukket for i hele perioden hvilket stemmer overens med tendensen på skolen.

Ved både den teoretiske og de målte værdier ligger CO₂-koncentrationen i nogenlunde i samme niveauer. Det kan også ses at den målte lufttemperatur i 2.C ligger på ca. 21 °C. I Bsim-modellen er der opnået en operativ middeltemperatur på ca. 21 °C og det kan ses, at der ved udluftning sker samme mønster i temperaturfaldet som ved de målte temperaturer, når der udluftes til det fri.

Af Figur 27 fremgår der for Bsim-modellen, også luftskifte for 2.C, 3.B og fællesrummet, der er fremkommet af den indstillede åbningsfrekvens i ventingsystemet.

Scenarierne beregnes med Bsim's Multizone model funktion (Wittchen et al., 2015).



Figur 27. Diagrammerne viser eksemplet på hvordan Bsim-beregningen tilnærmelsesvist, er tilpasset med målingerne. Det skal dog understreges at metoden er forbundet med stor usikkerhed, da udluftningsmønstre kan variere meget mellem årstider og mellem de enkelte klasselokaler. Der er taget udgangspunkt i udluftningsmønstret under den fjerde måleperiode i 2.C (grå kurver) og 3.B (brune kurver). Diagrammerne i venstre side er den tilpassede Bsim-beregning over en enkelt dag, og diagrammerne i højre side er de målte værdier. Med udgangspunkt i den tilpassede model for en enkelt dag, beregnes indeklimaet over et helt år fra 1. januar til 31. december. Anvendte vejrdata er DRY 2013.

Med udgangspunkt i den tilpassede Bsim-model Figur 27, beregnes konsekvensen af forskellige tiltag 2.C's klasselokale som:

- Fuld personbelastning dvs. 28 personer der omfatter 27 elever og 1 lærer.
- Uden indvendige gardiner som solafskærmning.
- Mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding.

Systemer

I den tilpassede Bsim-model, der ikke indeholder fuld personbelastning og som danner udgangspunktet, for de efterfølgende indeklimasimuleringer med forskellige tiltag, er systemerne i til Bsim-beregningen som følgende:

Fælles for alle scenarierne i 2.C's klasselokale er, at systemet Heating er sat til 6 kW i maksimal varmeeffekt, da lokalet har et Design Heat Loss på 5,4 kW. Opvarmningen er sat i drift fra uge 40 til uge 19 i opvarmningsperioden, der i døgnet kun er i drift fra kl. 05.00 til kl. 20.00

Peopleloadsystemet er i forhold til belastningen som beskrevet i ovenstående, men er på 100% fra kl. 08.00 til kl. 14.00 og er sat til 10 % fra kl. 14.00 til kl. 17.00 hvor der er SFO-tid. Der er ikke angivet personbelastning i weekender, helligdage og ferier.

Belysningen består af lysarmaturer med lysstofrør og belysningseffekten er indstillet til 0,54 kW samt med en belysningsstyrke på 200 lux. Lyset er reguleret efter at være tændt i brugstiden.

For elektrisk udstyr er der regnet med varmebelastning på 0,1 kW hvor af 50 % afgives til indeluften. Det elektriske udstyr er angivet til at være i 100 % drift i brugstiden mellem kl. 08.00 og 14.00. Og i 10 % drift mellem kl. 14.00 og 17.00.

I forhold til infiltration, er der i brugstiden regnet med Basic Air Change på $0,6 \text{ h}^{-1}$ der ud fra luftskifteestimeringerne, vurderes at være grundluftskiftet, og da det forventes at der er store variationer i luftskiftet i forhold til årstiden, så er værdien sat til høj (Wittchen et al., 2015).

Systemet Venting er indstillet til at være single sided og er styret af vinduesopluk i facaden. Her er udfordringen i forhold til de virkelige målinger at, udluftninger ikke kan sættes til under 1 time. Udluftningerne er tidsmæssigt styret i Bsim til, kun at foregå i brugstiden kl. 10.00 og kl. 12.00. Afrac-værdien er sat til 0,9 og vindue og dør er sat til at være 50 % åbne i det angivne tidsrum.

Til vinduerne er der også tilknyttet indvendig solafskærmning i form af gardiner "Curtain" der som der antages at være trukket for altid, og solafskærmningsfaktoren er derfor sat til 0,4.

I fællesrummet er samme systemer som for 2.C's klasse anvendt, dog er belastninger og det dimensionerende varmebehov tilpasset rummets størrelse. Der er dog ikke regnet på naturlig ventilation gennem de højtsiddende opluk, da der ikke har kunnet indhentes nærmere oplysninger om styringen. Det vurderes dog også mest at være i SFO-tiden. Og i nærværende projekt er det personbelastningen i undervisningsperioden der fokuseres på. Dog er der tilføjet mekanisk udsug i fællesrummet da dette vurderes at have betydning for luftskiftet i klasselokalerne.

I garderoben er der udover varmesystemet tilføjet et ventilationsystem, der kun indblæser luft gennem en varmeflade. Luftmængde ved indblæsningen er sat til det samme som ved udsugningen i fællesrummet.

For de øvrige scenarier er systemerne tilpasset nedenstående tiltag:

- Fuld personbelastning dvs. 28 personer der omfatter 27 elever og 1 lærer
 - Her er der kun ændret på personbelastningen.
- Uden solafskærmning
 - Her er gardinerne fratrasket samtidig med, at der regnes med fuld personbelastning.
- Mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding.
 - Her regnes der ikke med Venting og dermed ingen åbning af WinDoors.
 - Der er til lokalet tilknyttet mekanisk balanceret ventilation med 0,05 m³/s for indblæsning og udsugning.
 - Der er til ventilationssystemet indsat en styring således, at der maksimalt er 1000 ppm i klasselokalet.

4. Resultater

I dette afsnit præsenteres de mest væsentlige udtræk af resultater, fra indeklimamålingerne på stedet.

Der fremvises herefter resultater fra beregninger og analyser, hvoraf målingsdata er anvendt som grundlag.

4.1 Målinger (Trin 1)

Der er foretaget fire måleperioder, fra start februar til start marts. Ved første og anden måling blev der målt på vandret lagdeling, et centralt sted i 2.C's klasselokale med henholdsvis ca. halv og fuld personbelastning.

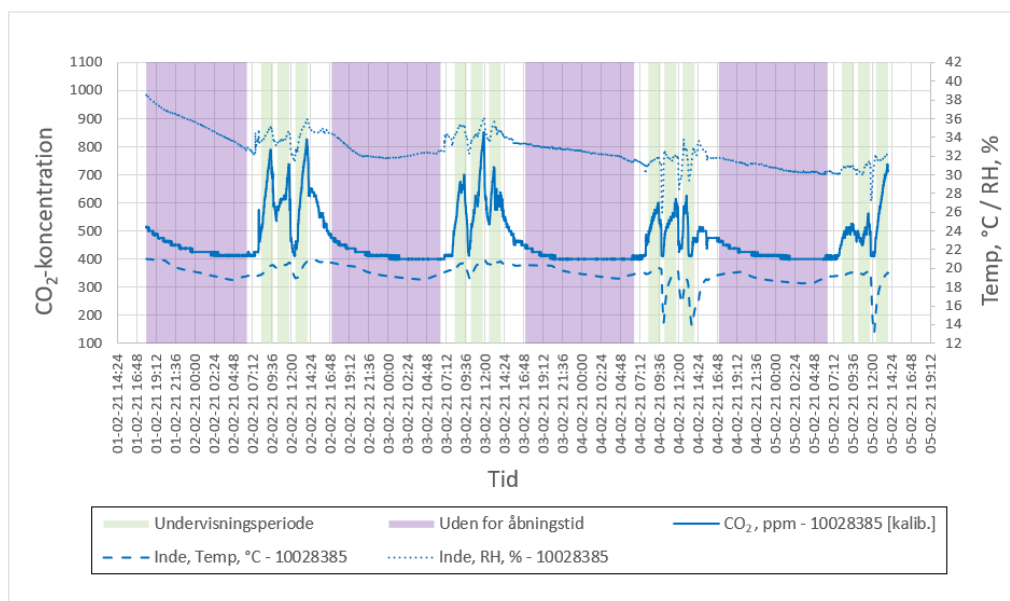
Tredje måling blev også foretaget i 2.C's klasselokale, men med fem forskellige placeringer i vandret plan som angivet på Figur 21.

Fjerde måling blev udført i fire forskellige klasselokaler, hvor af målingen i 2.C's klasselokale anvendes som reference.

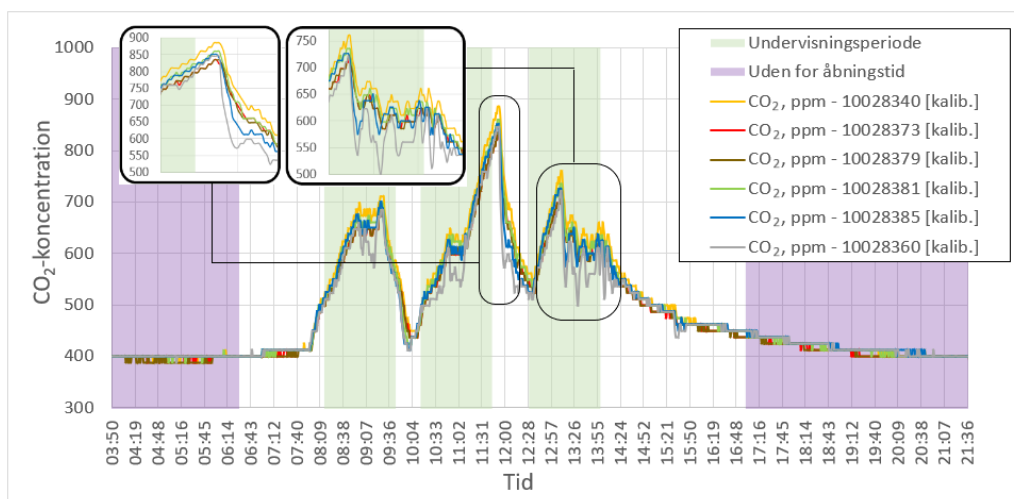
Ved alle målinger er der samtidigt målt på temperatur, og relativ luftfugtighed udendørs og i fællesrummet.

4.1.1 Måling 1

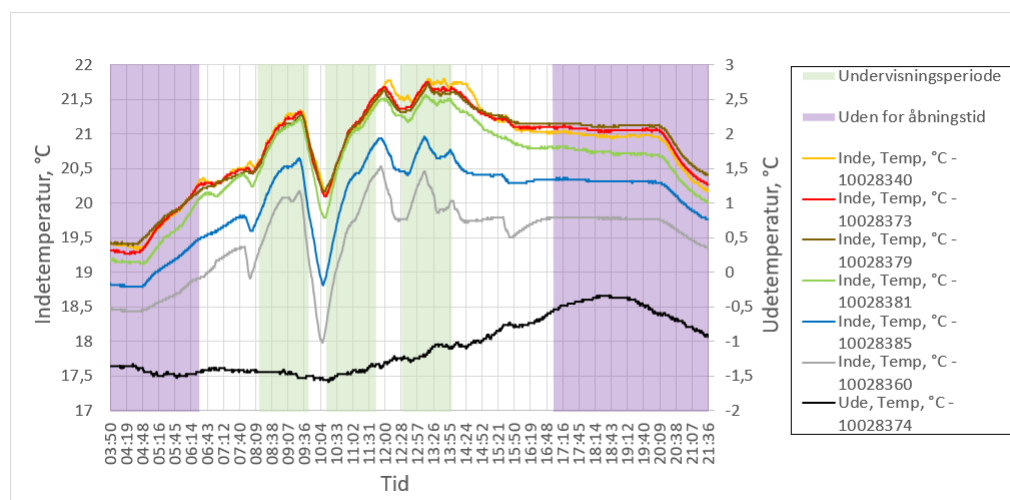
Første måling blev foretaget fra mandag d. 1. februar sidst på eftermiddagen til og med fredag d. 5. februar. Målingen bestod af en lodret måling, for hver halve meter over gulvet. Det blev oplyst af klasselæren, at der har været op til 10 elever hver dag, under måleperioden. Af hensyn til begrænsning af projektet, vises kun resultatudtræk fra måling 1 i Figur 28, Figur 29 og Figur 30. Målingen nærmere beskrevet i bilag 1.



Figur 28. Måling 1. Udtræk af måleresultater for CO₂-koncentration, lufttemperatur og relativ luftfugtighed for hele måleperioden. Der vises her kun resultater fra datalogger nr. 10028385, der er placeret 1 meter over gulv i 2.C. Der har under måleperioden været op til 10 elever i klassen. Ved 400 ppm i udeluft har CO₂-koncentrationen været oppe på maksimalt 850 ppm. Lufttemperaturen i brugstiden er mellem 19 og 22 °C. Den 4. og 5. februar falder temperaturen til mellem 12 og 15 °C samtidig med, at CO₂-koncentrationen er lavere end de foregående dage. Den relative luftfugtighed ligger på under 40 %.



Figur 29. Måling 1, med angivelse af CO₂-koncentration i 2.C i højden, d. 3. februar 2021. CO₂-målingerne er kalibreret ind efter, at alle målinger har en minimumskoncentration på 400 ppm svarende til CO₂-koncentrationen i udeluften. Målingerne er i signaturforklaringen angivet i den rækkefølge dataloggerne er opsat efter, dvs. nr. 10028360 er nederst og 10028340 er øverst. Det kan ses at når CO₂-koncentrationen aftager, er højest ved loftet og lavest ved gulvet. Den største forskel på op til 50 -100 ppm opstår, når kurverne har et vandret forløb og det er primært den nederste halv meter, der afviger mest med op til 50 ppm, i forhold til de øvre lag. Der kan dog være lidt usikkerheder imellem målerne.



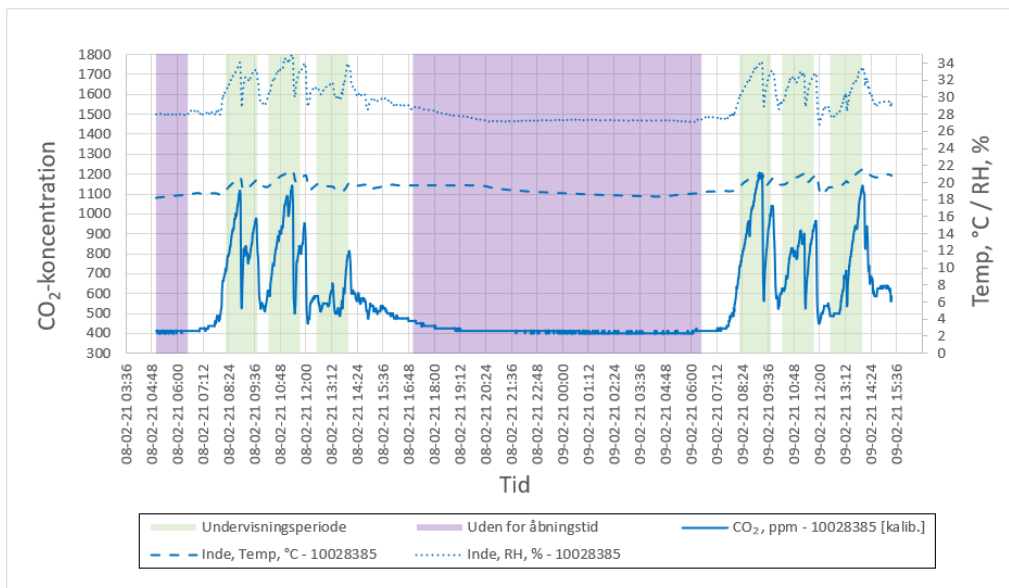
Figur 30. Måling 1, med angivelse af indvendige lufttemperaturer i 2.C i højden d. 3. februar 2021, samt udvendige lufttemperaturer. Der er variationer i temperaturlagdelingen på op til ca. 2 °C, hvor de største forskelle ligger i op til 1,5 meter over gulvet, som praktisk set er opholdszonen for 2. klasseelever, med en gennemsnitshøjde på ca. 1,3 m (Rigshospitalet & EDMaRC, 2021). 1 meter over gulvet er lufttemperaturen på mellem 20 og 21 °C, med undtagelse af et dyk på ned til under 19 °C omkring kl. 10.00. Udetemperaturen er permanent under frysepunktet ned til -1 °C.

4.1.2 Måling 2

Den anden måling blev foretaget fra mandag d. 8. februar tidlig morgen, til og med tirsdag eftermiddag d. 9. februar. Målingen var en fortsættelse af den første opstilling men med 24 elever til stede i klassen.

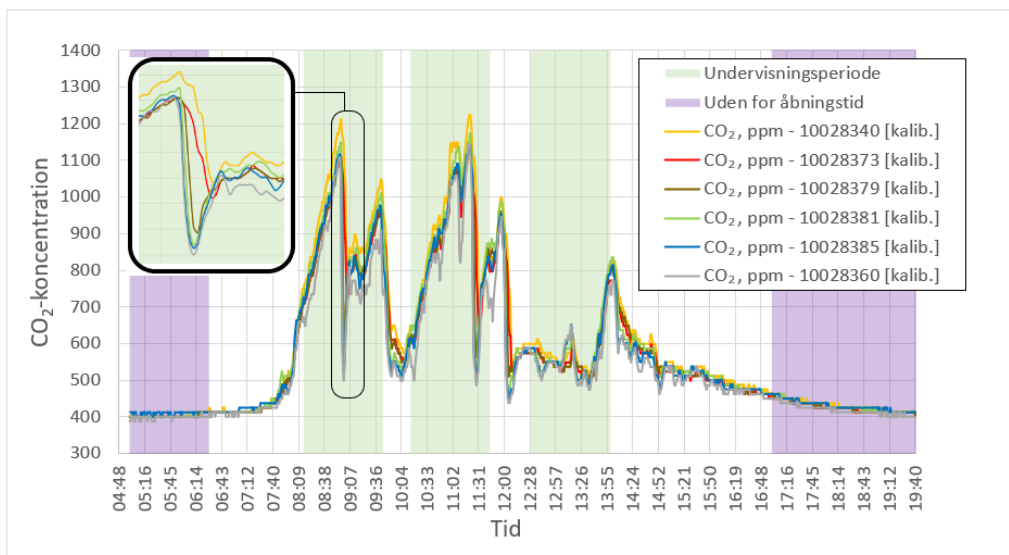
Af Figur 31 fremgår de kalibrerede måleresultater fra dataloggeren, placeret 1 meter over gulvet. Kurverne har samme svingende forløb forårsaget af jævnlig udluftning. CO₂-koncentrationen toppe ved ca. 1100 til 1200 ppm, inden udluftning til det fri resulterer i meget hurtige og kraftige reduceringer i koncentrationen. Indetemperaturen er mellem 20 og 21,5 °C i brugstiden og mellem 18 og 19 °C om natten.

Den relative luftfugtighed ligger i brugstiden på mellem 27 og 34 %.



Figur 31. Måling 2. Udtræk af måleresultater for CO₂-koncentration, lufttemperatur og relativ luftfugtighed for hele måleperioden. Der vises her kun resultater fra datalogger nr. 10028385 der er placeret 1 meter over gulv i 2.C. Der har under måleperioden været 24 elever i klassen. Ved 400 ppm i udeluften har CO₂-koncentrationen været oppe på maksimalt 1200 ppm. CO₂-koncentrationen har været meget svingende i brugstiden. Lufttemperaturen i brugstiden er mellem 20 og 22 °C. Den relative luftfugtighed ligger på under 35 %.

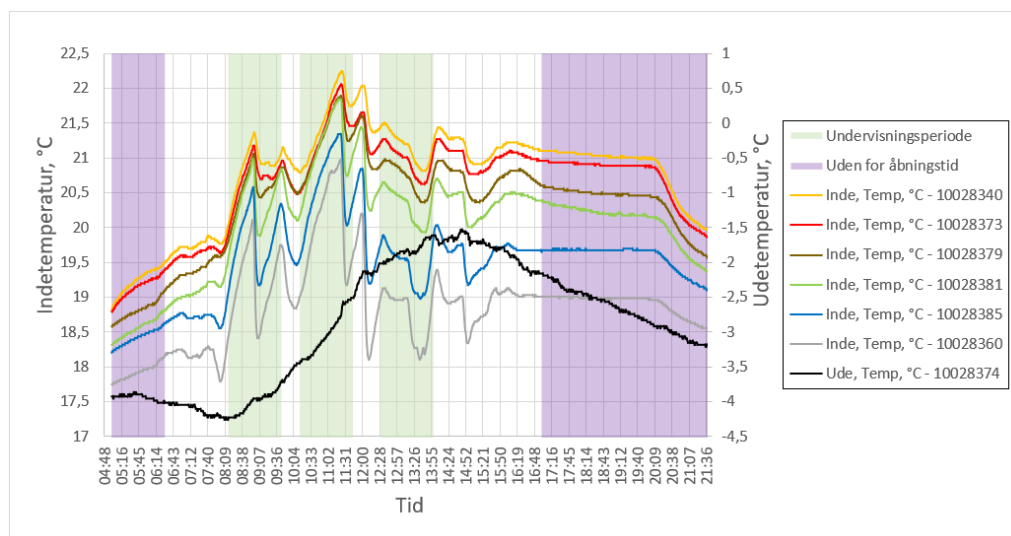
På Figur 32 fremgår måleresultaterne for CO₂-koncentrationen mandag d. 8. februar. Også her kan der antydes små variationer i højden, hvor den højeste koncentration ligger i toppen af lokalet. Der skal dog påregnes usikkerheder mellem målerne. Ved den kraftige udluftning der er forstørret på Figur 32, falder de fire nederste lag fra ca. 1100 til 500 ppm på 2 minutter. De to øverste lag aftager langsommere. Den nederste halve meter ligger generelt lidt lavere end de øvre lag.



Figur 32. Måling 2, med angivelse af CO₂-koncentration i 2.C i højden, d. 8. februar 2021. CO₂-målingerne er kalibreret ind efter at alle målinger har en minimumskoncentration på 400 ppm, svarende til CO₂-koncentrationen i udeluften. Målingerne er i signaturforklaringen angivet i den rækkefølge dataloggerne er opsat efter dvs. nr. 10028360 er nederst og 10028340 er øverst. Det kan ses at som ved måling 1, er CO₂-koncentrationen i nogen situationer, højest ved loftet og lavest ved gulvet. Ved den kraftige udluftning falder koncentrationen i de fire nederste lag på 2 minutter. I de to øverste lag aftager koncentrationen langsommere. Der er tendens til, at der er lavere CO₂-koncentration 0,5 m over gulvet, i forhold til de øvre lag. Der ses også forskel på op til 100 ppm når der opstår ændringer i kurvernes forløb.

Ligesom ved første måling, vises der også ved anden måling på Figur 33 større variationer i temperaturlagdelingen i højden på ca. 2 °C forskel. De største variationer sker i de nederste lag hvor f.eks. logger nr. 10028385 der er placeret 1 meter over gulv kl 13.26 viser 19 °C hvor samtidig logger nr. 10028381 der er placeret 1,5 meter over gulv, viser 20 °C.

Ude temperaturen viser dagsfrost. Inde temperaturen stiger fra mellem 18 – 19 °C tidlig morgen op til mellem 20,5 – 22 °C kl. 12.00. Herefter falder temperaturen igen. Ca. kl. 20.00 aftager effekten på varmeanlægget og indetemperaturen falder frem til de tidlige morgentimer.



Figur 33. Måling 2, med angivelse af indvendige lufttemperaturer i 2.C i højden d. 8. februar 2021, samt udvendige lufttemperaturer. Der er variationer i temperaturlagdelingen på op til ca. 2 °C, hvor de største forskelle ligger i op til 1,5 meter over gulvet. 1 meter over gulvet er lufttemperaturen på mellem 19,0 og 21,5 °C. Udetemperaturen er permanent under frysepunktet ned til -4,2 °C.

4.1.3 Måling 3

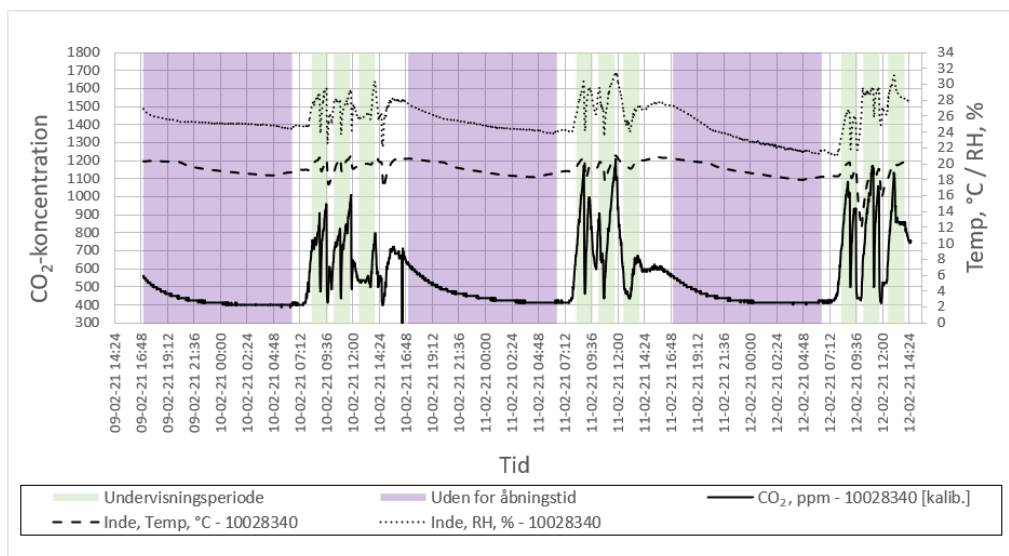
Tredje måling blev foretaget fra tirsdag eftermiddag d. 9. februar 2021, og frem til fredag eftermiddag d. 12. februar kl. 14.24. Opstillingen af måleudstyret blev opsat fem forskellige steder i 2.C's klasselokale, ca. 1 meter over gulvet som vist på Figur 21.

Af Figur 34 fremgår målinger fra datalogger nr. 10028340 og der har været 26 elever til stede i klassen under målingen. Det kan ses på den kalibrerede CO₂-måling, at CO₂-koncentrationen har været oppe på maksimalt 1200 ppm i korte perioder, hvor efter der har været foretaget udluftning direkte til det fri. CO₂-koncentrationen svinger meget hen over dagen, og har flere kraftige fald på kort tid. Det samme er forløbet for indetemperatur og den indendørs relative luftfugtighed.

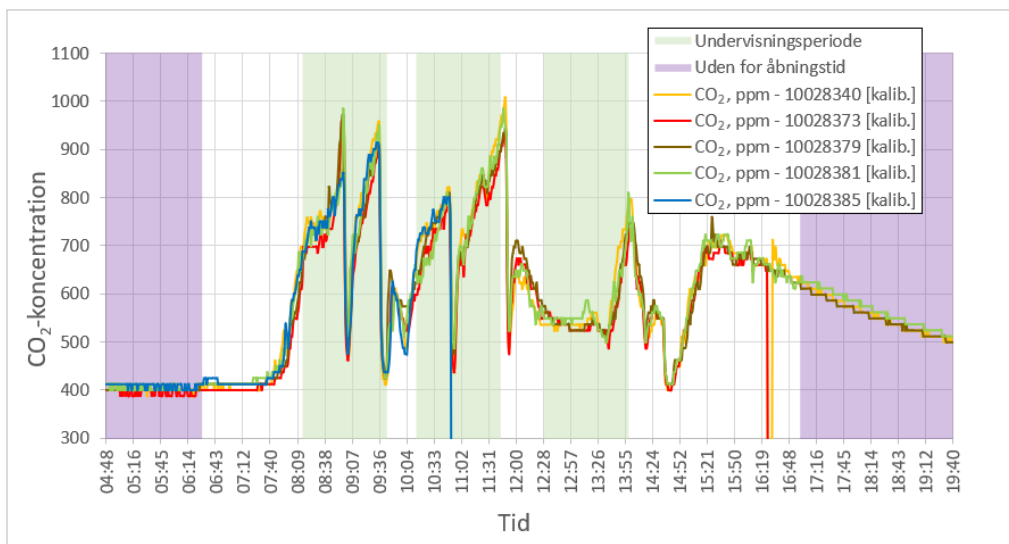
Strømforsyningen til CO₂-måleren der var koblet på datalogger nr. 10028385 blev utilsigtet afbrudt allerede d. 10. februar ca. kl. 10.50. Det samme skete for datalogger nr. 10028373 samme dag kl. ca. 16.30. På samme tidspunkt blev datalogger nr. 10028340 kort afbrudt og tilsluttet igen. Figur 35 viser at CO₂-koncentrationens forløb d. 10. februar, er stort set ens for alle dataloggerne. Målingerne på figuren er kalibreret med minimumskoncentration på 400 ppm. Der er også stor samtidighed i de kraftige fald i koncentrationen, der er forårsaget af udluftning til det fri. F.eks. var datalogger nr. 10028379 placeret 30 cm fra yderdøren, der blev anvendt til jævnlig udluftning. Fald i

koncentrationen ved denne måler, viser sig at ske lige hurtigt, som ved dataloggerne nr. 10028385 og 10028340 der er placeret længst væk fra yderdøren.

Fra kl. 8.00 stiger CO₂-koncentrationen hurtigt frem til kl. 8.20 herefter, stopper forøgelsen og bliver liggende på 700 til 750 ppm frem til ca. kl. 8.40 herefter stiger CO₂-koncentrationen igen, til ca. 990 ppm frem til kl. 9.00. Fra kl. 9.00 falder koncentrationen over ca. 5 minutter til ca. 460 ppm hvorefter, koncentration stiger i løbet af en halv time til ca. 940 ppm hvorefter der udluftes igen.

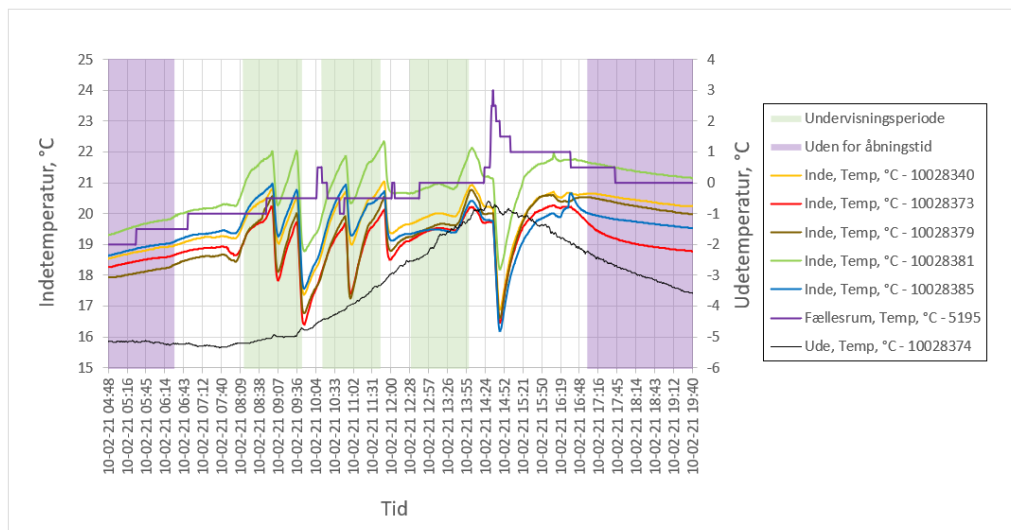


Figur 34. Måling 3. Udtræk af måleresultater for CO₂-koncentration, lufttemperatur og relativ luftfugtighed for hele måleperioden i 2.C. Der vises her kun resultater fra datalogger nr. 10028340 der er placeret 1 meter over gulv. Der har under måleperioden været 26 elever i klassen. Ved 400 ppm i udeluften, har CO₂-koncentrationen været oppe på maksimalt 1200 ppm. CO₂-koncentrationen har været meget svingende i brugstiden. Lufttemperaturen i brugstiden er mellem 18 og 21 °C. Den relative luftfugtighed ligger på under 32 %.



Figur 35. Måling 3, med angivelse af CO₂-koncentration i 2.C, fordelt i vandret plan, d. 10. februar 2021. CO₂-målingerne er kalibreret ind efter at alle målinger har et minimums niveau på 400 ppm svarende til CO₂-koncentrationen i udeluften. CO₂-målerne der er forbundet til datalogger 10028373 og 10028385 mistede strømforsyningen undervejs i målingen. Alle målerne er placeret ca. 1 m over gulv. Der er meget små variationer koncentrationen mellem de enkelte målere. Ved kraftigt fald i CO₂-koncentrationen som ved udluftninger, falder koncentrationen ensartet og med samme hastighed i hele lokalets bredde.

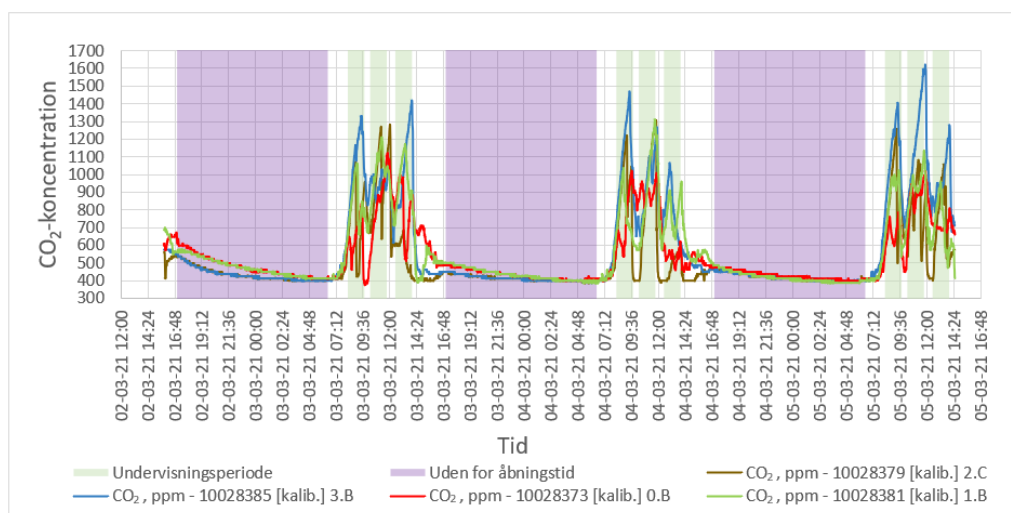
Udluftningerne d. 10. februar kan også ses på Figur 36, hvor der opstår hurtige variationer i indetemperaturen, på samme tidspunkt som der sker fald i CO₂-koncentrationen. Indetemperaturen falder hurtigt ved udluftninger med ca. 2 °C. Til forskel fra CO₂-koncentrationen, er der her permanent forskel i temperaturerne, i forhold til dataloggerne placeringer. Også her er dataloggerne placeret i spredt i vandret plan 1 meter over gulv iht. Figur 21. Datalogger nr. 10028379 er placeret tættest på yderdøren. I Figur 36 fremvises også målinger fra datalogger nr. 5195, der er placeret centralt i fællesrummet i ca. 2,2 meter over gulv. Udetemperaturen viser d. 10. februar dagsfrost på mellem -5,2 °C og -0,8 °C.



Figur 36. Måling 3, med angivelse af indvendige lufttemperaturer i 2.C fordelt i vandret plan, midt i fællesrummet samt udvendige lufttemperaturer. Der er variationer i målepunkterne for lufttemperatur på op til ca. 3 °C i 2.C. Over dagen svinger temperaturen mellem 16,5 og ca 22 °C. I fællesrummet er temperaturen mere stabil indtil kl. 14.30 hvor temperaturen kortvarigt kommer op på 24 °C. Udetemperaturen er permanent under frysepunktet ned til under -5 °C.

4.1.4 Måling 4

Den fjerde måling blev foretaget mellem d. 2. marts om eftermiddagen og frem til og med eftermiddagen d. fredag d. 5. marts. Der blev opsat en målestation i fire klasselokaler og to fællesrum samt to udendørs målere.



Figur 37. Måling 4. Udtræk af måleresultater for CO₂-koncentration i 0.B og 1.B i blok A og 2.C og 3.B i blok C, for hele måleperioden. Alle målinger er kalibreret ind efter at have 400 ppm i udeluften. I alle klasserne ses variationer hen over skoledagen. I 3.B kommer CO₂-koncentrationen op på ca. 1600 ppm. Efter brugstiden falder CO₂-koncentrationen frem til de tidlige morgentimer, til 400 ppm. Der ses også variationer imellem de enkelte klasselokaler.

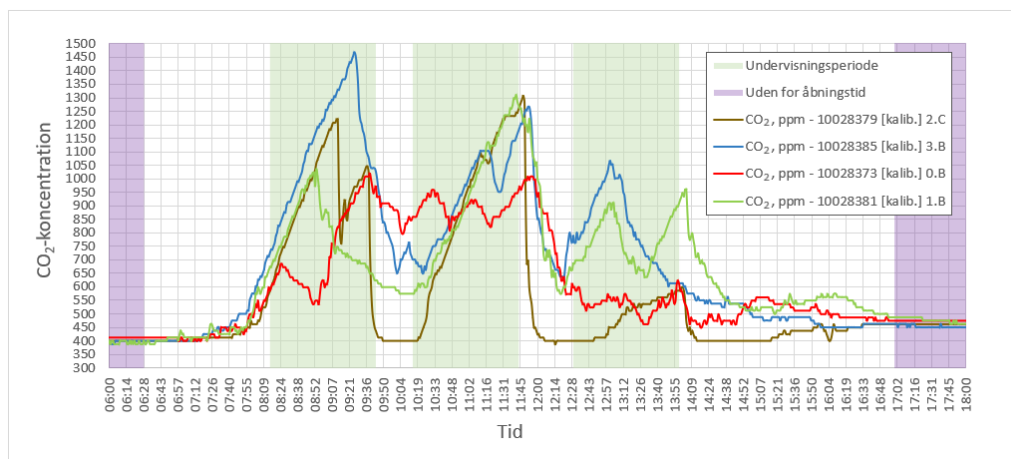
Af Figur 37 kan den målte CO₂-koncentration aflæses fra hele måleperioden. Og i brugstiden, kan der ses store variationer i koncentrationen, hvor efter den aftages mere ensartet, fra eftermiddagstimerne og frem til tidlig morgen. Det er datalogger nr. 10028385 der er placeret i 3.B i blok C, der skiller sig mest ud ved at have den højeste CO₂-koncentration på op til 1600 ppm.

Det lykkedes ikke at fremskaffe elevantal under måleperioden. Det er blevet oplyst af brugerne, at der til dagligt er 27 elever i 3.B i blok C og 26 elever i 0.B i blok A.

I Figur 38 fremgår forløbet af den kalibrerede CO₂-koncentration, hen over en skoledag, torsdag d. 4. marts. Og der kan her ses et meget forskelligt forløb. Koncentrationen stiger langsomt i alle klasselokalerne, lidt før kl. 08.00 hvor eleverne møder ind. Fra ca. kl. 08.15 stiger koncentrationen hurtigt, men ens, i alle lokalerne. I 0.B i blok A (den røde kurve) afbrydes forøgelsen, ved ca. 700 ppm allerede kl. 08.25 og aftager lidt. I 1.B blok A afbrydes forøgelsen (grøn kurve) ca. kl. 08.50 ved ca. 1025 ppm. I 2.C i blok C stopper forøgelsen (brun kurve) af CO₂-koncentrationen ved 1200 ppm ca. kl. 09.10 og til sidst stopper forøgelsen i 3.B (blå kurve) ved 1450 ppm ca. kl. 09.25 og aftager herefter kraftigt.

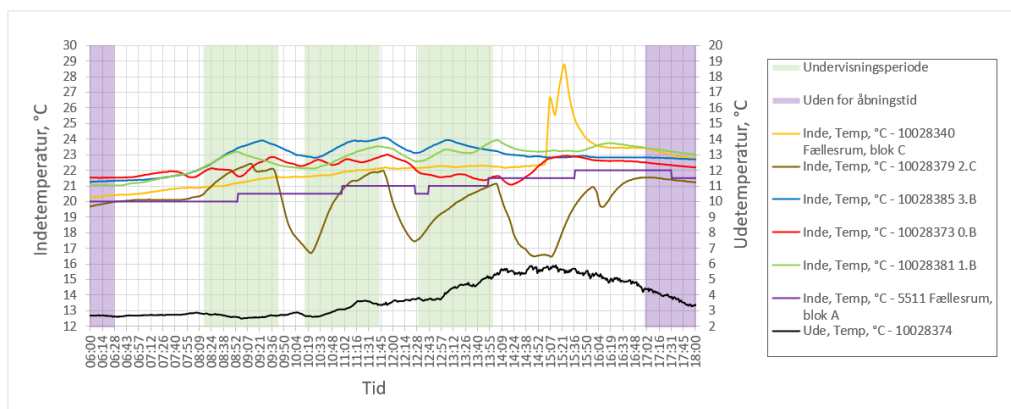
I 2.C (brun kurve) er der flere afbrydelser med kraftige reduktioner i koncentrationen, også imellem firkvarterende. I frikvarteret mellem kl. 09.45 og 10.15 er CO₂-koncentrationen helt nede på niveau med udeluften, hvilket også sker i det store spise-frikvarter mellem kl. 11.45 og 12.30. Den maksimale CO₂-koncentration i 2.C er på 1300 ppm.

0.B (rød kurve) skiller sig ud fra de andre klasselokaler, ved at have mindre udsving i koncentrationen. Kurven har tendens til at lægge sig i plateauer, modsat de øvrige lokaler hvor koncentrationen enten er stigende eller faldende. CO₂-koncentrationen i 0.B kommer ikke meget over 1000 ppm hen over dagen.



Figur 38. Måling 4. Udtræk af måleresultater for CO₂-koncentration i 0.B og 1.B i blok A og 2.C og 3.B i blok C, torsdag d. 4. marts 2021. Her ses at forløbet i CO₂-koncentrationen imellem de enkelte klasselokaler er forskellig. 3.B når den højeste koncentration på ca. 1450 ppm og har et mere stille aftagende forløb i forhold til 2.C hvor reduktionen, skaber en stort set lodret kurve. I 2.C er der perioder i brugstiden hvor, koncentrationen er på niveau med udekonzentrationen ved 400 ppm.

Hvis man sammenholder CO₂-koncentrationen i Figur 38, med indetemperaturen i Figur 39, kan det ses at der er kraftige udsving i indetemperaturen, helt op til 5 °C forskel, i 2.C (brun kurve) på samme tidspunkt, hvor at CO₂-koncentrationen falder til 400 ppm.



Figur 39. Måling 4. Udtræk af måleresultater for indvendige lufttemperaturer i 0.B og 1.B i blok A og 2.C og 3.B i blok C, samt fællesrum i begge blokke samt udetemperatur, torsdag d. 4. marts 2021. I 0.B, 1.B og 3.B er temperaturerne nogenlunde stabil på mellem 21 og 24 °C og variere individuelt med ca. 1 °C hen over dagen. I 2.C svinger temperaturen meget fra ca. 16,5 til 22,5 °C og har tendens til at ligge lavere, end de andre klasselokaler. I fællesrummene er temperaturerne nogenlunde stabile på mellem 20 og 22 °C. I blok C kommer temperaturen kortvarigt op på 29 °C, hvilket formodes at skyldes solpåvirkning. Udetemperaturen er på mellem 2,5 og 6 °C.

4.2 Vurdering af luftskifte (Trin 2)

På baggrund af CO₂-målingerne i 0.B og 1.B i blok A og 2.C og 3.B i blok C, torsdag d. 4. marts, vurderes herunder luftskiftets variationer, hen over 18 timer ud fra beregninger.

Resultatet fra beregningerne præsenteres i kurvediagrammer. I beregningen er der forsøgt at nå frem til hvad, der er grundluftskifte og hvad der er luftskifte ved aktive tiltag som åbning af vinduer eller aktivering af mekanisk udsugning.

Den estimerede CO₂-koncentration fremgår på diagrammerne vist med gul fed streg bag den målte koncentration vist med mørk blå. Koncentrationen er beregnet på baggrund af vurderet luftskifte (lys blå) og estimeret personantal (mørk grøn).

Da CO₂-koncentrationen i 2.C torsdag d. 4. marts afviger meget fra de øvrige måledage, er der sidst i afsnittet også estimeret et luftskifte for mandag d. 8. februar.

4.2.1 Luftskifte torsdag d. 4. marts i 2.C blok C

Af Figur 40 kan det ses at luftskiftet, i 2.C i blok C uden for brugstid, er estimeret til at være på mellem 0,22 og 0,27 h⁻¹. Omkring kl. 07.00 øges det estimerede luftskifte til ca. 0,56 h⁻¹.

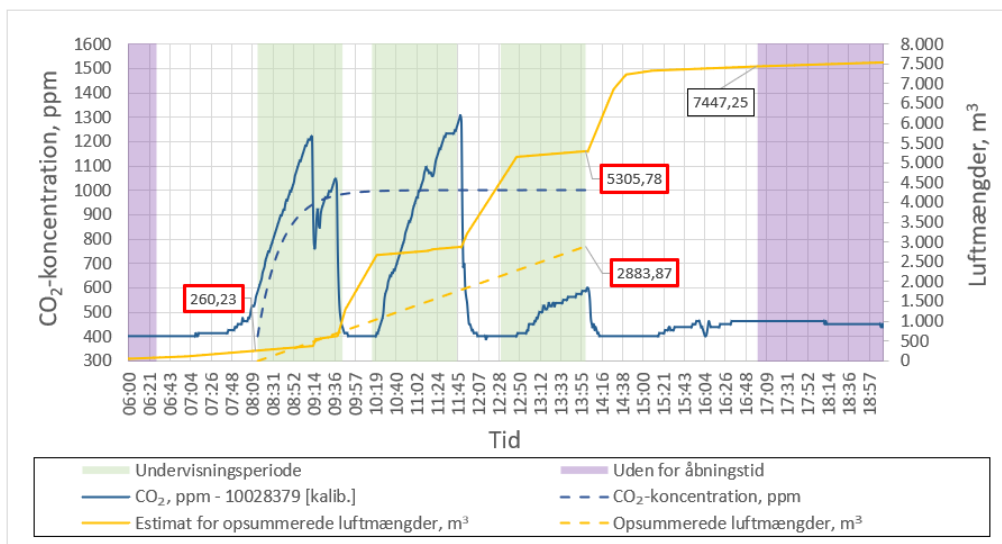
Ca. kl. 09.10 sker der på få minutter, en meget kraftig reduktion, i den målte CO₂-koncentration, dette betyder, for at få den estimerede kurve til at følge med, at der skal være et luftskifte på ca. 16 h⁻¹ hvor CO₂-koncentrationen falder fra ca. 1220 ppm til ca. 770 ppm. Samtidig falder indetemperaturen fra ca. 22,5 °C til ca. 22,0 °C ved målerens placering.

Ca. kl. 09.45 falder den indvendige lufttemperatur der konstant, 22 °C til ca. 17 °C. CO₂-koncentrationen falder i løbet af 3-5 minutter fra 1050 ppm til under 450 ppm og resten af frikvarteret, ligger koncentrationen på samme niveau som udeluftens. I de første 5 minutter af frikvarteret, estimeres et luftskifte på ca. 23,24 h⁻¹ hvor der i resten af pausen estimeres et luftskifte på ca. 11,74 h⁻¹.

I undervisningsmodulerne mellem kl. 10.15 og 11.45 stiger CO₂-koncentrationen til 1300 ppm og der estimeres et luftskifte på ca. 0,56 h⁻¹. I det store spise-frikvarter mellem kl. 11.45 og 12.30 udluftes der kraftigt igen og indvendig lufttemperatur falder fra ca. 22

$$(5045,55 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ timer} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{243,7 \text{ l/s}}$$
$$(243,7 \text{ l/s} \cdot 3600 \text{ sek}) / 203.754 \text{ l} = \underline{4,3 \text{ h}^{-1}}$$
$$(243,7 \text{ l/s} - 9,2 \text{ l/s}) / 28 \text{ personer} = \underline{8,4 \text{ l/s pr. person}}$$
$$7447,25 \text{ m}^3 - 260,23 \text{ m}^3 = \underline{7187,02 \text{ m}^3 \text{ udeluft}}$$

I scenariet antages der at være 27 elever samt 1 lærer i klassen i hele perioden fra kl. 08.15 til kl. 14.00, hvilket er det maksimale antal elever der holdes i disse klasselokaler. Resultatet fra beregningen, vist med mørkeblå stiplede linje, viser at der skal være et konstant luftskifte på $2,36 \text{ h}^{-1}$ for at holde CO_2 -koncentrationen på 1000 ppm. Den gule stiplede linje viser tilsvarende opsummeret luftmængder der ventileres med i scenariet. Beregningen viser at der med mekanisk ventilation har været ventileret med 2882,87 m^3 udeluft.

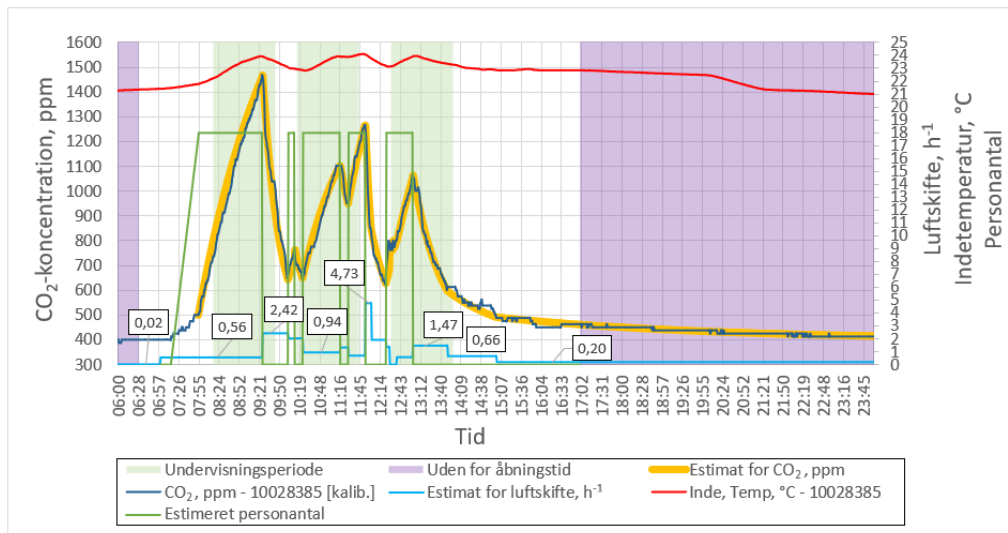
$$(2883,87 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = 139,32 \text{ l/s}$$


Side 49

4.2.2 Luftskifte torsdag d. 4. marts i 3.B blok C

Iht. Figur 42 estimeres luftskiftet i 3. B.

Frem til kl. 07.00 estimeres luftskiftet til at ligge mellem 0,02 og 0,20 h⁻¹. Frem til ca. kl. 09.25 estimeres et luftskifte på ca. 0,56 h⁻¹. Herefter falder CO₂-koncentrationen. Såfremt der ingen personer er til stede i lokalet, skal der et luftskifte på 2,42 h⁻¹ til for at matche den målte CO₂-kurve. Den indvendige lufttemperatur (rød kurve) falder kun ca. 1 °C, fra ca. 24 °C til 23 °C, i forhold til 2.C hvor temperaturen faldt med ca. 5°C.



Figur 42. Estimering af luftskiftets variationer i 3.B på baggrund af måling 4, torsdag d. 4. marts 2021. Ud fra personantallet (den grønne kurve) beregnes den tilnærmelsesvis CO₂-koncentration (den gule kurve) så den følger den målte CO₂-koncentration (mørk blå kurve), hvilket resulterer i et estimeret luftskifte (lys blå kurve). Der er på diagrammet tilføjet etiketter for at tydeliggøre de enkelte luftskifter (h⁻¹). Uden for brugstiden er luftskiftet ca. 0,20 h⁻¹. Grundluftskiftet i brugstiden ligger på ca. 0,56 h⁻¹. Luftskiftet kommer kortvarigt op på ca. 4,73 h⁻¹. CO₂-koncentrationen er kombineret med den målte indetemperatur.

Ved at antage at personbelastningen på 17 elever samt 1 lærer, passer den estimerede kurve med den målte frem til ca. kl. 13.00, hvilket resulterer i varierende luftskifter på mellem 0,94 h⁻¹ og 4,73 h⁻¹. Fra ca. kl. 15.00 og frem til fredag morgen d. 5. marts, matcher den estimerede kurve såfremt luftskiftet er på ca. 0,2 h⁻¹.

I Figur 43 estimeres opsummerede luftmængder (den gule kurve) der beregnes på grundlag af det estimerede luftskifte i Figur 42.

Fra kl. 08.15 til efter endt undervisning kl. 14.00 har været ventileret med:

$$1715,94 \text{ m}^3 - 153,30 \text{ m}^3 = \underline{1562,64 \text{ m}^3 \text{ udeluft.}}$$

Hvilket svarer til en gennemsnitlig luftstrøm på:

$$(1562,64 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{75,49 \text{ l/s}}$$

Det gennemsnitlige luftskifte har dermed været på:

$$(75,5 \text{ l/s} \cdot 3600 \text{ sek}) / 203.754 \text{ l} = \underline{1,33 \text{ h}^{-1}}$$

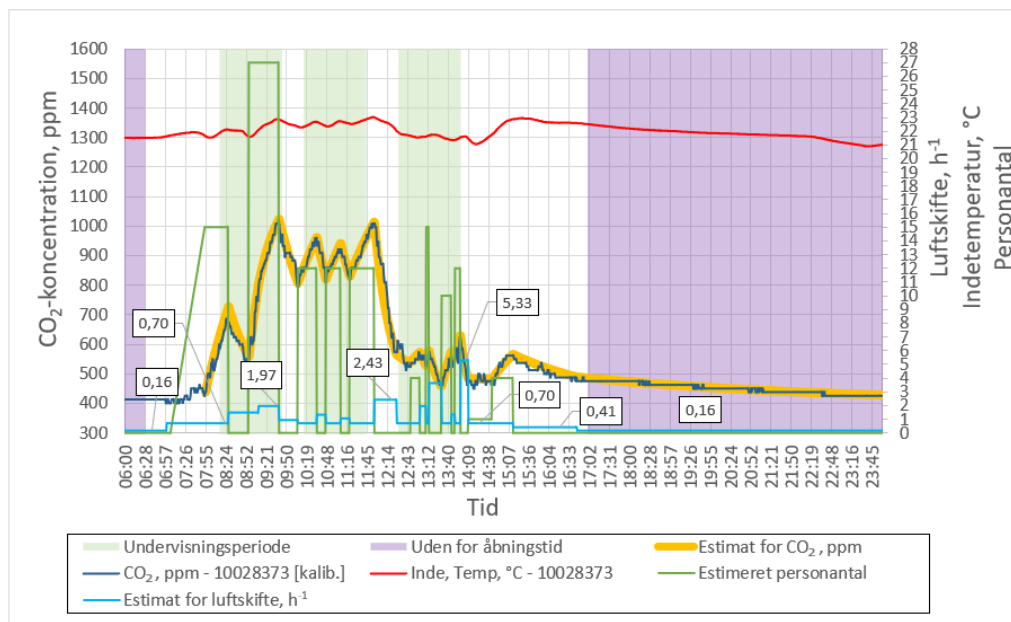
Luftmængderne pr. person ved 28 personer er dermed:

$$(75,5 \text{ l/s} - 9,2 \text{ l/s}) / 28 \text{ personer} = \underline{2,37 \text{ l/s pr. person}}$$

til mellem $0,7 \text{ h}^{-1}$ og ca. $2,00 \text{ h}^{-1}$, med evt. korte opsving op til $5,33 \text{ h}^{-1}$. Den indvendige lufttemperatur ligger jævnt på ca. $21,6^\circ \text{C}$.

Efter undervisningen fra kl. 14.00 er der SFO i blok A og C. Og her vurderes det ud fra et lille opsving i CO_2 -koncentrationen, fra kl. 14.45 fra 500 ppm til ca. 560 ppm, at der er personophold på op til 4 personer. Luftsiftet estimeres til at være på ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$ frem til ca. kl. 15.00.

Luftsiftet estimeres fra kl. 15.00 til at være ca. $0,41 \text{ h}^{-1}$ frem til skolens lukketid kl. 17.00. Herefter estimeres luftsiftet til at være på $0,16 \text{ h}^{-1}$ over natten og frem til næste dag.



Figur 44. Estimering af luftsiftets variationer i 0.B på baggrund af måling 4, torsdag d. 4. marts 2021. Ud fra personantallet (den grønne kurve) beregnes, den tilnærmelsesvis CO_2 -koncentration (den gule kurve) så den følger den målte CO_2 -koncentration (mørk blå kurve), hvilket resulterer i et estimeret luftsifte (lys blå kurve). Der er på diagrammet tilføjet etiketter for at tydeliggøre de enkelte luftsifter (h^{-1}). Uden for brugstiden er luftsiftet ca. $0,16 \text{ h}^{-1}$. Grundluftsiftet i brugstiden ligger på ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$. Luftsiftet kommer kortvarigt op på ca. $5,33 \text{ h}^{-1}$. CO_2 -koncentrationen er kombineret med den målte indetemperatur.

Også i 0.B er der beregnet en opsummering af luftmængder ud fra estimeringen af luftsiftet som fremgår af Figur 45.

Fra kl. 08.15 til efter endt undervisning kl. 14.00 har været ventileret med:

$$1931,73 \text{ m}^3 - 250,66 \text{ m}^3 = \underline{1681,07 \text{ m}^3 \text{ udeluft.}}$$

Hvilket svarer til en gennemsnitlig luftstrøm på:

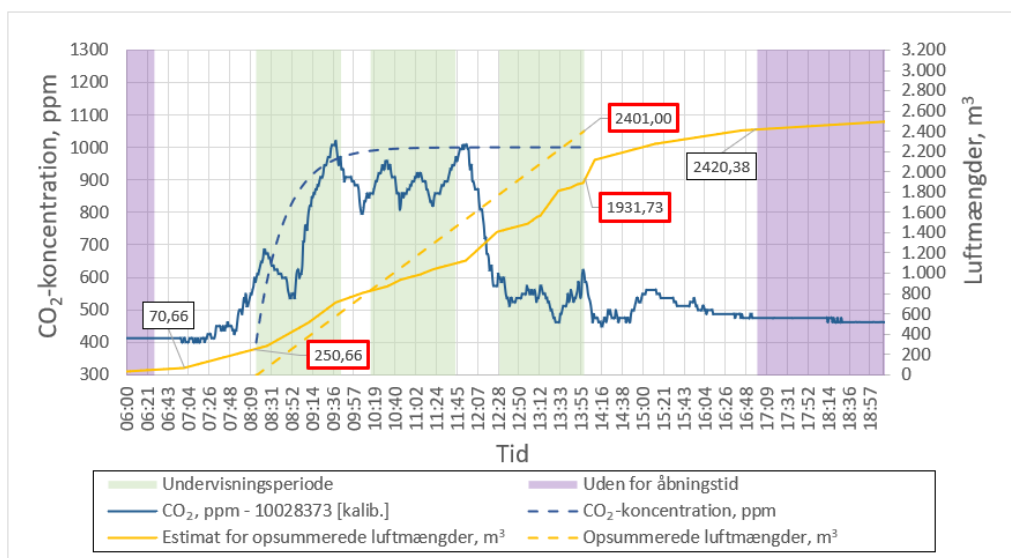
$$(1681,66 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ timer} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{81,21 \text{ l/s}}$$

Det gennemsnitlige luftsifte har dermed været på:

$$(81,2 \text{ l/s} \cdot 3600 \text{ sek}) / 203.754 \text{ l} = \underline{1,43 \text{ h}^{-1}}$$

Luftmængderne pr. person ved 28 personer er dermed:

$$(81,2 \text{ l/s} - 9,2 \text{ l/s}) / 28 \text{ personer} = \underline{2,57 \text{ l/s pr. person}}$$



Figur 45. Opsummering af luftmængder på baggrund estimeret luftskifte i 0.B samt eksempel på konstant luftskifte på $1,97 \text{ h}^{-1}$ hvis der var mekanisk balanceret ventilation, og 27 elever (6 år) samt 1 lærer, for at holde CO_2 -koncentrationen på maksimalt 1000 ppm. Ved den eksisterende løsning har der været ventileret med ca. $1681,07 \text{ m}^3$ udeluft i forhold til løsningen med mekanisk balanceret ventilation hvor der har været ventileret med $2401,00 \text{ m}^3$ i løbet af undervisningsperioderne.

Som for 2.B og 3B fremgår der også af Figur 45 et scenarie, med CO_2 -koncentrationen i forhold til mekanisk ventilation i 0.B. Også her er der regnet med fuld personbelastning på 27 elever samt 1 lærer.

Det kræver et luftskifte på $1,97 \text{ h}^{-1}$ for at holde en maksimal CO_2 -koncentration på 1000 ppm. Det svarer til et samlet antal luftmængder på $2401,00 \text{ m}^3$ fra kl. 08.15 til kl. 14.00 som vist med gul stiplede kurve.

Luftmængden svarer til en løftstrøm på:

$$(2401,00 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{\underline{115,99 \text{ l/s}}}$$

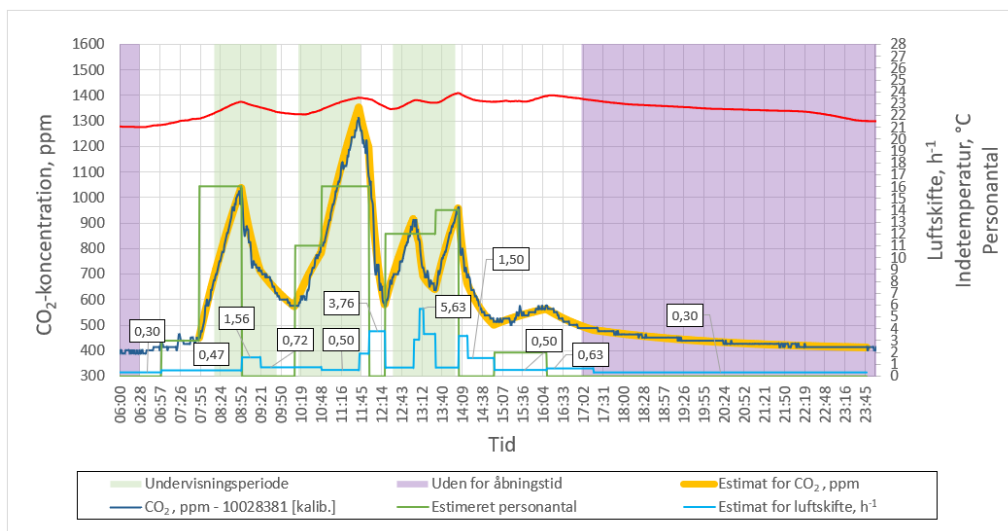
4.2.4 Luftskifte torsdag d. 4. marts i 1.B blok A

Af Figur 46 fremgår estimatet for luftskiftet i 1.B i blok A.

Fra tidlig morgen frem til kl. 07.00 er der estimeret et luftskifte på $0,3 \text{ h}^{-1}$.

Fra kl. 08.50 vurderes det, at der ikke er personer til stede før efter det første frikvarter kl. 10.45. Her falder CO_2 -koncentrationen fra ca. 1020 ppm, til lige under 600 ppm uden der er et markant fald i den indvendige lufttemperatur, der estimeres et luftskifte på ca. $0,72 \text{ h}^{-1}$ i dette tidsrum. I dagens midterste undervisningsmodul, fra kl. 10.15 til kl. 11.45 stiger den målte CO_2 -koncentration til ca. 1320 ppm. Ud fra den beregnede CO_2 -koncentration, vurderes der at være en lidt varierende personbelastning på 11 til 16 personer. Her estimeres et luftskifte på ca. $0,7 \text{ h}^{-1}$.

I det store spise-frikvarter, falder CO_2 -koncentrationen meget kraftigt fra ca. 1320 ppm til ca. 580 ppm på 45 minutter. Ved personbelastning på 0 personer svare det til et luftskifte på ca. 4 h^{-1} . I denne periode falder den indvendige lufttemperatur fra ca. $23,8^\circ\text{C}$ til $22,8^\circ\text{C}$.



Figur 46. Estimering af luftskiftets variationer i 1.B på baggrund af måling 4, torsdag d. 4. marts 2021. Ud fra personantallet (den grønne kurve) beregnes den tilnærmelsesvis CO₂-koncentration (den gule kurve) så den følger den målte CO₂-koncentration (mørk blå kurve), hvilket resulterer i et estimeret luftskifte (lys blå kurve). Der er på diagrammet tilføjet etiketter for at tydeliggøre de enkelte luftskifter (h⁻¹). Uden for brugstiden er luftskiftet ca. 0,3 h⁻¹. Grundluftskiftet i brugstiden ligger på ca. 0,7 h⁻¹. Luftskiftet kommer kortvarigt op på ca. 5,5 h⁻¹. CO₂-koncentrationen er kombineret med den målte indetemperatur.

I de sidste to moduler fra kl. 12.30 til kl. 14.00 er der et lavere niveau i CO₂-koncentrationen, der varierer mellem ca. 650 ppm og 980 ppm. Luftskiftet estimeres til at ligge primært på 0,7 h⁻¹ med enkelte opsving til ca. 6 h⁻¹. Den indvendige lufttemperatur ligger stabilt på mellem 22,5 °C og 23 °C. I eftermiddagstimerne mellem kl. 14.00 og 17.00 estimeres det, at luftskiftet reduceres fra ca. 3,5 h⁻¹ til ca. 1,5 h⁻¹ i løbet af en times tid. Herefter estimeres luftskiftet til at være på ca. 0,63 h⁻¹ frem til skolens lukketid kl. 17.00. I det efterfølgende tidsrum uden for lukketid, estimeres luftskiftet til at ligge på ca. 0,3 h⁻¹ frem næste morgen. Omkring kl. 00.00 d. 5. marts er CO₂-koncentrationen nede på samme niveau som i udeluften.

Den indvendige lufttemperatur har i hele døgnet ligget stabilt, fra lige over 21 °C til og ca. 24 °C.

Af Figur 47 fremgår, vist med gul kurve, en opsummering af luftmængder ud fra estimeringen af luftskiftet som fremgår af Figur 46.

Fra kl. 08.15 til efter endt undervisning kl. 14.00 har været ventileret med:

$$1781,64 \text{ m}^3 - 249,47 \text{ m}^3 = \underline{1532,17 \text{ m}^3 \text{ udeluft.}}$$

Hvilket svarer til en gennemsnitlig luftstrøm på:

$$(1781,64 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{86,07 \text{ l/s}}$$

Det gennemsnitlige luftskifte har dermed været på:

$$(86,07 \text{ l/s} \cdot 3600 \text{ sek}) / 203.754 \text{ l} = \underline{1,52 \text{ h}^{-1}}$$

Luftmængderne pr. person ved 28 personer er dermed:

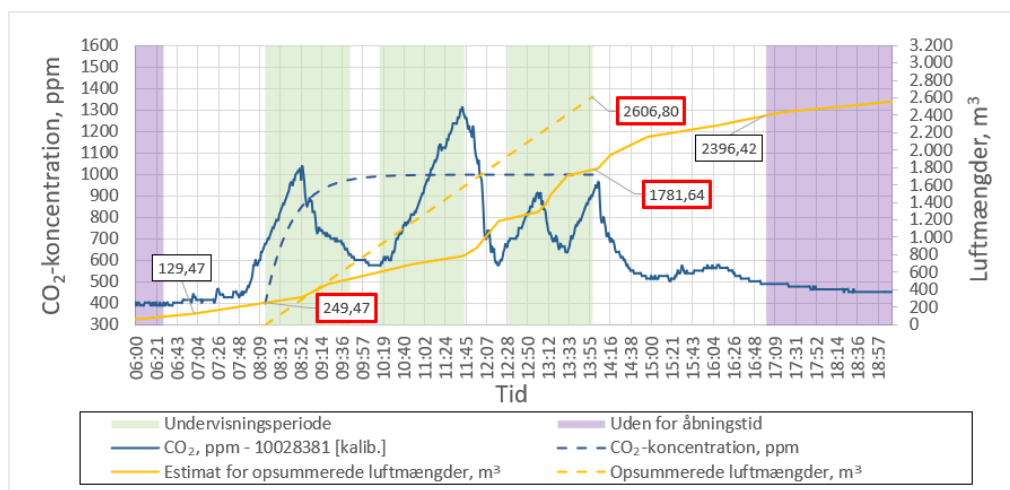
$$(86,07 \text{ l/s} - 9,2 \text{ l/s}) / 28 \text{ personer} = \underline{2,75 \text{ l/s pr. person}}$$

Af Figur 47 fremgår der et scenarie, med CO₂-koncentrationen i forhold til mekanisk ventilation i 1.B. Her er der regnet med fuld personbelastning på 27 elever samt 1 lærer.

Det kræver et luftskifte på 2,14 h⁻¹ for at holde en maksimal CO₂-koncentrationen på 1000 ppm. Det svarer til et samlet antal luftmængder på 2606,80 m³ fra kl. 08.15 til kl. 14.00 som vist med gul stiplede kurve.

Luftmængden svarer til en løftstrøm på:

$$(2606,80 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{125,9 \text{ l/s}}$$



Figur 47. Opsummering af luftmængder på baggrund estimeret luftskifte i 1.B samt eksempel på konstant luftskifte på 2,14 h⁻¹ hvis der var mekanisk balanceret ventilation, og 27 elever (7 år) samt 1 lærer, for at holde CO₂-koncentrationen på maksimalt 1000 ppm. Ved den eksisterende løsning har der været ventileret med ca. 1532,17 m³ udeluft i forhold, til løsningen med mekanisk balanceret ventilation, hvor der har været ventileret med 2606,8,00 m³ i løbet af undervisningsperioderne.

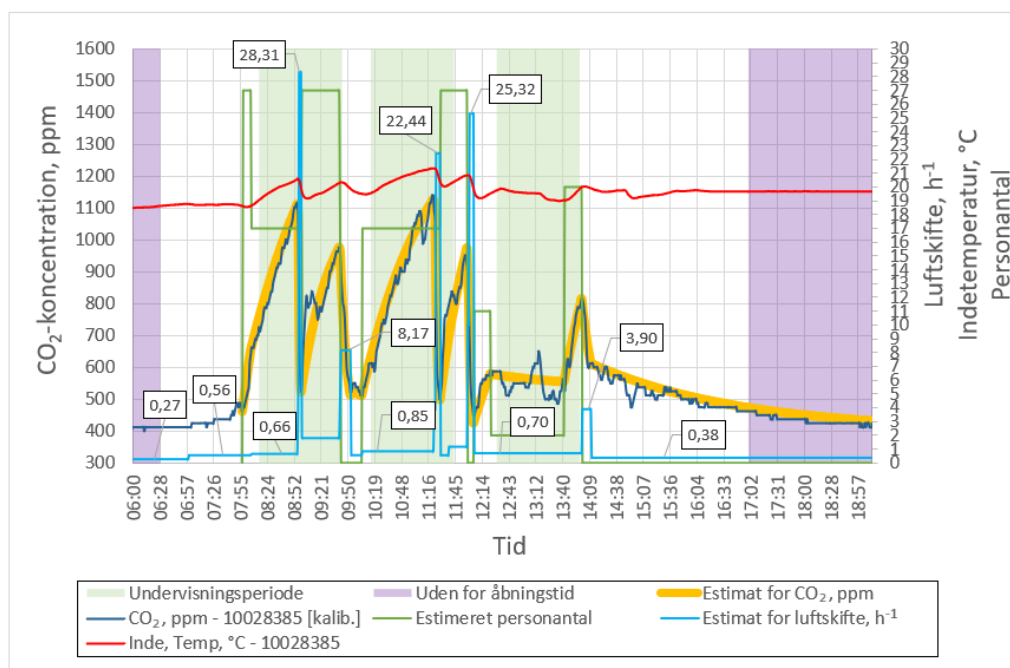
4.2.5 Luftskifte mandag d. 8. februar i 2.C blok C

Af Figur 48 fremgår det estimerede luftskifte på baggrund af den beregnede CO₂-koncentration. Luftskiftet, angivet med lys blå kurve, estimeres frem til kl. 07.00 at være ca. 0,27 h⁻¹. Hen over dagen ligger luftskiftet primært mellem 0,56 h⁻¹ og 0,85 h⁻¹, med nogle enkelte meget kraftige, men kortvarige, spring med op til ca. 28,3 h⁻¹.

Det kan samtidig ses at den indvendige lufttemperatur, ved de kraftige luftskifter falder med ca. 2 °C.

CO₂-koncentrationen topper ca. kl. 09.00 og kl. 11.30 ved ca. 1110 ppm. I de sidste undervisningsmoduler fra kl. 12.30 holders der tilnærmelsesvist, en CO₂-koncentration på ca. 550 ppm og stiger kortvarigt til 800 ppm kl. 14.00 og falder hurtigt igen til ca. 600 ppm. Herefter er CO₂-koncentrationen svagt aftagende frem til ca. kl. 20.00 hvor koncentrationen, er nede på niveau med udeluftens CO₂-koncentration. Luftskiftet estimeres her at være ca. 0,38 h⁻¹.

Den indvendige lufttemperatur varierer lidt hen over dagen, særligt samtidig med pludseligt højt luftskifte eller ændring i personantallet.



Figur 48. Estimering af luftskiftets variationer i 2.C på baggrund af måling 2, mandag d. 8. februar 2021. Ud fra personantallet (den grønne kurve) beregnes den tilnærmelsesvis CO₂-koncentration (den gule kurve) så den følger den målte CO₂-koncentration (mørk blå kurve), hvilket resulterer i et estimeret luftskiftet (lys blå kurve). Der er på diagrammet tilføjet etiketter for at tydeliggøre de enkelte luftskifter (h⁻¹). Uden for brugstiden er luftskiftet ca. 0,38 h⁻¹. Grundluftskiftet i brugstiden ligger på ca. 0,6 – 0,7 h⁻¹. Ved udluftninger kommer luftskiftet kortvarigt op på mellem ca. 22 og 28,3 h⁻¹. CO₂-koncentrationen er kombineret med den målte indetemperatur.

Af Figur 49 fremgår, vist med gul kurve, en opsummering af luftmængder ud fra estimeringen af luftskiftet der fremgår af Figur 48.

Fra kl. 08.15 til efter endt undervisning kl. 14.00 har været ventileret med:

$$2850,00 \text{ m}^3 - 206,73 \text{ m}^3 = \underline{2643,27 \text{ m}^3 \text{ udeluft.}}$$

Hvilket svare til en gennemsnitlig luftstrøm på:

$$(2643,27 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{127,69 \text{ l/s}}$$

Det gennemsnitlige luftskifte har dermed været på:

$$(127,69 \text{ l/s} \cdot 3600 \text{ sek}) / 203.754 \text{ l} = \underline{2,26 \text{ h}^{-1}}$$

Luftmængderne pr. person ved 28 personer er dermed:

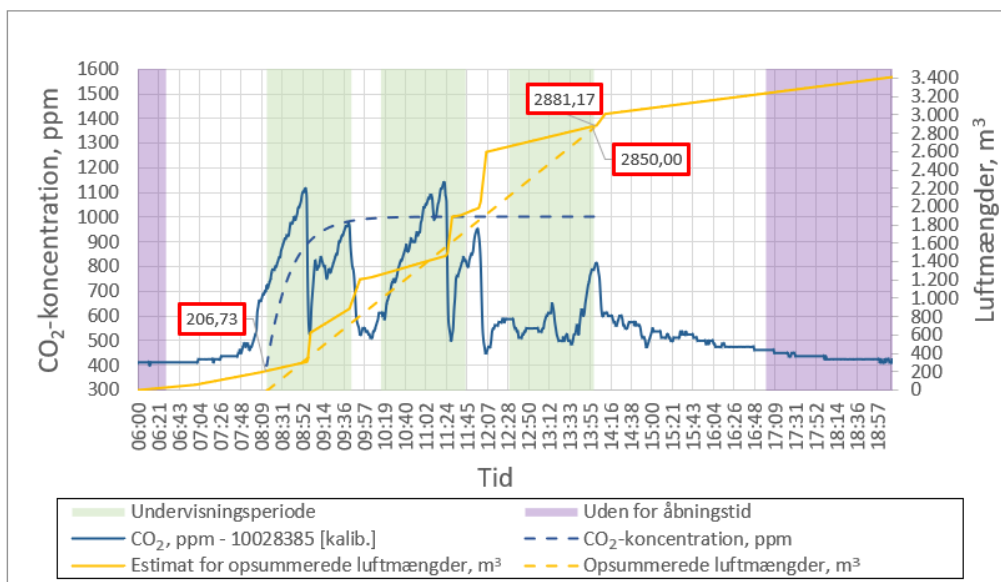
$$(127,69 \text{ l/s} - 9,2 \text{ l/s}) / 28 \text{ personer} = \underline{4,2 \text{ l/s pr. person}}$$

Af Figur 49 fremgår der et scenarie, med CO₂-koncentrationen i forhold til mekanisk ventilation i 2.C. Her er der regnet med fuld personbelastning på 27 elever samt 1 lærer.

Der kræves et luftskifte på 2,35 h⁻¹ for at holde en maksimal CO₂-koncentration på 1000 ppm. Det svarer til et samlet antal luftmængder på 2881,17 m³ fra kl. 08.15 til kl. 14.00 som vist med gul stiplede kurve.

Luftmængden svarer til en løftstrøm på:

$$(2881,17 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ l}) / (5,75 \text{ time} \cdot 3600 \text{ sek}) = \underline{139,19 \text{ l/s}}$$



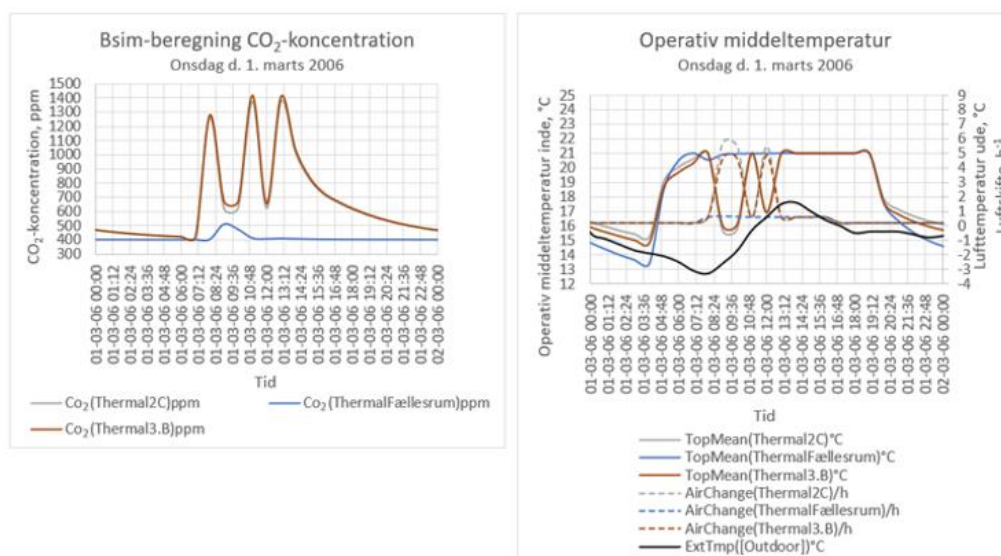
Figur 49. Opsummering af luftmængder på baggrund estimeret luftskifte i 2.C samt eksempel på konstant luftskifte på $2,26 \text{ h}^{-1}$ hvis der var mekanisk balanceret ventilation, og 27 elever (8 år) samt 1 lærer, for at holde CO_2 -koncentrationen på maksimalt 1000 ppm. Ved den eksisterende løsning har der været ventileret med ca. 2643,27 m^3 udeluft, i forhold til løsningen med mekanisk balanceret ventilation, hvor der har været ventileret med 2850,00 m^3 i løbet af undervisningsperioderne.

4.3 Bsim (Trin 3)

I dette afsnit fremgår resultater fra Bsim-simuleringer. Der er udarbejdet et basis beregningsmodel der er kalibreret så tilnærmelsesvist som muligt med dels de faktiske forhold på stedet, måleresultaterne samt de estimerede luftmængder. Hvor målingerne og de tilhørende luftskifteestimeringer rækker over nogle korte tidsperioder i februar og start marts, så ses resultaterne fra Bsim over et år. Fra 1. januar til 31. december.

4.3.1 Tilpasset model

Af Figur 50 fremgår resultater på indeklimasimulering i 2.C og 3.B onsdag d. 1. marts 2006 som er en gengivelse fra Figur 27 afsnit 3.5.2 Bsim.



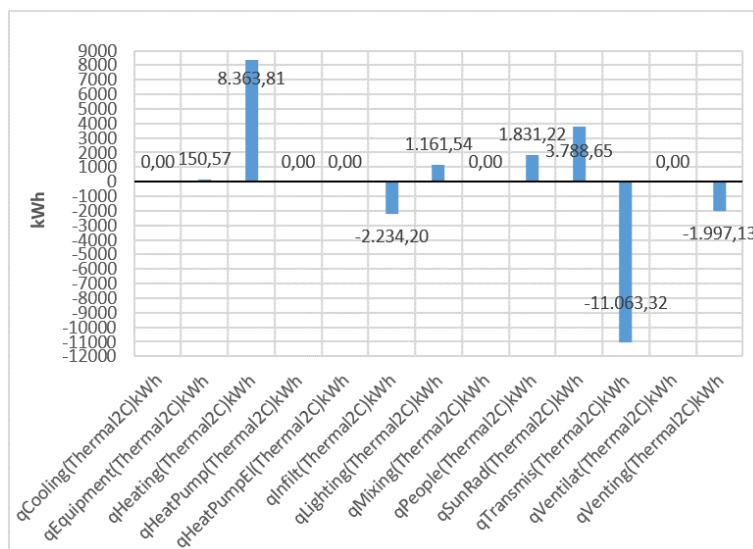
Figur 50. Tilpasset Bsim-beregning for onsdag d. 1. marts 2006 (DRY 2013). Venstre diagram: Simuleret CO_2 -koncentration i 2.C, 3.B og fællesrum. Højre diagram: Simuleret operativ middeltemperatur, luftskifte og udetemperatur.

Tilnærmelsesvist matcher indeklimasimuleringen de målte CO₂-koncentrationer og indvendige lufttemperaturer. CO₂-koncentrationen kommer maksimalt op på ca. 1400 ppm og den operative middeltemperatur er på ca. 21 °C. Ved udluftninger kommer temperaturen ned på ca. 16 °C.

Varmebalance

Af Figur 51 fremgår varmebalancen i 2.C's klasselokale for en periode på 1 år med udgangspunkt i den tilpassede Bsim-model. Parametrene der giver mest udslag, er kWh-forbruget til opvarmning, der viser et behov på 8363,81 kWh og transmissionstabet der viser et tab på 11063,32 kWh. For Venting er der et tab på 1997,13 kWh. Varmebelastningen fra solindfaldet er på 3788,65 kWh.

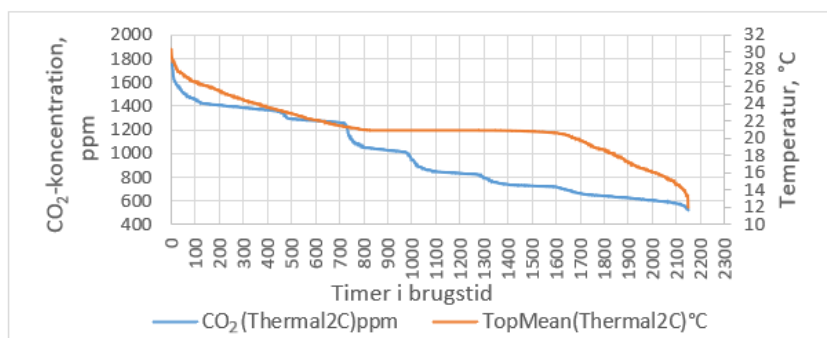
Den gennemsnitlige indvendige lufttemperatur for det beregnede år er 20,14 °C og den udvendige beregnede gennemsnitlige lufttemperatur er 8,15 °C.



Figur 51. Den årlige varmebalance i 2.C på baggrund af Bsim-beregnin-gen for den tilpassede model. De største udslag er nettoopvarmnings behovet på 8.364 kWh og transmissionstabet på 11.063 kWh.

Sortering af timer med temperaturer

Af Figur 52 kan det aflæses at CO₂-koncentrationen overstiger grænsen på 1000 ppm, i ca. 980 timer ud af 2150 timer i brugstiden dvs. i ca. 45,6 % af brugstiden. Brugstiden er her fra kl. 08.00 til kl. 17.00. Dvs. undervisningsmoduler samt pauser og SFO-tid fra kl. 14.00 til kl. 17.00.



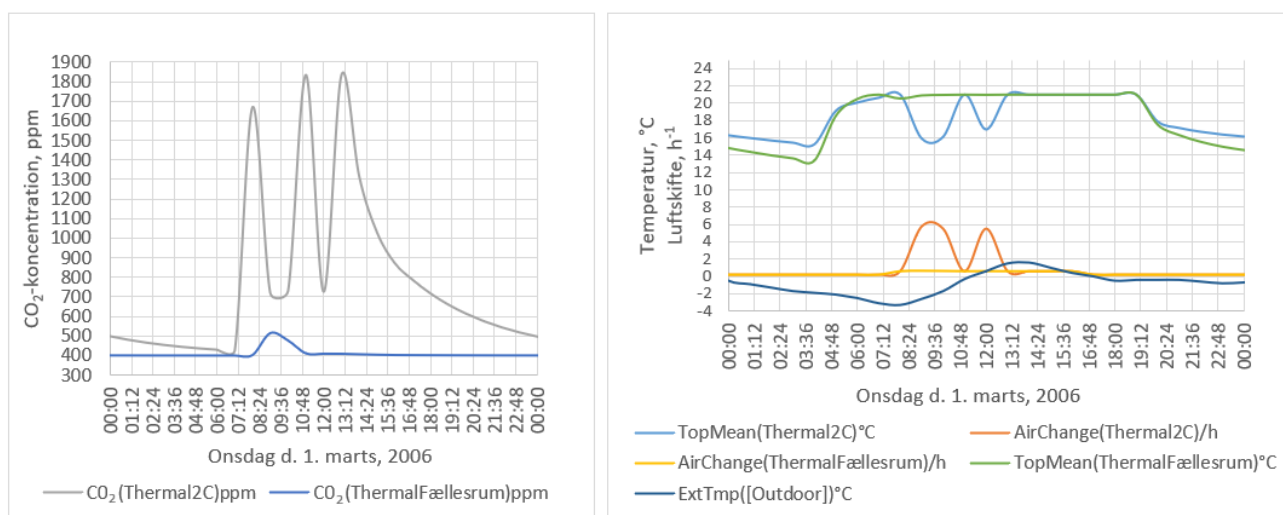
Figur 52. CO₂-koncentraion og operativ middeltemperatur sorteret efter største værdier over timer i brugstiden i 2.C. Det kan ses at i ca. 1000 ud af 2150 timer om året er CO₂-koncentrationen over 1000 ppm. Den operative middeltempe-ratur overskrider 26 °C i ca. 163 timer og 27 °C i ca. 74 timer.

Den operative temperatur beregnes til at overstige 26 °C i ca. 163 timer om året ud af 2150 timer hvilket svare til 7,6 % af brugstiden og over 27 °C i ca. 74 timer hvilket svare til 3,4 % af brugstiden.

Den operative middeltemperatur kommer maksimalt op på 30 °C i 1 time.

4.3.2 Fuld personbelastning

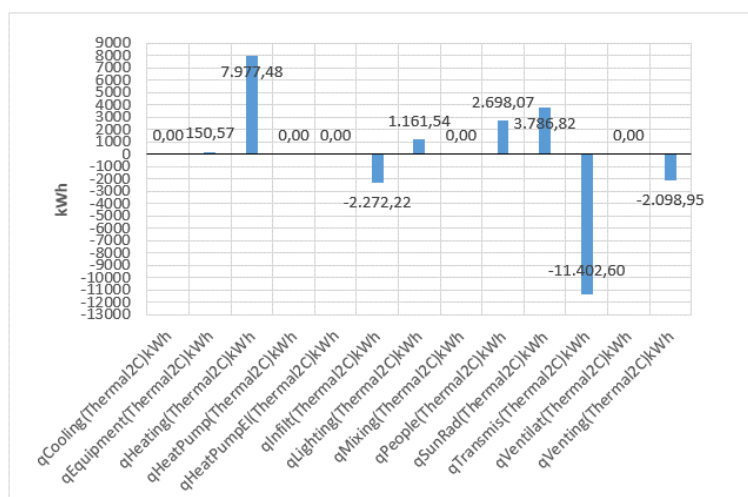
Af Figur 53 fremgår resultatet fra af indeklimasimuleringen med fuld personbelastning, dvs. med 28 personer. Her kommer at CO₂-koncentrationen op på ca. 1800 ppm og den operative middeltemperatur ligger på ca. 21 °C. Temperaturen falder til ca. 16 °C ved udluftninger. Det kan ses at fællesrum modtager CO₂-forurening fra klasselokalerne.



Figur 53. Bsim-beregning med fuld personbelastning på 26 elever (8 år) for onsdag d. 1. marts 2006 (DRY 2013). Venstre diagram: Simuleret CO₂-koncentration i 2.C og fællesrum. Højre diagram: Simuleret operativ middeltemperatur, luftskifte og udetemperatur. CO₂-koncentrationen toppes ved ca. 1850 ppm.

Varmebalance

Af Figur 54 fremgår varmebalancen over en periode på 1 år i 2.C, med udgangspunkt i den tilpassede Bsim-model.



Figur 54. Den årlige varmebalance med fuld personbelastning på 26 elever i 2.C (8 år) beregnet på baggrund af Bsim-beregningen for den tilpassede model. De største udslag er nettoopvarmnings behovet på 7.977 kWh og transmissionstabet på 11.403 kWh. Det ses her at varmebelastningen fra personer er steget med 866,85 kWh i forhold til den tilpassede model.

Parametrene der giver mest udslag, er kWh-forbruget til opvarmning der viser et behov på 7977,48 kWh og transmissionstabet der viser et tab på 11402,60 kWh. For Venting er der et tab på 2098,95 kWh. Varmebelastningen fra solindfaldet er på 3786,82 kWh.

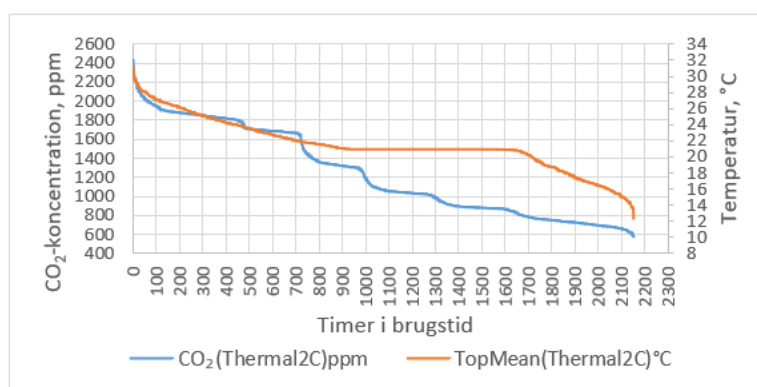
Den gennemsnitlige indvendige lufttemperatur for det beregnede år er 20,28 °C og den udvendige beregnede gennemsnitlige lufttemperatur er 8,15 °C.

Sortering af timer med temperaturer

Af Figur 55 kan det aflæses at CO₂-koncentrationen overstiger grænsen på 1000 ppm, i 1286 timer ud af 2150 timer i brugstiden dvs. i ca. 59,8 % af brugstiden. Brugstiden er her fra kl. 08.00 til kl. 17.00. Dvs. undervisningsmoduler samt pauser og SFO-tid fra kl. 14.00 til kl. 17.00.

Den operative temperatur beregnes til at overstige 26 °C i ca. 222 timer om året ud af 2150 timer, hvilket svare til 10,3 % af brugstiden og over 27 °C i ca. 119 timer hvilket svare til 5,5 % af brugstiden.

Den operative middeltemperatur kommer maksimalt op på 31 °C i 1 time.



Figur 55. CO₂-koncentraion og operativ middeltemperatur sorteret efter størsteværdier over timer i brugstiden i 2.C. Det kan ses at i ca. 1286 ud af 2150 timer om året er CO₂-koncentrationen over 1000 ppm. Den operative middeltemperatur overskrider 26 °C i ca. 222 timer og 27 °C i ca. 119 timer.

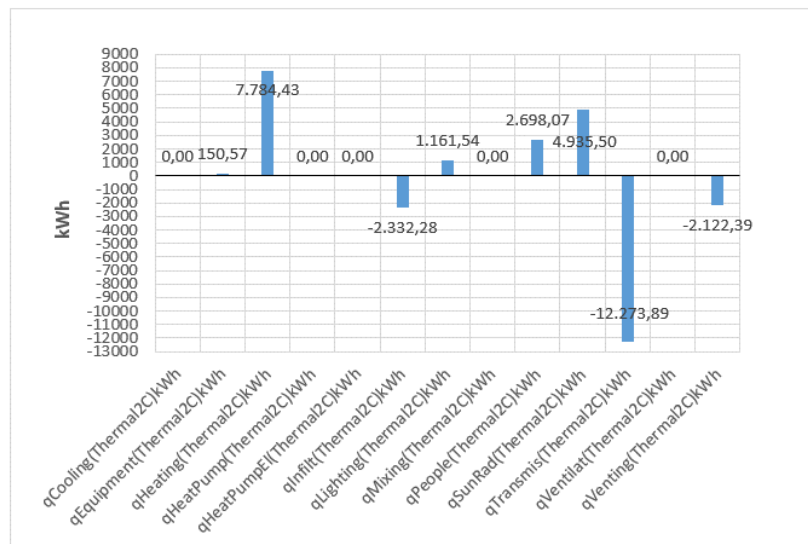
4.3.3 Uden solafskærmning

I dette resultatafsnit medtages kun varmebalancen og opsummering af timer med operativ middeltemperatur og CO₂-koncentration for et helt år. Der regnes også her med fuld personbelastning, men uden indvendige gardiner som solafskærmning.

Varmebalance

Af Figur 56 fremgår varmebalancen for en periode på 1 år med udgangspunkt i den tilpassede Bsim-model, med fuld personbelastning på 27 personer og uden solafskærmning. Parametrene der giver mest udslag, er kWh-forbruget til opvarmning der viser et behov på 7784,43 kWh og transmissionstabet der viser et tab på 12273,89 kWh. For Venting er der et tab på 2122,39 kWh. Varmebelastningen fra solindfaldet er på 4935,50 kWh.

Den gennemsnitlige indvendige lufttemperatur for det beregnede år, er 20,64 °C og den udvendige beregnede gennemsnitlige lufttemperatur er 8,15 °C.

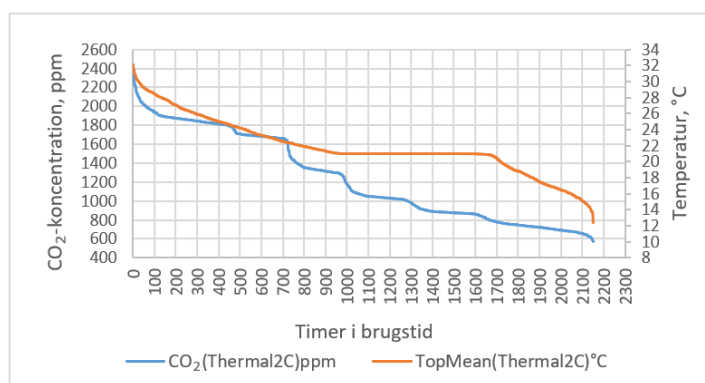


Figur 56. Den årlige varmebalance uden solafskærmning og 26 elever i 2.C (8 år) beregnet på baggrund af Bsim-beregningen for den tilpassede model. De største udslag er nettoopvarmnings behovet på 7.784 kWh og transmissionstabet på 12.274 kWh. Det ses her at varmebelastningen fra solen er steget med 1.148,68 kWh i forhold til den tilpassede model.

Sortering af timer med temperaturer

Af Figur 57 kan det aflæses at CO₂-koncentrationen overstiger grænsen på 1000 ppm, i 1283 timer ud af 2150 timer i brugstiden dvs. i ca. 59,8 % af brugstiden. Brugstiden er her fra kl. 08.00 til kl. 17.00. Dvs. undervisningsmoduler samt pauser og SFO-tid fra kl. 14.00 til kl. 17.00.

Den operative temperatur beregnes til at overstige 26 °C i ca. 290 timer om året ud af 2150 timer, hvilket svare til 13,5 % af brugstiden og over 27 °C i ca. 204 timer, hvilket svare til 9,5 % af brugstiden. Den operative middeltemperatur kommer maksimalt op på 32 °C i 1 time.



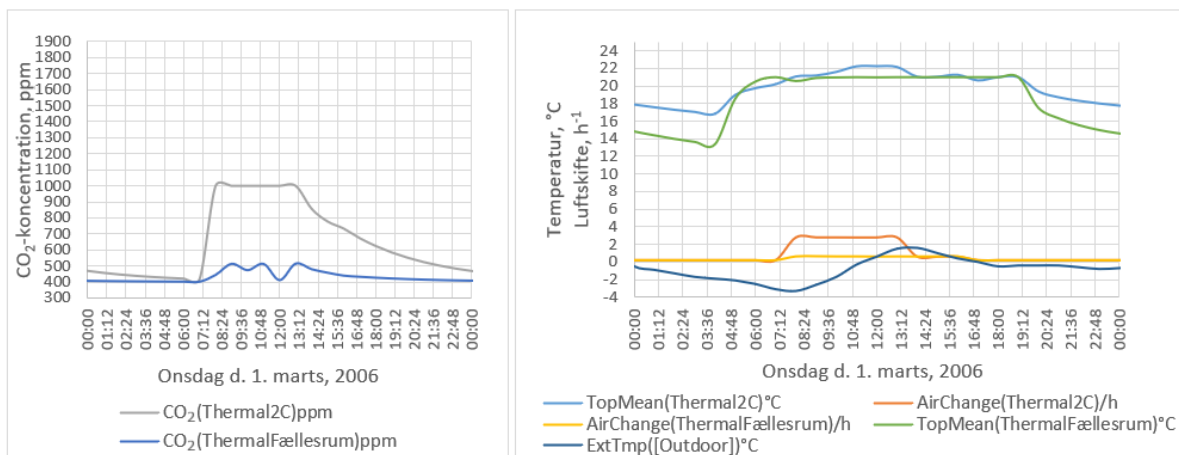
Figur 57. CO₂-koncentraion og operativ middeltemperatur sorteret efter størsteværdier over timer i brugstiden i 2.C og uden solafskærmning. Det kan ses at i ca. 1283 ud af 2150 timer om året er CO₂-koncentrationen over 1000 ppm. Den operative middeltemperatur overskrider 26 °C i ca. 290 timer og 27 °C i ca. 204 timer.

4.3.4 Mekanisk balanceret ventilation

Det sidste tiltag er ændring af nuværende ventilationssystem til mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding, der regnes med fuld personbelastning og uden indvendig solafskærmning.

Der sker ingen udluftninger til det fri. Ventilationssystemet styres efter en maksimal CO₂-koncentration på 1000 ppm, ved fuld personbelastning på 27 personer. På Figur 58 kan det ses at grænsen på 1000 ppm overholdes, og at luftskiftet kontinuerligt ligger på ca. 3 h⁻¹.

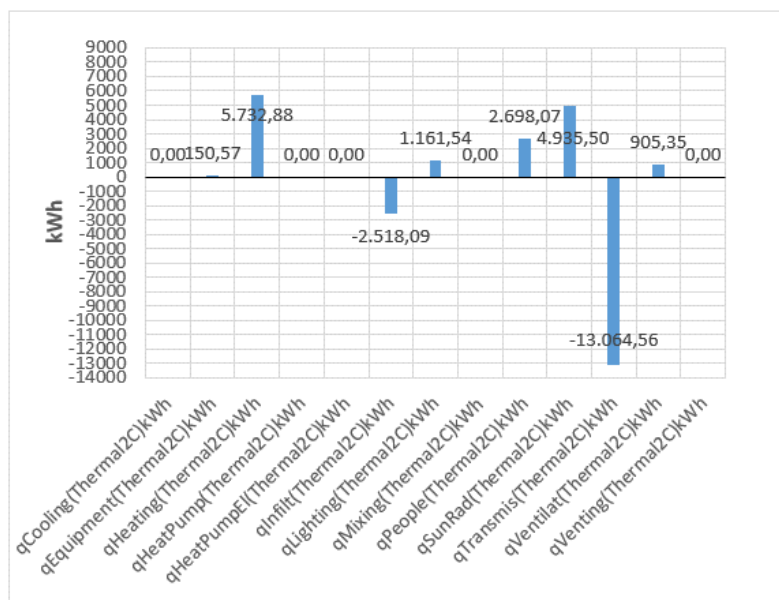
Den operative middeltemperatur varierer mellem 20 og 22 °C og lige som måleresultaterne viser, så reduceres ydelsen i varmeanlægget ca. kl. 19.00 og temperaturen falder frem til tidlig morgen ca. kl. 04.00 hvor varmeanlægget igen skruer op for varmeydelsen.



Figur 58. Bsim-beregning med mekanisk balanceret ventilation, for onsdag d. 1. marts 2006 (DRY 2013). Venstre diagram: Simuleret CO₂-koncentration i 2.C, 3.B og fællesrum. Højre diagram: Simuleret operativ middeltemperatur, luftskifte og udetemperatur. CO₂-koncentrationen holdes på maksimalt 1000 ppm.

Varmebalance

Af Figur 59 fremgår varmebalancen for et helt år, med udgangspunkt i den tilpassede Bsim-model, med fuld personbelastning på 27 personer uden solafskærmning, med mekanisk balanceret ventilation samt varmegenvinding.



Figur 59. Den årlige varmebalance uden solafskærmning og med 26 elever i 2.C (8 år) samt med mekanisk balanceret ventilation, beregnet på baggrund af Bsim-beregningen for den tilpassede model. De største udslag er nettoopvarmnings behovet på 5.733 kWh og transmissionstabet på 13.065 kWh. Varmetabet fra venting er fjernet og varmetilførsel fra ventilationen er tilført til varmebalancen.

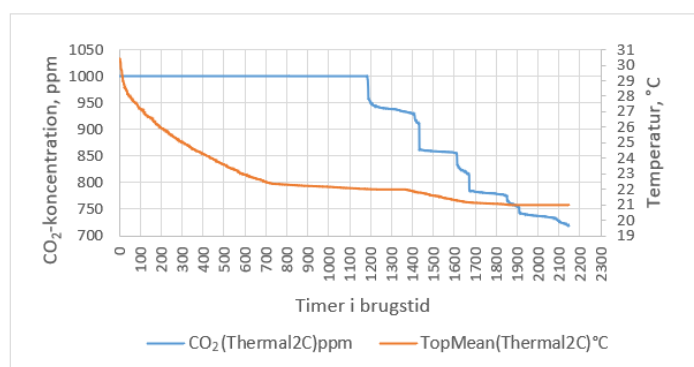
Parametrene der giver mest udslag, er kWh-forbruget til opvarmning der viser et behov på 5732,88 kWh og transmissionstabet der viser et tab på 13064,56 kWh. Fra ventilationsanlægget er der en varmetilførsel på 905,35 kWh, nu hvor varmetabet fra venting er 0 kWh. Varmebelastningen fra solindfaldet er på 4935,50 kWh.

Den gennemsnitlige indvendige lufttemperatur for det beregnede år er 21,55 °C og den udvendige beregnede gennemsnitlige lufttemperatur er 8,15 °C.

Sortering af timer med temperaturer

Af Figur 60 kan det aflæses at CO₂-koncentrationen ikke overstiger grænsen på 1000 ppm.

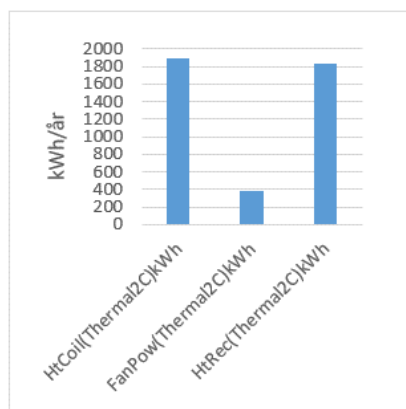
Den operative temperatur beregnes til at på over 26 °C i ca. 193 timer om året ud af 2150 timer hvilket svare til 9,8 % af brugstiden og over 27 °C i ca. 114 timer hvilket svare til 5,3 % af brugstiden. Den operative middeltemperatur kommer maksimalt op på 30 °C i samlet 5 timer.



Figur 60. CO₂-koncentraion og operativ middeltemperatur sorteret efter størsteværdier over timer i brugstiden i 2.C og uden solafskærmning og med mekanisk balanceret ventilation styret efter CO₂-koncentration på under 1000 ppm. Den operative middeltemperatur overskrider 26 °C i ca. 193 timer og 27 °C i ca. 114 timer.

Energiforbrug

Af Figur 61 er der af Bsim-beregningen udtrukket energiforbruget til ventilationsanlægget over 1 år. Varmefladen forbruger ca. 1900 kWh/år. Ventilatoren bruger lige under 400 kWh/år og varmegenvinderen genbruger ca. 1850 kWh/år.



Figur 61. Energiforbruget til varme-flade, og varmegenvinding samt el-forbruget til ventilatorerne.

5. Diskussion

Resultaterne strækker sig over praktiske målinger, efterfølgende estimering af luftskifte og anvendelse af måleresultater til opbygning af Bsim-model for videre at beregne konsekvensen af forskellige tiltag, på indeklimaet og energiforbruget, over et år.

5.1 Validering af resultater

Flere af måleapparaterne blev opstillet i opholdszonen i ca. 1 meters højde, og har derfor været eksponeret for evt. fejludslag, hvis nysgerrige skolebørn har været forbi for at undersøge måleudstyret. Her vil særligt CO₂-målerne hurtigt slå ud med en falsk høj koncentration. Der er dog kun nogle enkelte udslag i nærværende projekt, der vurderes være et falsk udslag.

Målerne har i langt den største del af måleperioden, fungeret uden fejl. Der skal dog tages forbehold for små usikkerheder ved målerne, hvilket også kan ses af bilag 4.

Under den tredje måling blev strømforsyningen til to af CO₂-målerne afbrudt, så der kun efterfølgende blev registreret temperatur, og relativ luftfugtighed af de batteridrevne HOBO-loggere.

Under første og anden måling har evt. solindfald ikke kunne have haft betydning på resultaterne, da måleudstyret er placeret på en nordvendt vægflade. Direkte solpåvirkning kan give højere lufttemperaturer. F.eks. kan det ses af den fjerde måling på Figur 39 at, måleren der er placeret centralt i fællesrummet, pludselig stiger med 7 °C og falder der efterfølgende igen.

Både CO₂-målerne og HOBO-loggerne har været testet inden målingen, for at klarlægge om de måler ens, se bilag 4.

Tanken med at målingerne var også at kunne overføre disse til en bygningsmodel, til simulering af indeklimaet. Det må dog siges at være forbundet med store usikkerheder. I nærværende projekt, er målingerne og dermed luftskifteestimeringerne foretaget om vinteren i perioder med dagsfrost, og det kan ikke udelukkes at der under varmere forhold, hvor det kan accepteres at have vinduer eller døre stående på klem, at dette vil påvirke resultatet af indeklimasimuleringen over et år.

5.2 Diskussion af resultater

Den relative luftfugtighed har under målingerne, vist sig som meget lave værdier, ned til på 20 % og ikke over 40 %. Selv om der for årstiden normalt er en lav relativ luftfugtighed (Brandt et al., 2013), vurderes det ikke at være problematisk i forhold til de andre parametre, som CO₂-koncentration og temperaturer. Der har derfor ikke været analyseret videre på måleresultaterne af den relative luftfugtighed.

Brugerne havde inden og under målingerne oplyst, at der dagligt bliver luftet ud, særligt i pauserne. Det blev også oplyst at indeklimaet opleves forskelligt, og problematisk i klasselokalerne, typisk som høje temperaturer. Klasserne 3.B og 3.C i blok C, har ifølge brugerne problemer med høje temperaturer og tungere luft. Det samme er situationen i blok A. I 2.C's klasselokale virker indeklimaet ifølge brugerne bedre, dog har der i perioden, været tendens til at være køligt.

Fællesrummet opleves under måleperioden af de adspurgte brugere som ok, dog lidt køligt.

5.2.1 2.C blok C

Måleresultaterne ser ud til at afspejle brugen af lokalerne. Overordnet set så er mønstret i kurvediagrammerne fra målingerne ensartet, kurverne fremstår spidsformede hvor enten CO₂-koncentrationen øges eller reduceres. Tendensen i lokalerne er forskellig til, om den indvendige lufttemperatur ændrer sig samtidigt, med ændringer i CO₂-koncentrationen. Her kan der f.eks. ses på 2.C's klasselokale i Figur 38 og Figur 39, at der ofte, sker store reduktioner i temperaturer på kort tid, hvilket kan indikere at døre eller vinduer til det fri, åbnes. Målingerne i 2.C indikerer således, at der jævnligt luftes ud, minimum i hver pause men ofte også midt i undervisningsmodulerne. Udluftningerne til det fri ser ud til at have en stor indvirkning på CO₂-koncentrationen, der ved det første frikvarter kl. 09.45, falder brat over få minutter, fra ca. 1000 ppm til 400 ppm. Her falder temperaturen samtidigt fra 22 °C til ca. 16,8 °C, se brun kurve i Figur 39. Temperaturen i 2.C afviger her meget, fra temperaturforløbet i 3.B, 1.B og 0.B ved at disse ligger mere stabilt på mellem 22 og 24 °C.

I 2.C kan brugernes oplevelse af at der kan være lidt køligere, samtidig med at indeklimaet ellers virker acceptabelt, også passe med resultatet af målingerne, der jo indikerer at der meget ofte, i måske for lange perioder, luftes ud direkte til det fri. Det vil sandsynligvis også hænge sammen med de lavere temperaturer der opleves i lokalet.

5.2.2 3.B blok C

Af Figur 38 ses CO₂-koncentrationen i 3.B, vist med den blå kurve at der også her, er et markant fald fra ca. 1450 ppm til ca. 650 ppm, samtidig falder temperaturen kun fra 24 til 23 °C. I 3.B virker det her som om at der ikke udluftes til det fri, men at personerne forlader lokalet samtidig med at dørene til garderobe eller fællesrummet står åben. Når døren til fællesrummet står åben, har det mekaniske udsug, der sidder i loftet i det høje fællesrum større indflydelse på luftskiftet i klasselokalet. Ud over at der måske sker en forøgelse af luftskiftet, vil der muligvis også ske en opblanding af den mindre CO₂-forurenede luft i fællesrummet, hvilket kan have indflydelse på CO₂-reduktionen.

Ud fra Figur 39 kan det ses at temperaturen i 3.B ligger højest, hvilket også stemmer overens med brugernes oplevelse i lokalet. CO₂-koncentrationen er også samtidigt højest i dette lokale, hvilket også muligvis kan føles som tungere eller dårligere luft. Det er usikkert om det er selve CO₂-koncentrationen der gør at luften opleves dårlig, eller indikationen på at der kan være andre elementer som lugte, og afgangninger fra personer, materialer og materiel til stede (Vorre et al., 2017a).

5.2.3 0.B blok A

I blok A der huser 0.B og 1.B har brugerne også omtalt dårlig luftkvalitet og udfordringer med høje temperaturer. I 0.B som fremgår af den røde kurve i Figur 38, kan der ses en lidt anden tendens i CO₂-koncentrationen, her stiger niveauet langsomt frem til frikvarteret kl. 09.45 til ca. 1000 ppm, her efter og frem til kl. 12.00 dannes der en plateaulignende form, der dog varierer lidt fra 1000 ppm til ca. 800 ppm. Her indikeres det heller ikke på temperaturkurve i Figur 39, at der åbnes døre til det fri, det kan dog ikke afvises at et vindue kan stå lidt på klem. Temperaturen ligger stabilt frem til kl. 12.00 på mellem 22,5 og 23 °C. Herefter falder temperaturen til ca. 21 °C.

5.2.4 1.B blok A

Indeklimaet i 1.B i Figur 38 og Figur 39, minder lidt mere om indeklimaet i 3.B, både temperatur- og CO₂-mæssigt. CO₂-koncentrationen ligger dog kun på maksimalt 1000 ppm i de første moduler. Ens for både 2.C, 3.B og 1.B er at CO₂-koncentrationen kl. 11.45 ligger på mellem 1250 og 1300 ppm og at det herefter ser ud som om at personerne forlader lokalerne. Det er dog kun i 2.C at temperaturen falder fra 22 til ca. 17 °C.

Det kan se ud som om, at det er en tendens til manglende udluftning i 3.B i blok C og 0.B og 1.B i blok A, hvilket kan være noget af forklaringen på at indeklimaet i lige netop disse lokaler, opleves dårligere.

5.2.5 Variationer i det enkelte lokale

En del af målingerne gik også ud på at undersøge variationerne i temperaturer og CO₂-koncentration inden for et enkelt klasselokale. Og her er målingerne udført i 2.C i blok C.

De første målinger, som fremgår af Figur 29, der blev udført i højden, viste at CO₂-koncentrationen stiger, og falder tilnærmelsesvist ensartet og på samme tid, med få minutters forskel.

Når CO₂-koncentrationen ligger på et fast niveau, er der en lille forskel på mellem 50 og 100 ppm. En fejlkilde kunne her være unøjagtigheder i CO₂-målerne, men hvis man kigger godt efter på kurven, så passer rækkefølgen af niveauerne med rækkefølgen af målere på væggen, særligt når kurverne er kraftigt aftagende. Det bør derfor antages det, at der må være en lille forskel i CO₂-koncentrationen i højden. Det skal også bemærkes at, de største forskelle i CO₂-koncentrationen befinder sig, i den nederste halve meter over gulvet. Om det er fordi der er en lille forøget luftstrøm hen over gulvet, kan ikke konkluderes ud fra nærværende rapport, men det kunne muligvis være forklaringen. CO₂-koncentrationen øges og reduceres stort set samtidigt i alle højder, hvilket må indikere, at indeluft opblandes med udeluften i alle højder, nogen lunde samtidigt.

Under samme måling blev også lufttemperaturen registreret i højden, hvilket fremgår af Figur 30. Her er der variationer på mellem 1,5 til 2 °C og det er primært i de nederste lag, at temperaturspringene er størst i op til 1,5 meter, hvor efter temperaturlagdelingen er stort set ens. Ved variationer i lufttemperaturen, ændres temperaturlagdelingerne ensartet og nogenlunde i samme tempo.

Ved den anden måling viser CO₂-koncentrationen samme mønster, der er heller ikke her, den store forskel i højden. Forskellen er nu, at der af brugerne er oplyst, at der under målingen har været 24 elever i klasselokalet, i forhold til første måling hvor der kun var 7 til 10 elever. Ser man på Figur 33, vedrørende temperaturmåling nr. 2, så er der her også forskel i temperaturlagdelingen i de højeste lag. Også her er der 1,5 til 2 °C forskel.

Under tredje måling i Figur 35 og Figur 36 blev der målt i vandret plan. Der sad således en måler ca. 20 cm fra yderdøren der anvendes til udluftning, og de fire andre målere sad spredt rundt i klasselokalet i samme højde, se Figur 21. Her er CO₂-koncentrationen stort set ensartet fordelt i lokalet.

Det interessante ved resultaterne fra den vandrette opstilling, er at hvis man kigger på CO₂-måleren, der sidder 20 cm fra yderdøren og den fjerneste måler, så sker faldet i CO₂-koncentrationen på nøjagtig samme tid i bredden. Der er dermed ingen forsinkelse på CO₂-koncentrationen længst væk, i forhold til CO₂-koncentrationen ved yderdøren.

Der er lidt temperaturvariationer i vandret plan på ca. 2 °C forskel, hvilket der også var forventet. De laveste temperaturer findes omkring yderdøren. I den anden halvdel af glaspartiet, er klasselokalets radiator placeret, hvilket giver højere temperaturer.

Også her falder temperaturen på nøjagtig samme tid, hvilket kan ses på måleren, der er placeret 20 cm fra yderdøren og måleren i det fjerneste hjørne. Men til forskel for CO₂-koncentrationen så sker temperaturfaldet med forskellige individuelle temperaturer i lagdelingerne.

5.2.6 Styring

Styring af indeklimaet kan foregå manuelt eller automatisk eller en kombination af begge (Bergsøe & og Afshari, 2012). I de eksisterende forhold er der lagt op til at brugerne selv, skal bidrage til reguleringen af indeklimaet ved manuel udluftning. Fordelene ved den manuelle metode må være, at i forhold til elevernes aktivitetsniveau og øvrige variationer hen over dagen herunder også vejrforhold, kan brugerne hurtigt åbne døre til det fri efter behov. Ulempen må ud fra betragtningen af målingerne også være, at der kan være en uens opfattelse af udluftningsbehovet, hvilket kan føre til for lidt, og for meget udluftning.

5.2.7 Målte værdier i forhold til kravet til det termiske indeklima

Når man ser på de målte indetemperaturer i forhold til nutidige krav, så ses der her på temperaturforholdene i opholdszonen. Opholdszonen omfatter lodret, rumvolumenet fra gulv til 1,8 meter over gulv. Her bør der fokuseres at børne i klasserne har lavere højde, samt lavere siddehøjde i forhold til voksne. Og lige netop siddehøjden bør der fokuseres på i forhold, til at sammenligne måleresultater med nutidige indeklimakrav. Ifølge danske vækstkurver er drenge og pigers gennemsnitshøjder i 8-årsalderen mellem 1,30 og 1,32 meter (Rigshospitalet & EDMaRC, 2021). I siddende stilling er bordhøjde 60-70 cm og hovedhøjden over gulv ca. 1,1 meter.

Ifølge kravene skal den lodrette temperaturforskel være på under 3 °C imellem hoved og ankler.

Der er ikke målt overfladetemperatur på gulvet. Ved 0,5 meter over gulvet til 1 meter over gulvet er der iht. Figur 30, mellem 0,5 og 0,7 °C forskel. Fra 0,5 meter over gulvet til 1,5 meter over gulvet er der ca. mellem 1 og 1,5 °C forskel. Dette er dog et øjebliksbillede, men det må antages at temperaturforskellen lodret holdes under 3 °C.

Ved første og anden måling, blev temperaturlagdelingen på bagvæggen i lokalets midterakse parallelt med facaden målt.

Der er målt om vinteren hvor den operative temperatur skal ligge på mellem 21 og 24,5 °C i opholdszonen, eller 22 °C +/- 2 °C iht. DS/EN ISO 7730.

Som det ses på Figur 36, så er der under målingen været ca. 2 °C forskel alt efter hvor eleverne er placeret i sidder i lokalet. I den inderste halvdel af lokalet svinger lufttemperaturen mellem 19 og 21 °C og ved udluftninger falder temperaturen til ca. 17,6 °C.

Ved fjerde måling på Figur 39, svingede temperaturen i 2.C meget, og var i længere perioder under 20 °C.

Ovenstående temperaturforhold er dog et øjebliksbillede, men i forhold til kravene så har den indvendige lufttemperatur tendens til at ligge under mindste kravet, på 21 °C det skal også nævnes at udetemperaturene under målingerne, har været under frysepunktet i dagtimerne.

I 3.B, 1.B og 0.B ligger temperaturerne på Figur 39, på mellem 22 og 24 °C, hvilket er inden for kravene. Her skal det også nævnes at 3.B og 0.B har orientering mod øst, og har derfor belastning fra solen det meste af formiddagen. Her påvirkes 2.C og 1.B der ligger mod øst først af solen ved 13-14-tiden, hvor dagens undervisning slutter. De kolde dage har måske medvirket, til at 3.B, 1.B og 0.B ikke er varmere, det er ellers i nogle af disse lokaler, der opleves problemer med varme.

Den indvendige operative temperatur, må maksimalt være over 26 °C i 100 timer om året i brugstiden, og over 27 °C i 25 timer om året.

Ved indeklimasimuleringen af 2.C over et år, blev der uden tiltag dvs. med 18 personer estimeret, at den operative temperatur var over 26 °C i 163 timer ud af 2150 timer og i 74 timer var den operative temperatur over 27 °C.

Ved fuld personbelastning blev de 26 °C overskredet med 222 timer og 119 timer over 27 °C

På trods af jævnlig udluftning og at gardinerne, det meste af året er trukket for, så overskrides kravene til hvor mange for varme timer der må være. Gardinerne reducerer dagslyset markant.

Der er også estimeret et antal timer, hvor der er henholdsvis 26 og 27 °C uden gardinerne trukket for, og her blev kravet på 26 °C overskredet med 290 timer om året, ud af 2150 timer og 204 timer over 27 °C

I det sidste scenarie der er simuleret, har lokalet installeret mekanisk balanceret ventilationsanlæg med varmegenvinding men uden køl. Der er angivet en varmefflade i anlægget. Her overskrider den operative temperatur 26 °C med 193 timer om året, og 27 °C med 119 timer om året.

Målingerne og simuleringerne stemmer overens med brugernes oplevelse af, at der er for varmt i lokalerne. Det hjælper lidt at gardinerne er trukket for, men det er ikke en optimal løsning på grund af manglende dagslys. Det må påregnes at eleverne er fuldtallige og at der inkl. lærer er 28 personer i lokalet, i de ovenstående scenarier, dermed er den bedste løsning iht. til simuleringen, løsningen med mekanisk balanceret ventilation, hvor der dog er der regnet uden solafskærmning. Det kunne derfor tænkes at udvendig solafskærmning ville reducere temperaturen bedre end ved brug af de indvendige gardiner. Det kunne også være at solafskærmende glas kunne hjælpe på varmen, men her skal det sikre at det ikke ødelægger farvespektret i dagslyset (BR18).

5.2.8 Krav til luftskifte

Ved de fem luftskifteestimeringer er der en tendens, eller et mønster der går igen i alle de målte lokaler. Uden for brugstiden dvs. fra ca. kl. 17.00 om eftermiddagen og frem til kl. 7.00 om morgenen ligger luftskiftet på mellem 0,1 og 0,38 h⁻¹. Fra ca. kl. 7.00 øges luftskiftet til mellem 0,5 og 0,6 h⁻¹. Det kunne tyde på at det mekaniske udsug er stoppet uden for brugstid og starter ved syvtiden.

I blok A og blok C ligger grundluftskiftet på ca. 0,5 til 0,6 h⁻¹ i undervisning modulerne. Luftskiftet øges af og til, op til lige over 1 h⁻¹ hvor årsagen antages at være, at døren til garderobe eller fællesrum står åben og dermed påvirkes luftskiftet af de mekaniske udsug. Det er tydeligt når yderdøre åbnes til det fri. Her estimeres kortvarigt luftskifte på helt op til 23 h⁻¹.

Kravet til luftskiftet og dermed luftmængden er ifølge BR18 5 l/s pr. person samt 0,35 l/s pr. kvadratmeter, hvilket svarer til 525.410 l/h eller et luftskifte på 2,5 h⁻¹. Ved behovsstyret ventilation, kan luftmængden dog reduceres efter behovet, dog uden af CO₂-koncentrationen på 1000 ppm overskrides. Og der må i brugstiden ikke være en lufttilførsel på under 0,35 l/s pr. kvadratmeter.

Her opstilles på Tabel 7, en opsummering af de estimerede luftskifter og luftmængder pr. person ved de fem beregninger i afsnit 4.2:

Tabel 7. Oversigt over estimeret luftskifte fra resultatafsnittet. Det kan ses at 2.C, d. 4. marts havde et gennemsnitlig luftskifte på $4,30 \text{ h}^{-1}$ der svare til 243,7 l/s og 8,4 l/s pr. person og overholder dermed BR18 - kravet på mindst 5 l/s pr. person. I de øvrige lokaler samt 2.C, d. 8. februar overholdes kravet til luftmængderne ikke.

Estimeret luftskifte (Rumvolumen, 203.754 liter)		Periode mellem kl. 08.15 og 14.00		
		Gennemsnitlig luftskifte i alt	Gennemsnitlig luftmængde i alt	Gennemsnitlig luftmængde pr. person ved 28 personer
Torsdag d. 4. marts				
2.C	Blok C	$4,30 \text{ h}^{-1}$	243,7 l/s	8,4 l/s pr. person
3.B	Blok C	$1,33 \text{ h}^{-1}$	75,5 l/s	2,4 l/s pr. person
0.B	Blok A	$1,43 \text{ h}^{-1}$	81,2 l/s	2,6 l/s pr. person
1.B	Blok A	$1,52 \text{ h}^{-1}$	86,1 l/s	2,8 l/s pr. person
Mandag d. 8. februar				
2.C	Blok C	$2,26 \text{ h}^{-1}$	127,7 l/s	4,2 l/s pr. person

Af Tabel 7 kan det ses, at ved de fleste af estimeringerne, så ventileres der ikke med tilstrækkelige luftmængder iht. de nuværende krav på $2,5 \text{ h}^{-1}$ der beregnet i Tabel 5. Kun i 2.C ved markant udluftning, kommer luftmængden op på 8,4 l/s pr. person. Der er dog tale om gennemsnitlige værdier, hvor værdierne på målingerne viser store variationer hen over dagen. De kraftige udluftninger foregår primært i pauserne, dermed er luftskiftet reelt langt mindre i undervisningsmodulerne og sjældent kommer luftskiftet over 1 h^{-1} .

5.2.9 Målt CO₂-koncentrationen i forhold til krav

Det er et kravet i BR18 at CO₂-koncentrationen i undervisningslokaler, ikke må ikke overstige 1000 ppm ved dimensionerende forhold, som f.eks. ved et siddende aktivitetsniveau. Ved at sætte minimumskoncentrationen til 400 ppm, bliver CO₂-koncentrationen overskredet med op til 600 ppm dvs. der er en CO₂-koncentrationen på 1600 ppm. Det er dog kun kortvarigt og typisk op til pauser, hvor der luftes ud eller åbnes døre til fællesrummet, der gør at CO₂-koncentrationen falder. Så ved at antage at koncentrationsniveauet er acceptabelt, så bliver der ikke ventileret med nok luftmængder pr. person. Det kunne også tænkes at der i virkeligheden ville være behov for en øget luftmængde (BR18), da skolen er opført i en periode hvor byggematerialer har været mere forurenende, som med f.eks. formaldehyd og PCB. Der bør nok foretages en miljøundersøgelse af den indvendige luftkvalitet, for at fastlægge kravet til luftmængderne såfremt, man vil ændre ventilationssystemet.

I den tilpassede Bsim-model blev det estimeret at i 980 timer, ud 2150 timer i brugstiden, blev grænsen på 1000 ppm overskredet. De 2150 timer i brugstiden er regnet fra kl. 08.00 til kl. 17.00 fratrukket weekender, helligdage og ferier.

I Bsim-modellen med fuld personbelastning er der i 1286 timer ud af 2150 timer, en koncentration på over 1000 ppm.

Da det primært kun er i undervisningsmodulerne at CO₂-koncentrationen overskrides hvilket, også er i det tidsrum hvor eleverne skal være koncentreret, så ville timeoverskridelsen være endnu højere.

Således med betragtningen på CO₂-koncentrationen iht. Bsim-modellen, så forekommer det som mindre optimale forhold.

5.2.10 Brugeradfærd

For at optimere indeklimaforholdene, bør man som det første se på de forholdsvist simple og billigste tiltag. Således kunne trin 1, være at revurdere brugernes udluftningsvaner og se hvor meget der kan optimeres. Det er ikke sikkert at et fuldt acceptabelt indeklima nås, men så kunne næste trin være at kigge nærmere på evt. ændringer af ventilationsanlægget.

Under trin 1, bør det eksisterende ventilationsanlæg og varmeanlæg gås efter for evt. fejl i driftindstillinger og funktioner, således at det fuldt ud fungerer som tiltænkt.

I vurderingen af brugernes udluftningsvaner kan der tilknyttes ekstern rådgivning, der kan udarbejde et program for udluftningsprocedurerne, til brugerne. Udluftningsproceduren bør så tilpasse den enkelte årstid, evt. helt ned i vejrtyper under den enkelte årstid. Det kan antydes af målingerne og de efterfølgende estimeringer, at når der er dagsfrost, så kan der udluftes for lidt, men der kan også udluftes for meget. For langvarige udluftninger fører til køligere indetemperaturer, under kolde perioder om vinteren. Og det kan ses af målingerne, at selv meget kortvarige udluftninger i pausen, på 5 til 10 minutter kan reducere CO₂-koncentrationen tilstrækkeligt.

Under varmere vintre eller lunt forårsvejr, kan det måske hurtigere blive et spørgsmål om for høje inde temperaturer, men her kunne udluftningens varighed måske tilpasses. Måske skal kraftigere eller længerevarende udluftninger flyttes i pauserne, så disse afsluttes inden undervisningens start, således at temperaturen er kommet ned, når timen starter.

Det må også antages, at en udluftningsprocedure, og for så vidt flere tilpassede procedurer, skal kunne anvendes af brugere der ikke umiddelbart, har den fornødne kendskab til indeklima og dets belastninger. Og så må proceduren heller ikke være for tidskrævende og besværlig at anvende.

5.2.11 Termiske forskelle

For at reducere nogle af de termiske forskelle der er i klasselokalerne, her særligt om vinteren, kan der ses på udskiftning af glasfacadesystemet, til et med en bedre U-værdi og dermed hæve den indvendige overfladetemperatur.

5.2.12 Tekniske installationer

Under en evt. optimering bør der under trin 1, også kontrolleres at varmeanlæg, og de automatiske styringer der er tilknyttet ventilationsanlægget, kører optimalt. Varmeanlægget skulle gerne kunne yde en ligeligt fordelt varmefordeling. I det store fællesrum sidder radiatorerne lige under de højsiddende vinduer, i ca. 2,8 meters højde, og de mekaniske udsug sidder i loftet, dermed må det antages at en større del af varmetilførelsen fra radiatorerne, stiger op i toppen af det høje fællesrum og bliver suget ud eller ventileret ud af de højsiddende vinduesopluk.

Det næste trin kunne være at undersøge, om effekten fra det mekaniske udsug kunne integreres mere i klasselokalet, evt. via nogle spjæld eller ventiler i facaden og mellem klasselokalet og fællesrummet.

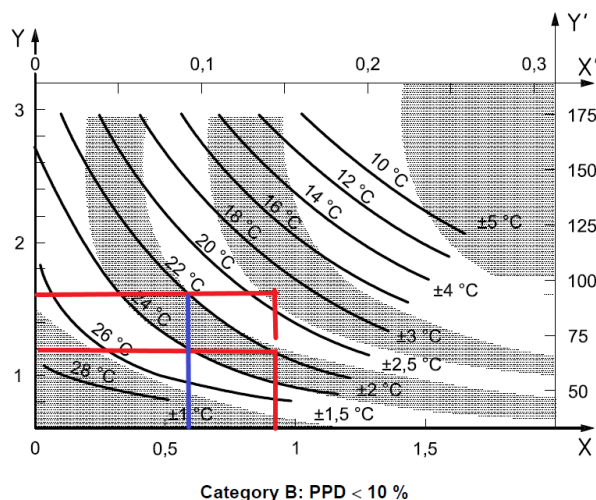
5.2.13 Aldersgrupper

Både indeklimamæssigt men også energimæssigt bør ventilationssystemerne tilpasses aldersgruppernes individuelle belastninger af indeklimaet ved metabolismen. Der behøves måske kun at aldersopdele personbelastningen med 3 til 4 års intervaller. For selv om klasselokalerne skal kunne anvendes af alle aldersgrupper (Vorre et al., 2017a), så er det måske værd at undersøge, hvor tit den enkelte skole i virkeligheden, roterer rundt på aldersgrupperne. Der er måske ingen grund til at indeklimaet i 0. til 1. klasserne

dimensioneres til 10. klasseelever hvis det aldrig bliver tilfældet, at der i lokalet skal veksles mellem disse aldersgrupper.

5.2.14 Metabolismen

Som det også fremgår af målingerne, er brugen af undervisningslokalerne blandede og bør ved inddragelse af behovsstyret ventilation, tages højde for det. Der ud over så er aktivitetsniveauet og dermed metabolismen varierende, f.eks. kan der være en situation hvor eleverne har siddet stille og koncentrerende i 1,5 time, så er aktivitetsniveauet på 1,2 met og for overholdelse af PMV-værdien på -0,5 til 0,5 skal indetemperaturen om vinteren, være på mellem 21 og 24,5 °C i pausen stiger aktivitetsniveauet til 1,6 met og for at PMV-indekset nu skal overholdes, ville det kræve en køligere temperatur på ca. 19 °C som fremgår af Figur 62 (DS/EN ISO 7730, 2006).



Figur 62. Med aktivitetsniveau på 1,2 met (Y-aksen) skal der ifølge DS/EN ISO 7730 om vinteren, være en indvendig operativ temperatur på 22 °C +/- 2 °C. Med et aktivitetsniveau på 1,6 met, der kunne forekomme efter et frikvarter, vil det såfremt samme beklædning på ca. 0,95 clo (Rød streg på X-akse) bibeholdes passe med en komfortabel operativ temperatur på 19 °C, alternativt skal beklædningen reduceres til ca. 0,6 clo (blå streg på X-akse) hvis den operative temperatur på 1,6 met, skal opleves som komfortabelt og for at PPD-indekset skal holdes på under 10 %.

Som det fremgår af Figur 62, så skal indetemperaturen være på ca. 19 °C, ved et aktivitetsniveau på 1,6 met, med en samtidig beklædning der har en varmeisolering på ca. 0,9 clo. Alternativt skal eleven kunne regulere sin beklædning til en varmeisolering på ca. 0,6 til 0,7 clo, hvilket svarer til en let trøje med korte ærmer, bukser, strømper og sko, hvis inde temperaturen bevares på 22 °C (DS/EN ISO 7730, 2006). Man kan sige at der således, kan være en fordel i at lærerne udlufter op til slutningen af pausen, således at indetemperaturen er lavere i starten af undervisningstimerne. Over tid vil aktivitetsniveauet falde fra 1,6 til 1,2 met i takt, med at indetemperaturen igen øges.

5.2.15 Energiforbruget

Ved at udfører indeklimasimuleringerne med forskellige tiltag, opstår der variationer i varmebalancen og selv om det er for usikkert at konkludere et egentligt energiforbrug kan variationerne ved tiltagene sammenlignes.

Ved den tilpassede simulering er der i varmebalancen, angivet en samlet varmetilførsel på 8363,81 kWh om året, og med mekanisk balanceret ventilation 5732,88 kWh. Til den mekaniske balanceret ventilation, skal der så tillægges energiforbruget til varmekilden og varmegenvinderen på ca. 1900 kWh/år og ventilatorerne på ca. 390 kWh/år. Dermed bliver nettoforbruget i lokalet i alt på ca. 8023 kWh/år.

Ud fra en betragtning, med meget stor usikkerhed, så er der en mindre besparelse på energiforbruget til selve lokalet, med mekanisk balanceret ventilation, der kun er styret efter at overholde en CO₂-koncentration på under 1000 ppm, hvor der samtidigt også er regnet med fuld personbelastning. Luftmængderne er dermed varierende som det også fremgår af Figur 58.

Der ikke regnet på optimering af klimaskærmen der i dag fremstår i original stand. Men der kunne muligvis være noget besparelse at hente her på varmetabet. Men optimering af klimaskærm, uden optimering af ventilation kan også føre til yderligere overophedning og dermed et behov for køl.

6. Konklusion

Brugernes oplevelse af indeklimaet er forskelligt men ikke optimalt. I flere lokaler er der for høje temperaturer og luften føles dårlig. Og på baggrund af nærværende projekt, kan det konkluderes der sammenhæng imellem målinger, og brugernes oplevelser.

6.1 Identificering af indeklimaproblemerne

Herunder fremstår identificeringen indeklimaproblemet i klasselokalet.

- Indeklimaet er varierende hen over dagen.
- Der er både for lave indetemperaturer og for lange perioder, med for høje indetemperaturer. Problemerne varierer imellem klasserne.
- Delvist i brugstiden, overstiger CO₂-koncentrationen i alle klasser 1000 ppm. Det er ikke alle lokaler der reducerer CO₂-koncentrationen, med direkte udluftning, når der alene kigges på forløbet over måleperioden.
- Der er under måleperioden ingen tegn på for høj relativ luftfugtighed. De fleste målinger har dog også været med dagsfrost.
- Variationerne i det termiske indeklima og luftkvaliteten mellem de enkelte lokaler, skyldes vekslende brugeradfærd og manglende styring af indeklimaet. Ikke sagt at der ikke er styring på ventilation og varmeanlæg, men den nuværende løsning er ikke tilstrækkelig, til at kunne opretholde et acceptabelt indeklima uden at der foretages manuel udluftning.
- Der er manglende udluftning, men der er dog også perioder med for langvarige udluftninger.
- Over brugstiden er det gennemsnitlige luftskifte lavere, end det krævede i bygningsreglementet (BR18). I pauser er der til tider meget høje luftskifter, når elever ikke er til stede. I undervisningsperioderne er luftskiftet generelt på mellem 0,5 og 0,6 h⁻¹ og er dermed langt lavere end kravet på 2,5 h⁻¹.
- Udluftning i pauserne er ikke tilstrækkeligt til at holde CO₂-koncentrationen på under 1000 ppm.

6.2 Identificering af variationerne

Herunder fremstår konklusionen på variationerne i temperaturer, relativ luftfugtighed og CO₂-koncentrationen, inden for det enkelte målte lokale.

- Indvendig lufttemperatur er varierende inden for det enkelte lokale, og i det enkelte tidsrum, alt efter hvor man er placeret i lokalet. I vandret plan er det koldest ved yderdøren og tavlen og varmest, langs glaspartier ved radiatoren.
- Over dagen er temperaturen meget vekslende, særligt når der udluftes til det fri.
- I vinterperioden er der køligt om natten og temperaturen stiger gradvist i de første lektioner. I pauser når der udluftes falder temperaturen alt efter årstiden. Temperaturen stiger forholdsvis hurtigt igen når eleverne vender tilbage efter pausen.
- I højden varierer forskellen CO₂-koncentrationen mellem 0 og ca. 100 ppm. Variationerne er størst når der er stilstand i koncentrationen. Her har CO₂-koncentrationen tendens, til at ligge lavere i den nederste halve meter, i forhold til de højere lag. CO₂-koncentrationen har ved udluftninger under nærværende målinger, tendens til at sorterer sig således, at koncentrationen er stigende i op ad gående retning.

- CO₂-koncentrationen falder hurtigt og ensartet med få minutters forskel, i hele lokalets bredde og højde, når der udluftes til det fri.

6.3 Optimering indeklimaet.

- Optimeringen kan opdeles i flere trin. Hvor det første tiltag bør være at kigge en ekstra gang på brugeradfærden, og se på hvor langt man her kan komme. Det kunne være et forholdsvis simpelt tiltag, der ikke bør have den store konsekvens i forhold til anlægsøkonomi. Efterfølgende trin kunne være optimering af installationerne.
- Man kunne forsøge at reducere noget af temperaturforskellen i klasselokalerne, ved at skifte til mere varmeisolerende vinduer og døre.
- Effekten af justerbar udvendig solafskærmning bør undersøges nærmere, med henblik på at sænke varmelastningen fra solen.
- Brugeradfærden i forbindelse med udluftning, skal tilpasses årstiden, evt. også helt ned i årstidernes enkelte vejrtyper.
- Udluftningsperioder i pauserne må ikke være for korte, og ikke for lange.
- Det er vigtigt at varmfordelingsanlægget også levere ens varmfordeling i lokalerne.
- Det mekaniske udsugningsanlæg der opretholder grundluftskiftet, bør undersøges om det kan integreres mere med klasselokalerne.
- At skabe en jævn stabil indetemperatur i brugstiden, er ikke nødvendigvis en fordel, da aktivitetsniveauet hos børnene varierer.
- Der bør under alle omstændigheder fremskaffes en mere kvalificeret energiberegning, der kan synliggøre mulighederne for de mest betydelige energibesparelser og inddrage disse ved en evt. optimering af indeklimaet.
- Med mekanisk balanceret ventilation, kan det kun vurderes, ud for de meget grove estimeringer at have en forbedret energimæssig effekt. Men der bør ses nærmere hen i en behovsstyret løsning, der kan tilpasse sig variationerne i elevernes aktivitetsniveau og årstider.
- Man bør med fordel kunne gå skridtet videre og se på om man kan tilpasse klimaanlægget i forhold til aldersgrupper helt ned på 3 til 4 års interval, hvis det ikke er tiltænkt at aldersgrupperne flyttes rundt på skolen.

7. Litteraturliste

Bergsøe, N. C. & Afshari, A. (2012). *SBI 2012:17 Vejledning om behovsstyret ventilation – Boliger, børneinstitutioner og skoler*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Brandt, E. et al. (2013). SBI-anvisning 224, *Fugt i bygninger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Bygningsreglementet 2018, af (Gældende fra) 01/01/2021, Bolig- og Planstyrelsen.

Clausen, G., Toftum, J., Bekö, G., Dam-Krogh, E. P., Fangel, A. B. & Andersen, K. (2017). *Indeklima i skoler*. Realdania.

Dansk Standard DS 418 7. Udgave, 26/04/2011: *Beregning af bygningers varmetab*

Dansk Standard DS 447 3. Udgave, 07/02/2013: *Ventilation i bygninger – Mekaniske, naturlige og hybride ventilationssystemer*.

Dansk Standard DS 474 E 1. Udgave, 16/05/1995: *Norm for specifikation af termisk indeklima*.

Dansk Standard DS/EN ISO 7730 2. Udgave, 11/01/2006: *Ergonomi inden for termisk miljø – Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termiske komfortkriterier*.

Dansk Standard DS/EN 15251 1. Udgave, 22/06/2007: *Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende inden-dørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency. (2011). *Exposure Factors Handbook: 2011 Edition*. National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-09/052F, Chapter 16—Activity Factors. *Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report) | Risk Assessment Portal | US EPA*

Gunnarsen, L. (forår 2020). Forelæsning om: *Indeklimaets påvirkninger – Kursus i indeklima – Master i Bygningsfysik*.

Gunnarsen, L. (forår 2020). Kompendie: *Inde- og udeklima – Kursus i indeklima – Master i Bygningsfysik*.

Hansen, E. J. D. et al. (2018). SBI-anvisning 272, *Anvisning om Bygningsreglement 2018*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Hvenegaard, C. M., Paulsen, O., Andersen, H., og Jensen, J. B. (2008). *Den Lille Blå*. Dansk Energi.

Jantunen M., Oliveira Fernandes E., Carrer P., Kaphalopoulos S., (2011). *Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ)*. European Commission Directorate General for Health and Consumers. Luxembourg.

Kjeldsen, B. U., Toftum, J., Wargocki, P. & Clausen, G. (2013). *Sammenhæng mellem luftkvalitet i grundskoler og elevers indlæring*. Center for indeklima og Energi, Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Mortensen, L., Kanafani, K., Rose, J., Richter, K. H., Noyé, P., Maagaard, S. E. & Jensen, R. L. (2018). *Branchevejledning for energiberegninger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Rasmussen, T. V. (2018). SBI-anvisning 270, *Måling af radon i bygninger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Rigshospitalet & EDMaRC (2021). *Danske Vækstkurver*. Lokaliseret 09/05 2021: <http://xn--vkstkurver-d6a.dk/index.html>.

Steen-Thøde, M. et al. (1976). *Bygningers varmebalance*. Institut for bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter.

Sundhed.dk (2021). *Vejrtrækning og cirkulation*. Lokaliseret 09/05 2021: <https://www.sundhed.dk/borger/patienthaandbogen/hjerte-og-blodkar/om-hjerte-og-blodaarer/vejrtraekning-og-cirkulation/>

Toftum, J., Wargocki, P. & Clausen, G. (2011). *Indeklima i skoler – Status og konsekvenser*. FOA – Fag og Arbejde.

Valbjørn, O. (1993). *SBI-rapport 230: Indeklimaets påvirkninger. Indeklima i skoler – Status og konsekvenser*. Statens Byggeforskningsinstitut.

Valbjørn, O., Lausten, S., Høwisch, J., Nielsen, O. og Nielsen, P. A. (2000). SBI-anvisning 196, *Indeklimahåndbogen*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Vorre, M. H., Wagner, M. H., Maagaard, S. E., Noyé, P., Lyng, N. L. & Mortensen, L. (2017). *Branchevejledning for indeklimateberegninger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Vorre, M. H., Wagner, M. H., Maagaard, S. E., Noyé, P., Lyng, N. L. & Mortensen, L. (2017). *Bilag 1 – Baggrundsanalyser, - Branchevejledning for indeklimateberegninger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Wittchen, K. B, Johnsen, K., Grau, K. og Rose, J. (rev. 29.01.2015). *Bsim-Brugervejledning version 7.13.10.1 rev. 29.01.2015*. Statens Byggeforskningsinstitut.