

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Energiprestanda och inommiljö i skolbyggnader	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Energy performance and indoor environment quality in school buildings	
Universitet/högskola/företag Chalmers tekniska högskola AB	Avdelning/institution Installationsteknik / Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Adress 412 96 Göteborg	
Namn på projektledare Jan-Olof Dalenbäck	
Namn på ev övriga projektdeltagare Se avsnitt ”Genomförande”	
Nyckelord: 5-7 st Energiprestanda, energianvändning, inommiljö, luftkvalitet, termisk komfort, fältmätningar	

SLUTRAPPORT

Energiprestanda och inommiljö i skolbyggnader

Förord

Tack till Energimyndigheten som finansierade projektet, och till Göteborgs stads fastighetsförvaltning och skolförvaltning för att de möjliggjorde mätningar i ett stort antal skolor.

Göteborg 2024-02-26

Jan-Olof Dalenbäck
Projektledare

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning	5
Genomförande	6
Medverkande	6
Omfattning	7
Energiprestanda	8
Mätningar	8
Innemiljöindex	8
Enkäter.....	9
Resultat	10
Energiprestanda	10
Mätningar	12
Innemiljöindex	15
Enkäter.....	16
Diskussion	18
Slutsatser	19
Mål	19
Energiprestanda	19
Mätningar	19
Innemiljöindex	20
Enkäter.....	20
Publikationslista	21
Bilaga - Elevenkät	22

Sammanfattning

Direktivet om byggnaders energiprestanda (EPBD) och de relaterade kraven i Boverkets Byggregler (BBR), liksom efterföljande energideklarationer, har av flera kritiserats för att de haft ett ensidigt energifokus och inte innehåller information med avseende på inomhusmiljö. Med tiden har det blivit uppenbart att inomhusmiljöns kvalitet kommer att diskuteras i anslutning till revideringar av direktivet.

Boverket hävdar att energideklarationerna ska ”främja effektiv energianvändning, och samtidigt säkerställa god inomhusmiljö.” Främjandet av energianvändningen består i att de ska innehålla förslag på energieffektiviseringsåtgärder, och säkerställandet av god inomhusmiljö består i att de ska innehålla information om ventilationskontroller (OVK) och radonmätningar. Information om OVK och radonmätningar saknas dock ofta och säger i princip inget om inomhusmiljön.

Syftet med det här projektet är att studera samband mellan energiprestanda och inomhusmiljö i skolbyggnader och bygger vidare på ett tidigare projekt som omfattar mätningar och utvärderingar av inomhusmiljöparametrar i skolbyggnader med olika ventilationssystem, med hjälp av ett inomhusmiljöindex och elevenkäter.

Byggnadernas energiprestanda hämtas från energideklarationerna och ställs i relation till uppmätta inomhusmiljöparametrar. De enklast mätbara inomhusmiljöparametrarna är rumstemperatur och rumsluftens koldioxidhalt som är en indikator för luftkvalitet.

I det här projektet har vi visat att det finns samband mellan energiprestanda och byggnadsår, dvs att nya skolbyggnader använder mindre energi än äldre. Det finns också svaga samband mellan energiprestanda och rumstemperatur, men det finns inga relevanta samband mellan energiprestanda och luftkvalitet. Däremot finns det samband mellan ventilationssystem och luftkvalitet.

Resultaten från mätningarna visar att det med relativt få undantag är en bra inomhusmiljö i de studerade skolorna, vilket i princip styrks av beräknade inomhusmiljöindex och resultaten från elevenkäterna.

Med tanke på vilken information som behöver redovisas i framtida energideklarationer för att kunna ”säkerställa god inomhusmiljö” finns det förutsättningar att kunna göra det med begränsade mätningar av inomhusmiljöparametrar. Till exempel visar resultaten att uppmätt luftomsättning är ett bra mått med avseende på luftkvalitet. Däremot är det sannolikt för omständligt att använda ett inomhusmiljöindex, samtidigt som det kan gömma inverkan av relevanta faktorer då det är ett aggregerat värde.

Summary

The energy performance building directive (EPBD) and related requirements in Boverkets* building regulations (BBR), as well as the energy performance certificates (EPC), have been criticised for having a one-sided focus on energy without any information about the indoor environmental quality (IEQ). With time it has been evident that this must be discussed in coming revisions of EPBD.

Boverkets claims that the EPC should "encourage efficient use of energy, and at the same time secure a good IEQ". The encouragements are in the form of proposed energy efficiency measures and that the information about ventilation inspections (OVK) and measurements of radon should secure the IEQ. Information about OVK and radon are often missing and do not give information about IEQ.

The aim of this project is to study relations between energy performance and IEQ in school buildings and builds on a preceding project dealing with measurements and evaluations of IEQ in schools with different ventilation systems, with the help of an Indoor Environmental Index (IEI) and student surveys.

The energy performance, based on the EPS's carried out for the investigated buildings, is put in relation to measured IEQ parameters. The simplest measurable IEQ parameters are temperature and the carbon dioxide level - an indicator of air quality (IAQ) - in the classrooms.

In this project we have shown that the energy performance is related to year of construction, i.e. new schools use less energy than older schools. There are also weak relations between energy performance and indoor temperature, but there are no relevant relations between energy performance and IAQ. We have on the other hand found relations between ventilation system and IAQ.

The results from the measurements, with only few exceptions, show that the IEQ is good in the studied schools, which is supported by the calculated IEI and the student surveys.

Regarding which information that should be included in future EPC to "secure a good IEQ", there are good possibilities to manage this with not too many IEQ-parameters. For example, the result show that measured air change rate is a good indicator related to IAQ. However, the use of the IEI is likely too demanding and can hide important parameters as it results in an aggregated value.

*Boverkets – The Swedish National Board of Housing, Building and Planning

Inledning

Bakgrund

Direktivet om byggnaders energiprestanda (EPBD) och de relaterade kraven i Boverkets Byggregler (BBR), liksom efterföljande energideklarationer, har av flera kritiserats för att de haft ett ensidigt energifokus och inte innehåller information med avseende på inomhusmiljö. Med tiden har det blivit uppenbart att det förr eller senare kommer att diskuteras i anslutning till revideringar av direktivet.

Den följande texten går att läsa på Boverkets hemsida.

”EU styr en del av energiarbetet genom sitt direktiv 2010/31/EU om byggnaders energiprestanda. Alla medlemsländer måste införliva direktivets bestämmelser i egna nationella författningar, och på det sättet säkerställa att de uppnår de mål som direktivet ställt upp. Till följd av direktivet införde Sverige den 1 oktober 2006 energideklarationer. Bestämmelserna om dem finns i lagen (2006:985) om energideklarationer för byggnader, samt i förordningen (2006:1592) om energideklarationer för byggnader.

Syftet med energideklarationerna är att främja effektiv energianvändning och samtidigt säkerställa gott inomhusklimat i byggnader. I september 2007 upprättades den första energideklarationen. Sedan dess har arbetet med att främja effektiv energianvändning, och samtidigt säkerställa god inomhusmiljö, fortsatt kontinuerligt, och antalet energideklarerade byggnader ökar ständigt. Genom att göra en energideklaration får byggnadsägaren en god överblick över byggnadens energistatus och inomhusmiljö, samt de möjligheter som finns för att minska mängden använd energi utan att sänka kvaliteten på inomhusmiljön för den som använder byggnaden.

På frågan om vad Boverket syftar på när de skriver att syftet med en energideklaration är att säkerställa en god inomhusmiljö, mm. hänvisar det till att det ska finnas uppgifter om det har gjorts radonmätningar och OVK (obligatorisk ventilationskontroll) och en uppgift om projekterat luftflöde i energideklarationerna. För det första säger det egentligen inte byggnadsägaren någonting om inomhusmiljön (t.ex. luftkvalitet eller termisk komfort) och för det andra saknas dessa uppgifter i många energideklarationer.

En bidragande skillnad mellan energiprestanda och inneklimat är att det länge funnits etablerade begrepp (index) med koppling till energi, till exempel energianvändning i formen kilowattimmar per byggnadsarea, medan det saknas ett liknande ”enkelt” begrepp (index) med avseende på inneklimat.

Med det här som bakgrund hade vi initierat ett forskningsprojekt, för att utvärdera möjligheterna att använda ett index (Indoor Environmental Index – IEI) för inneklimat. I projektet ”Vägar till bättre inomhusmiljö i svenska skolor” (finansierat av Formas; Nr 2017-01015), var avsikten att genomföra mätningar och elevenkäter i 60 klassrum i

grundskolor i Göteborg, och beräkna IEI, i samarbete med forskare på Danmarks Tekniska Universitet (DTU).

Det rubricerade projektet ”Energiprestanda och inomhusmiljö i skolbyggnader” var då tänkt att bygga vidare på Formasprojektet och utvärdera möjligheterna att hitta samband mellan energiprestanda och inomhusmiljöparametrar, inklusive det IEI-index som skulle prövas inom Formasprojektet.

Mål

Projektets övergripande mål var att ta fram ny kunskap om relationen mellan energiprestanda och inomhusmiljö i skolbyggnader.

Mer specifika mål för projektet innefattade:

- Utvecklat och tillämpat metodik för ett inomhusmiljöindex (IEI) innefattande inomhusluftkvalitet (IAQ) och termisk komfort (TC) i skolor.
- Identifierat relationer mellan parametrar för energiprestanda och inomhusmiljöindex med hjälp av empiriska data.
- Identifierat skolor med bästa energiprestanda och inomhusmiljö baserad på deras byggnads- och installationstekniska lösningar tillsammans med andra faktorer som kan identifieras inom projektet.
- Databas - Börjat bygga upp en databas med energiprestanda och inomhusmiljöindex för skolor.

Genomförande

Medverkande

Projektet genomfördes som ett forskningsprojekt vid avdelningen för Installationsteknik på Chalmers tekniska högskola.

Från avd. för **Installationsteknik** har följande personer medverkat:

- Jan-Olof Dalenbäck, *Professor, projektledare och handledare,*
- Despoina Teli, *Docent, huvudhandledare,*
- Lars Ekberg, *Adj./bitr. professor, handledare,*
- Sarka Langer, *Adj. professor, handledare,*
- Theofanis Psomas, *PhD, Post doc,*
- Blanka Cabovska, *MSc, doktorand.*

Övriga medverkande, främst relaterad till Formasprojektet:

- Pavel Wargocki, *Professor, Danmarks tekniska universitet (DTU),*
- Gabriel Bekö, *Docent, DTU,*
- Natalia Giraldo Vasquez, *PhD, Post doc, DTU*

Omfattning

Projektet var tänkt att karakterisera inomhusmiljö genom ett inomhusmiljöindex som binder samman halter av luftföroreningar relevanta för skolmiljöer och den termiska komforten. Skolbarnens upplevelse av luftkvalitet och termisk komfort var tänkt att undersökas genom riktade enkäter. Skolornas byggnadstekniska lösningar, energiprestanda, mätta inomhusklimatparametrar, beräknade inomhusmiljöindex, och svar från enkäter var tänkt att behandlas med statistiska metoder.

Projektet var tänkt baseras på mätningar i skolor med typiska ventilationssystem i nämnda Formasprojekt, kompletterat med motsvarande mätningar i detta projekt, och dokumenterad energiprestanda för de aktuella skolorna från Boverkets databas för energideklarationer.

Projektet var tänkt att genomföras i fyra faser:

1. Intervjuer med skolmyndigheterna i Göteborg (LF) och Stockholm (SISAB) och urval av lämpliga skolbyggnader för mätningar och undersökningar, planering för mätningar.
2. Mätningar/enkätundersökningar under en varm och en kall period av året, utvärdering av IEQ och termisk komfort (TC).
3. Statistiska beräkningar av samband mellan energianvändning och indexet.
4. Sammanställning och diskussion av resultat från projektet; skrivning av en rapport och vetenskapliga artiklar.

Mätningarna i skolor i Göteborg och Stockholm (1 och 2) var tänkta att komplettera de mätningar som genomfördes inom nämnda Formasprojekt. Då vi började med att få grepp om energianvändning och energideklarationer för de första skolorna var det en pandemi som kom i vägen. Därför kunde vi inte genomföra mätningar i så många skolor vi planerat och fokuserade i stället på att utvärdera och beräkna index (3 och 4) baserat på de mätningar vi hade hunnit göra innan pandemin.

Utvalda skolor

Utgångsläget för utvärdering är den kategorisering av skolor som gjorts inom Formasprojektet. Skolbyggnaderna var utvalda i samarbete med Göteborgs stads fastighetsförvaltning. De primära urvalskriterierna var ventilationssystem och byggnadernas ålder, samtidigt som skolorna skulle vara representativa.

De utvalda skolbyggnaderna grupperades i tre kategorier A, B och C beroende på ventilationssystem. A omfattade självdrag och frånluft, med och utan automatisk fönsteröppning. Gemensamt för de här systemen är att uteluft tillförs obehandlad. B omfattade system med balanserad från- och tilluft med konstant luftflöde. C omfattade system med balanserad från- och tilluft med behovsstyrda luftflöde. Kategori B och C har typiskt filter på tilluften motsvarande klass F7 enligt tidigare filterstandard och värmeväxlare för värmeåtervinning (FTX).

Mätningarna genomfördes i två klassrum i alla skolor utom en. Sammantaget ingick 45 klassrum i 23 skolbyggnader med en jämn fördelning av ventilations-system. Majoriteten av klassrummen hade elever i 5:e klass (11-12 år) för att möjliggöra jämförbara resultat från enkäterna.

Energiprestanda

Till skillnad från övriga länder är byggnadernas energiprestanda baserade på verklig energianvändning i våra energideklarationer, medan övriga länder beräknar byggnadernas energiprestanda. Byggnadernas energideklarationer hämtades från Boverkets databas för energideklarationer (Gripen) i början av projektet, det vill säga hösten 2019. De användes inledningsvis för att jämföra energiprestanda och inomhusmiljöparametrar och i de aktuella skolorna i Göteborg.

Boverkets databas för energideklarationer användes återigen våren 2023 som underlag för ett konferensbidrag där energiprestanda för alla svenska skolor utvärderades med fokus på typ av ventilationssystem. Databasen är uppbyggd så att när en fastighetsägare har gjort en ny energideklaration för en viss fastighet ersätter den nya den föregående energideklarationen i databasen. Det innebär att en del energideklarationer från 2019 innehåller ett nytt viktat energital, men här används genomgående byggnadens energiprestanda.

Mätningar

Mätningarna omfattade rumstemperatur, relativ fuktighet (RF), CO₂, NO₂, ozon, TVOC, C₁ – C₁₀ aldehyder (formaldehyd till dekanal) och partiklar (PM₁₀ och PM_{2.5}). Timvärden för olika utomhusparametrar som temperatur, RF, och NO₂, ozon, PM₁₀ och PM_{2.5} hämtades från en central mätstation i Göteborg. När det gäller CO₂ antog vi att utomhusnivån låg runt 400 ppm.

Luftomsättningen i klassrummen bestämdes utgående från hur CO₂ avklingade när eleverna hade lämnat klassrummet. Luftomsättningen är medelvärdet av fem mätningar i varje klassrum, typiskt från olika dagar. Luftflödet i varje klassrum har sedan beräknats utgående från luftomsättningen och rumsvolymen.

Mätningarna genomfördes under en skolvecka under uppvärmningssäsongerna 2019/20. De började efter att mätutrustningen installerats på måndag morgon innan eleverna kom och avslutades på fredag eftermiddag när eleverna avslutat skoldagen och mätutrustningen plockades ner. Vilken typ av mätutrustning som användes och deras mätnoggrannheter, liksom de olika statistiska metoderna som användes i utvärderingen, beskrivs i detalj i den första vetenskapliga artikel i Building and Environment [3].

Innemiljöindex

Indexet (Indoor Environment Index – IEI) består av ett aritmetiskt medelvärde av ett index för termisk komfort (Indoor Discomfort Index - IDI) och ett index för luftkvalitet

(Indoor Air Pollution Index - IAPI). Indexet är beskrivet mer i detalj i en bilaga till tidigare nämnd vetenskaplig artikel i Building and Environment [3].

IDI beräknas med hjälp av uppmätt temperatur och luftfuktighet i förhållande till lämpliga intervall för den aktuell tillämpningen. IAPI beräknas med hjälp av uppmätta värden för ett antal parametrar (luftföroreningar) ställda i relation till rekommenderade hälsobaserade gränsvärden.

Då mätningarna i de olika klassrummen omfattar samma parametrar går det att använda IEI för att jämföra de olika klassrummen, och inom respektive ventilationskategori (A, B och C). Däremot kan man inte jämföra det index vi beräknat med samma index som beräknats utgående från andra mätningar där man använt andra intervall (temperatur, luftfuktighet) eller andra luftföroreningar och/eller gränsvärden.

Enkäter

Elevenkäten bygger på de frågor man ställer i typiska inneklimatenkäter för vuxna, men är speciellt utformade för att passa mellanstadieelever. Det innebär att frågorna är kompletterade med bilder som förenklar för eleverna att svara på ett bra sätt. Till exempel när det gäller termisk komfort behöver de beskriva vilka kläder de har på sig och då finns det bilder på de olika klädesplaggen som de kan kryssa för. Och när de ska beskriva något positivt eller negativt använder vi smileys.

Enkäten finns som en **Bilaga** till den här rapporten.

Resultat

Resultaten från projektet har publicerats i fyra konferensbidrag [1, 2, 5, 7], två vetenskapliga artiklar [3, 4] och en populärvetenskaplig artikel i Energi & Miljö som sammanfattar de viktigaste mätresultaten [6]. Här följer en sammanfattning av resultaten.

Energiprestanda

Det följande är en sammanfattning av ett konferensbidrag till Cold Climate HVAC 2021 [1]. De skolor som ingår i projektet skulle vara representativa för skolor i Göteborg.

Figur 1 visar den stora spridningen i såväl byggnadsår som energiprestanda för såväl de studerade skolorna som alla skolor i Göteborg.

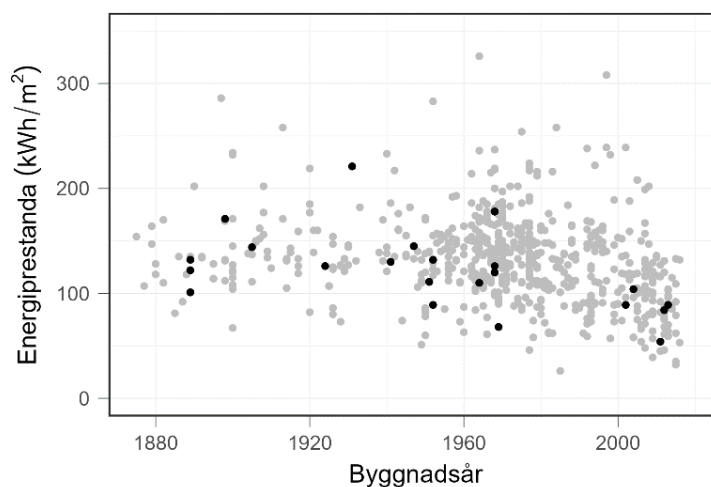
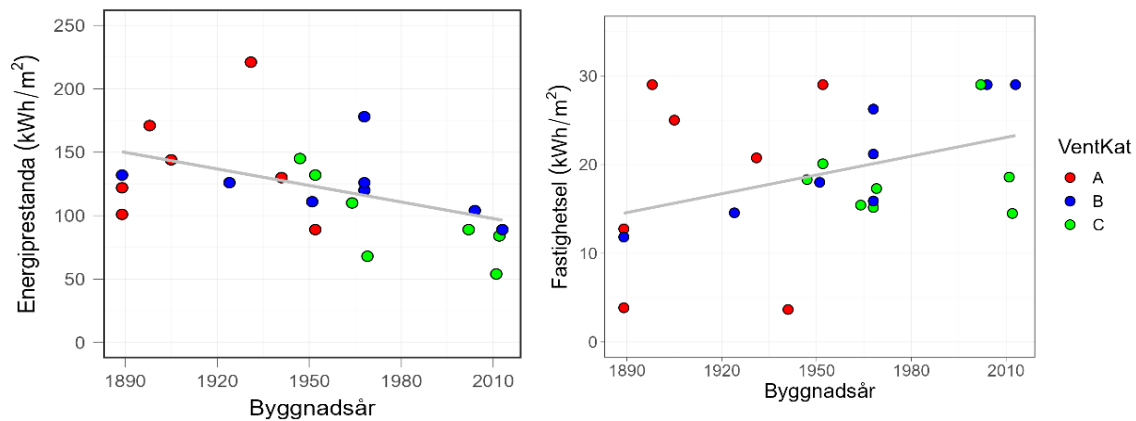


Figure 1. Energiprestanda som funktion av byggnadsår för skolor i Göteborg

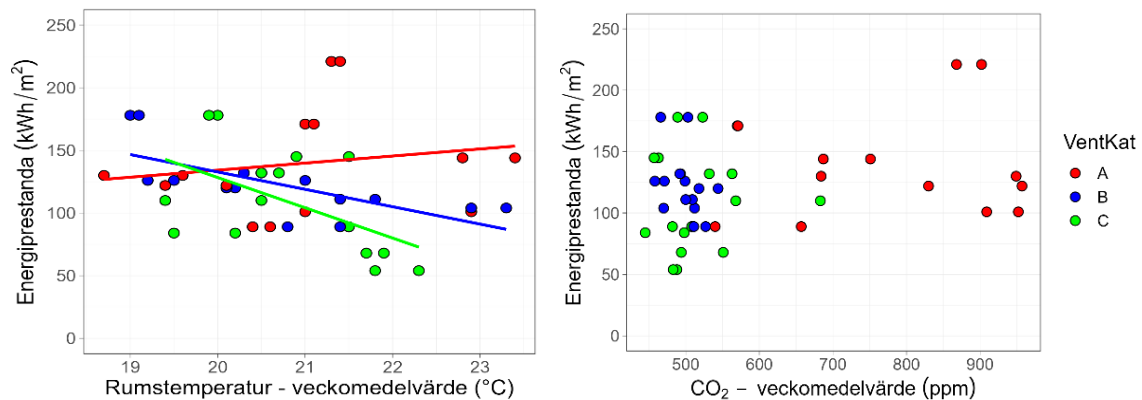
De energiprestanda som redovisas i energideklarationerna ska omfatta värme för uppvärmning (normalår) och varmvatten, och fastighetsel (t.ex. för ventilation), men inte verksamhetsel (t.ex. rumsspecifik elanvändning i apparater och belysning). När det gäller värmeanvändningen är den förhållandevis entydig att deklarerat, däremot kan fastighetsel vara uppskattad (fördelad) om det inte finns separata elmätare.

Värmeanvändningen beror i huvudsak på byggnadskonstruktionen (byggnadsår), medan fastighetselen i huvudsak beror på vilken typ av ventilation som används i byggnaden. **Figur 2** visar energiprestanda respektive fastighetsel som funktion av byggnadsår. Det vi ser är att spridningen är stor men att energiprestanda tenderar att förbättras, medan fastighetsel tenderar att öka, med byggnadsår.

De vanligaste begreppen som används för inneklimat i förhållande till energiprestanda är termisk komfort och luftkvalitet. Termisk komfort beror i huvudsak på rumstemperaturen, medan luftkvaliteten beror på flera parametrar, som ofta är proportionella mot koldioxidhalten i rumsluft där det finns många personer, som t.ex. i skolor. Därför används koldioxid som en indikator för luftkvalitet.



Figur 2. Energiprestanda och fastighetsel som funktion av byggnadsår



Figur 3. Energiprestanda som funktion av rumstemperatur och koldioxidhalt under mätperioden

Figur 3 visar energiprestanda som funktion av mätt rumstemperatur respektive koldioxidhalt i klassrummen. Det vi ser är att det både finns och saknas samband mellan energiprestanda och ventilationssystem. Kategori B och C tenderar att ha bättre energiprestanda vid högre rumstemperaturer, sannolikt för att de finns i nyare byggnader. Kategori A uppvisar höga, medan Kategori B och C uppvisar låga, koldioxidhalter oberoende av energiprestanda.

Som antyds ovan har typen av ventilationssystem en betydelse för såväl energiprestanda som luftkvalitet, vilket i det senare fallet förstärks i den följande sammanfattningen av mätningarna. Mot slutet av projektet tog vi därför ett större grepp om kopplingen mellan energiprestanda och olika ventilationssystem i ett bidrag till SBE23-konferensen i Tessaloniki [5].

Baserat på databasen för energideklARATIONER fanns det hösten 2019 fler än 8 000 grundskolor i Sverige, där **Tabell 1** redovisar data för de knappt 7 000 som har en typ av ventilationssystem, medan övriga skolor har flera system. Den visar att den stora majoriteten har balanserad från- och tilluftssystem med värmeåtervinning (FTX), det vill säga Kategori B eller C. Det är här värt att notera att det omvända gäller skolor inom EU, där majoriteten har naturlig ventilation (det vi kallar självdrag).

Tabell 1. Översikt av energiprestanda, fastighetsel och byggnadsår i svenska skolbyggnader med olika ventilationssystem.

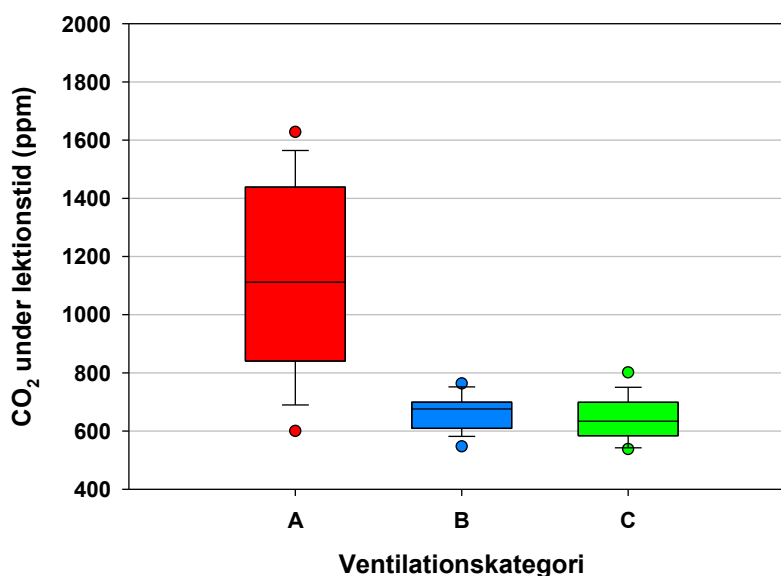
System	Antal byggnader	Atemp	Energi- prest.	Fastig- hetsel		Bygg- nadsår Median	
		Median [m ²]	Median [kWh/m ²]	IQR [kWh/m ²]	Median [kWh/m ²]		IQR [kWh/m ²]
S	133	309	157	85	8	15	1940
FT	279	411	167	80	15	12	1963
F	339	732	185	72	20	15	1968
FTX	6 083	783	147	65	21	13	1973

*IQR är kvartilavståndet (skillnaden mellan 25:e och 75:e percentilen av data)

Byggnaderna med balanserade från- och tilluftssystem och värmeåtervinning (FTX) är nyare och har bäst (lägst) energiprestanda, men högst användning av fastighetsel, vilket också gäller för de studerade skolorna i Göteborg.

Mätningar

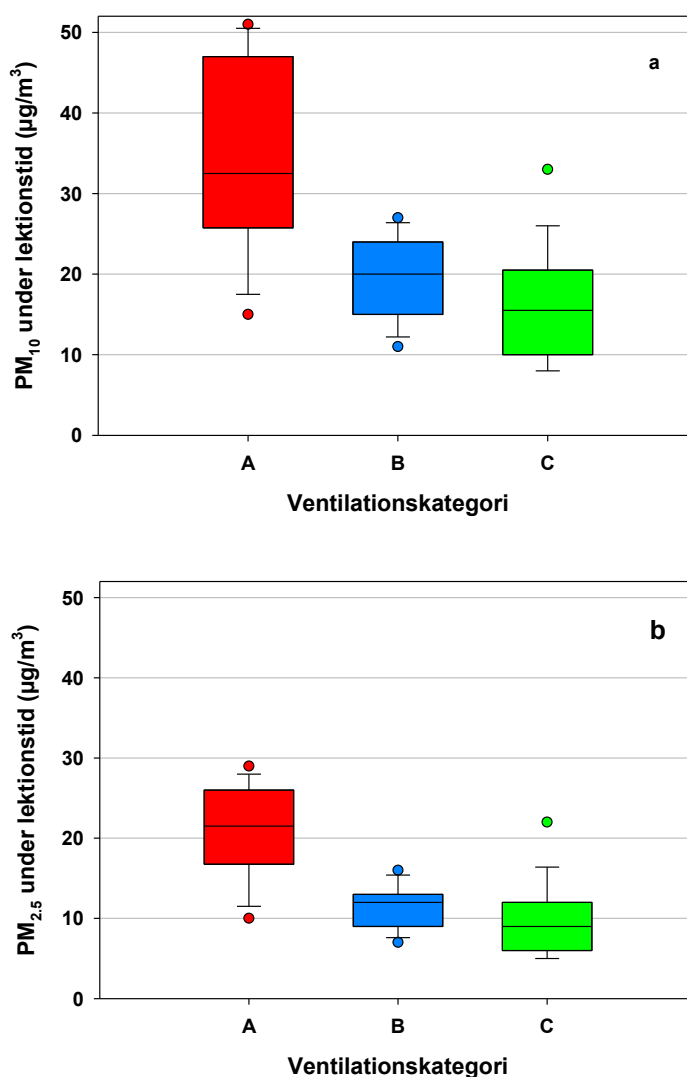
Resultaten från mätningarna i klassrummen presenteras i detalj i den första vetenskapliga artikeln i Building and Environment [3] och i artikeln i Energi & Miljö [6]. Här sammanfattas de viktigaste resultaten med avseende på koldioxidhalt, partiklar och luftflöde i de olika klassrummen.



Figur 4. Koldioxidhalt i klassrum under lektionstid

Medianvärdet för koldioxid (CO₂) för alla klassrummen var lägre än rekommenderade 1000 ppm, och lägre än som rapporteras i flera utländska studier. I den här studien är klassrummen i genomsnitt väl ventilerade med en luftomsättning á 3,2 h⁻¹, vilket är mycket högre än i merparten europeiska skolor.

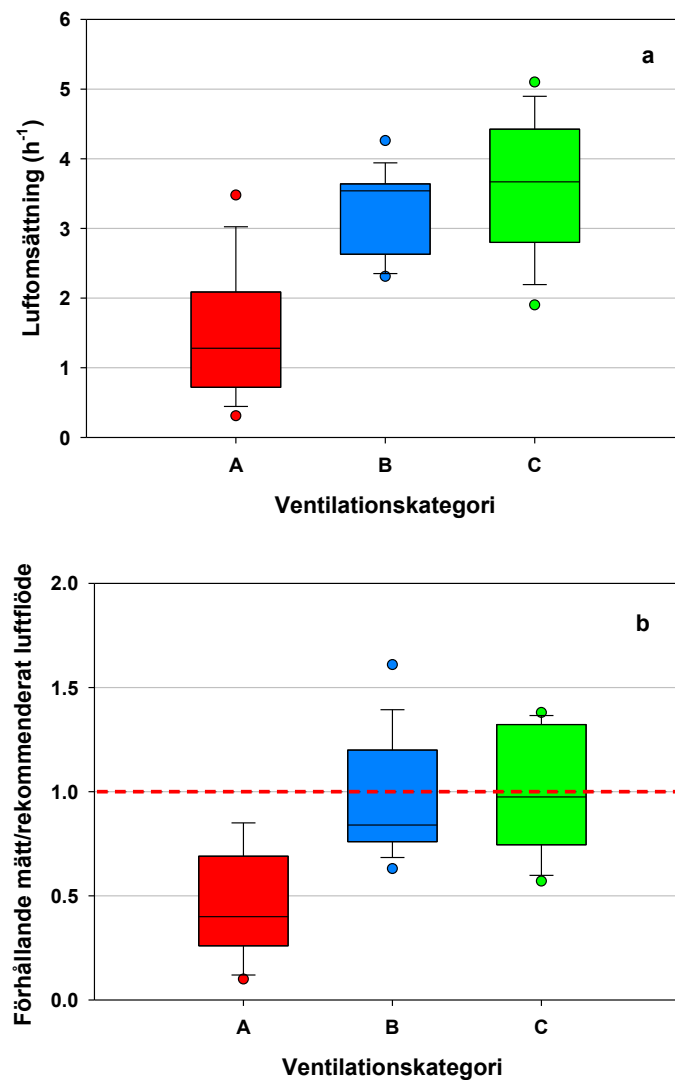
Koldioxid (CO₂) mätt i individuella klassrum (medelvärde under lektionstid) presenteras i **Figur 4**. Medianvärdet 1100 ppm i klassrum i kategori A var mycket högre än i klassrum i B och C. Dessutom mättes stora variationer i klassrum i kategori A; 64% av dem hade ett medelvärde under lektionstid över 1000 ppm. I klassrum i kategori B och C var variationen mycket liten och som mest under 800 ppm. Statistiskt sett är det ingen skillnad mellan kategori B och C.



Figur 5. Medelvärde under lektionstid i klassrummen a) PM₁₀ och b) PM_{2.5}.

Medianvärdena för PM_{10} i alla klassrummen ligger under, medan medianvärden för $PM_{2.5}$, ligger nära rekommenderade värden från WHO. **Figur 5** visar PM_{10} och $PM_{2.5}$ under lektionstid för de olika kategorierna. Nivåerna är väsentligt högre i kategori A än i B och C, vilket kan förklaras med de lägre luftflödena i A, och därmed mindre utspädning av partiklar, som liksom CO_2 , genereras av eleverna i klassrummen. Det kan till del också förklaras av avsaknaden av filter i A som minskar partiklar som kommer utifrån.

I anslutning visas luftomsättningen i klassrum med olika ventilationssystem, liksom förhållandet mellan uppmätt luftflöde (l/s) i klassrummen och det luftflöde som rekommenderas av Folkhälsomyndigheten, i **Figur 6**.



Figur 6. a) Mätt luftomsättning (h^{-1}); b) förhållande mellan mätt och rekommenderat luftflöde

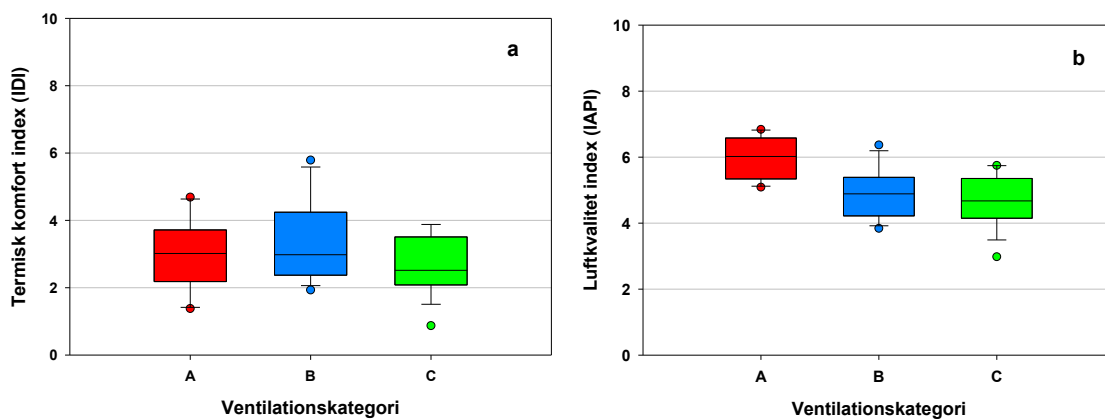
Figur 6 visar att luftomsättningarna i kategori A skiljer sig väsentligt från de i B och C. Dessutom visar de att luftflödena var lägre än rekommenderat i alla klassrummen i kategori A, och i 50% av klassrummen i både B och C. Rekommenderat

luftflöde är 0,35 l/s per m² golvarea + 7 l/s per person (elev). Medianvärdet för beräknade luftflöden per person är 3,0 l/s per person i kategori A, medan det är 6,6 l/s per person i B och 7,7 l/s per person i C.

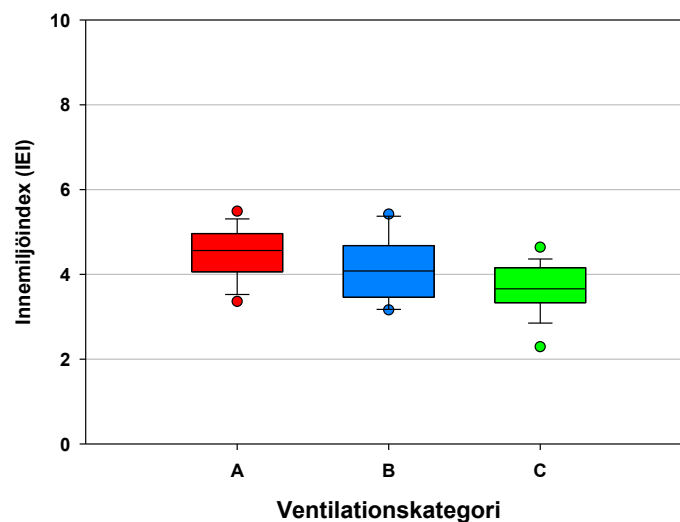
Vi har dessutom utvärderat skolorna i kategori A - omfattade klassrum med självdrag och frånluft, med och utan automatisk fönsteröppning - lite närmare, och publicerat resultaten i ett konferensbidrag till Roomvent 2024 [7].

Innemiljöindex

Resultaten från beräkningarna av innemiljöindexet (IEI) finns i konferensbidraget till Indoor Air 2022 [2] och i ovan nämnda vetenskapliga artikel i tidskriften Building and Environment [3] där de presenteras mer i detalj tillsammans med mätningarna.



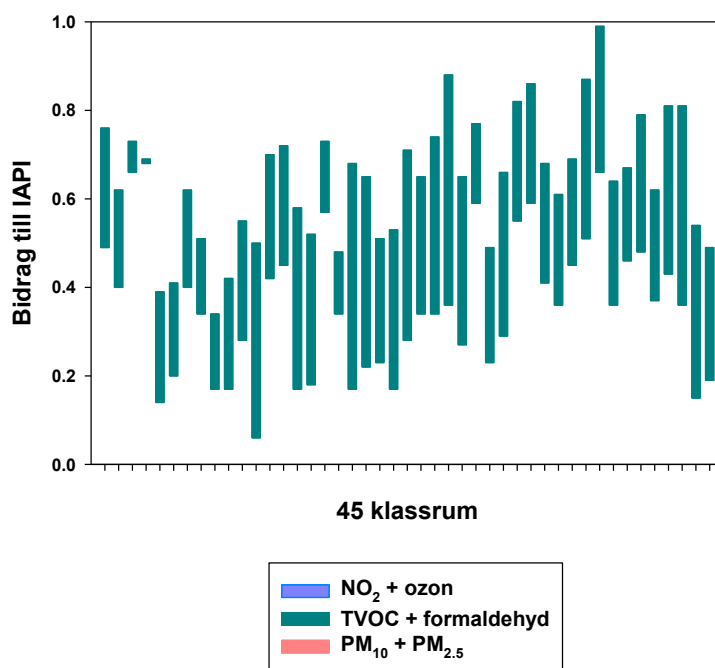
Figur 7. Delindex a) Termisk komfort (IDI); b) Luftkvalitet (IAP) baserat på WHO's riktlinjer från 2005



Figur 8. Innemiljöindex (IEI) sammanvägt utgående från delindexen

Här visas först resultatet från beräkning av delindexen avseende termisk komfort och luftkvalitet som sammanvägs till ett inomhusmiljöindex. Ett lågt index visar på bra, och ett högt index visar på sämre, inomhusmiljö.

Figur 7 visar att den termiska komforten är nära likvärdig för de olika ventilationskategorierna, medan det är en statistisk skillnad med avseende på luftkvalitet mellan kategori A, respektive B och C. Då de två delindexen vägs samman till ett inomhusmiljöindex i **Figur 8** blir det i stället en liten skillnad mellan alla tre kategorierna, där skillnaden mellan A och C är signifikant. Här kan det vara värt att notera att WHO publicerade nya riktlinjer 2021 efter att vi genomfört mätningarna. Med de som underlag blir IAPI och IEI marginellt högre.



Figur 9. Bidrag från olika luftkvalitetsparametrar i delindexet för luftkvalitet (IAPI).

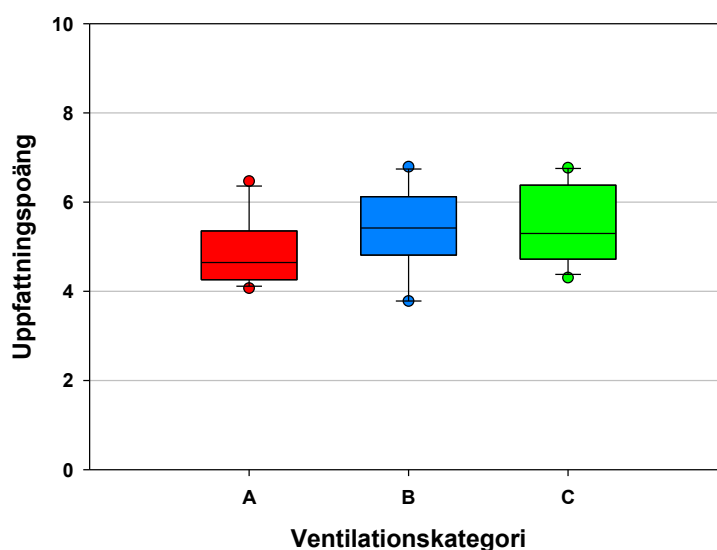
I det här sammanhanget kan det vara intressant att studera vad som påverkar delindexet för luftkvalitet (IAPI) och hur det skiljer mellan olika klassrum. **Figur 9** ovan visar det procentuella bidragen i de olika klassrummen från kvävedioxid (NO₂) och ozon, som kommer utifrån och ökar IAPI i kategori B och C (högre luftomsättning); totala mängden flyktiga organiska ämnen (TVOC) och formaldehyd, som främst finns inomhus; samt partiklar, som främst genereras inomhus och ökar IAPI i kategori A (lägre luftomsättning), men också kommer utifrån.

Enkäter

Resultaten bygger på svar från cirka 900 elever. Resultaten från utvärderingen av enkäterna presenteras i detalj i den andra vetenskapliga artikeln i tidskriften *Building and Environment* [4]. Dessutom innehåller konferensbidraget till Indoor Air 2022 [2] en jämförelse mellan inomhusmiljöindexet (IEI) och ett värde som konstruerats utgående från enkäterna.

Det konstruerade värdet är baserat på svaren på de tio frågorna under 10 och 11 i enkäten (se **Bilaga**) som handlar om elevernas uppfattning om hur de upplever inneklimatet. Varje svar får 1 eller 0 beroende på om det är positivt eller negativt, och resulterar i ett värde mellan 10 och 0.

Resultatet redovisas i **Figur 10** som då kan jämföras med **Figur 8** som visar inomhusindexet som beräknats utgående från mätningarna. Men det värde som är baserat på enkätsvaren har en omvänd innebörd jämfört med indexet, det vill säga att ett lågt värde är negativt och ett högt värde är positivt.



Figur 10. Sammanställning av svaren i elevenkäterna.

Sammanfattningsvis visar inomhusindexet och enkätsvaren samma tendens. Inomhusindexet ger att Kategori A får ett högre värde och värderas som sämre än C, medan enkätsvaren visar att A får ett lägre enkätvärde och värderas som sämre än B och C.

Diskussion

Det genomförda projektet har haft som syfte att utveckla underlag för att kunna redovisa relevanta inomhusmiljöparametrar i framtida reviderade energideklarationer. Vi kan nu konstatera att den sedan länge pågående revideringen av direktivet om byggnaders energiprestanda (Article 11a Indoor environmental quality nedan) kommer att omfatta krav på inomhusklimat.

Det finns kopplingar mellan energiprestanda och byggnadsår och ventilationssystem, men det finns egentligen inga direkta kopplingar mellan energiprestanda och inomhusmiljöparametrar. Därför krävs mätning och ändamålsenlig redovisning av de mest relevanta inomhusmiljöparametrarna, vilket föreslås i direktivet.

De genomförda mätningarna ger en representativ bild av inomhusmiljön i de olika klassrummen, men mätningar av luftföroreningar (speciellt olika gaser) är relativt kostsamma. Därför bör det räcka att mäta utvalda luftföroreningar i de fall de förväntas vara betydande i den aktuella byggnaden, exempelvis NO₂ i byggnader nära trafikerade gator.

Koldioxid är enkelt att mäta och den ger en indikation om människors inverkan på luftkvaliteten. Den gör det också möjligt att beräkna luftomsättningen, och aktuellt luftflöde, som kan ställas mot rekommenderat luftflöde i det aktuella rummet. Den nuvarande utformningen av OVK (obligatorisk ventilationskontroll) ger inte tillräckligt underlag då den fokuserar på ventilationssystemen, och inte på aktuella förhållande i de utrymmena där människor vistas under längre tid.

Vi hade en ambition att jämföra lika många klassrum per ventilationskategori. I sammanhanget är det viktigt att ha med sig att >90% av svenska grundskolor har ventilationssystem i kategori B och C, och väldigt få i A, medan >80% av skolor inom EU kan antas ha ventilationssystem i kategori A. Och även om vi genomförde förhållandevis omfattande mätningar i runt 15 klassrum för varje kategori behövs det fler mätningar i fler skolor och under fler perioder för att dra mer långtgående slutsatser.

Klassrum med självdrag eller frånluft resulterar i högre partikelhalter för att det saknas filter och att de typiskt ger lägre luftflöden. En viktig anledning till de lägre luftflödena är att klassrummen blir kylda av uteluften när utetemperaturen är låg. Därför behöver luftflödena hållas låga för att undvika låg rumstemperatur och drag och fönstren är stängda mer än som motiveras av luftkvaliteten.

Våra mätningar visade ingen avgörande skillnad i luftkvalitet mellan enklare till- och frånluftssystem med konstant luftflöde och motsvarande system med behovsstyrt (variabelt) luftflöde. Det är vad man kan förvänta sig då behovsstyrning främst installeras för att minska energibehoven för fläktel och värmning av tilluften, inte för att få bättre luftkvalitet. Huruvida de verkligen ger lägre energibehov har inte utvärderats i det här projektet.

Slutsatser

Mål

När det gäller projektets övergripande mål att ta fram ny kunskap om relationen mellan energiprestanda och inomhusmiljö i skolbyggnader är det nog så att vi snarare bekräftat befintlig kunskap om relationen mellan energiprestanda och inomhusmiljö.

Med avseende på de mer specifika målen har vi som tänkt utvecklat och tillämpat metodik för ett inomhusmiljöindex (IEI) innefattande termisk komfort (TC) och inomhusluftkvalitet (IAQ) i skolor.

När det gäller energiprestanda så är de mer relaterade till byggnadsår och ventilations-system än några specifika inomhusmiljöparametrar. Det innebär att nya skolbyggnader med balanserade från- och tilluftssystem med värmeåtervinning har bäst förutsättningar att er hålla bäst energiprestanda och inomhusmiljö.

De mätningar som genomförts har, tillsammans med beräkning av inomhusmiljöindex och elevenkäter, gett ett bra utgångsläge för att genomföra fler liknande studier för att kunna dra mer långtgående slutsatser om inomhusmiljö i skolor.

Energiprestanda

De nuvarande energideklarationerna är främst utformade för att redovisa en byggnads "energiprestanda" enligt Boverkets Byggregler (baserade på EPBD). Som nämnts tidigare innehåller de ingen relevant information kopplat till inomhusmiljö. De innehåller till exempel inte heller några uppgifter om byggnadskonstruktionen, vilket begränsar möjligheterna att göra detaljerade beräkningar för att utvärdera olika lämpliga sätt att minska energianvändningen.

Mätningar

De tre ventilationskategorierna fungerade lika bra med avseende på termisk komfort och generellt sett hade flertalet studerade klassrum acceptabel luftkvalitet oavsett ventilationssystem, vilket bekräftas av elevenkäterna. Men koncentrationen av NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} överskred i många fall WHO's senaste riktlinjer. Alla klassrum i kategori A och cirka hälften av klassrummen i kategori B och C uppfyllde inte rekommenderade luftflöden.

Resultaten visar att luftomsättningen är ett bra mått med avseende på luftkvalitet. Högre luftomsättning ger lägre CO₂, lägre partikelhalter och lägre halter av föroreningar som formaldehyd. Klassrum med självdrag eller frånluft hade väsentligt lägre luftomsättning och högre halter av partiklar (PM₁₀ och PM_{2.5}) och formaldehyd, än klassrum med balanserad till- och frånluft med filter (och värmeåtervinning).

Till- och frånluftssystem med variabla luftflöden var inte signifikant bättre eller sämre med avseende på luftkvalitet än till- och frånluftssystem med konstanta luftflöden.

Innemiljöindex

Det applicerade innemiljöindexet gör det möjligt att jämföra innemiljön i olika klassrum, speciellt om man har ett omfattande mätunderlag, men har nackdelar. De gömmer underliggande värden, de kräver relativt kostsamma mätningar avseende luftföroreningar och de kräver definierade parametrar (ämnen, referensvärden). Innemiljöindexet påverkas av vilka parametrar/ämnen och referensvärden man väljer att utgå från. Det går därför inte att jämföra olika undersökningar som använt delvis olika definitioner av innemiljöindexet. Dessutom kan inverkan av en enskild parameter som uppvisar avvikande värden dämpas eller i sämsta fall döljas helt.

Enkäter

Det fungerade bra att genomföra enkäter med mellanstadieelever. Resultatet visar att eleverna inte upplever någon avgörande skillnad med avseende på innemiljö med de olika ventilationskategorierna. Noterbart att det beräknade miljöindexet gav motsvarande resultat.

Publikationslista

- [1] Cabovska, B. et al (2021). **A study on the relationship between energy performance and IEQ parameters in school buildings**. Presented online. Cold Climate HVAC 2021. Publicerad E3S Web of Conferences, Vol. 246 art. no 01006. <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/22/contents/contents.html>
- [2] Cabovska, B. et al (2022) **Measured and perceived IEQ under different ventilation strategies in Swedish classrooms**. Indoor Air 2022, Kupio, Finland. Publicerad i Proceedings of Indoor Air 2022, 17th International Conference on Indoor Air Quality and Climate.
- [3] Cabovska, B. et al (2022). **Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms**. Building and Environment 2022.
- [4] Giraldo Vasquez, N. et al. (2023). **Ventilation strategies and children's perception of the indoor environment in Swedish primary school classrooms**. Building and Environment 2023.
- [5] Cabovska, B. et al (2023). **Analysis of Swedish school buildings' energy performance certificates with focus on ventilation systems**. SBE23 conference in Tessaloniki 2023. Publicerad i Proceedings in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/1196/1>
- [6] Cabovska, B. et al (2024). **Luftkvalitet i svenska grundskolor**. Populärvetenskaplig artikel inskickad för publicering i tidskriften Energi & Miljö.
- [7] Cabovska, B. et al (2024). **CO₂, temperature and RH in Swedish primary school classrooms with and without automatic window operation**. Konferensbidrag inskickat till Roomvent 2024. 23-25 april, Stockholm.

Bilaga - Elevenkät



1



1. Jag är:

flicka

pojke

2. Jag är _____ år

3. Jag har astma eller hösnuva

Jag har inga sådana besvär

4. I dag känner jag mig:

Frisk

Dålig (förkyld, snuvig, hostar)

5. I dag har jag sådana här kläder på mig:

huvtröja  <input type="checkbox"/>	T-tröja  <input type="checkbox"/>	långärmad klänning  <input type="checkbox"/>	tunna strumpbyxor/leggings  <input type="checkbox"/>
kofta  <input type="checkbox"/>	linne  <input type="checkbox"/>	kortärmad /ärmlös klänning  <input type="checkbox"/>	tjocka strumpbyxor/leggings  <input type="checkbox"/>
tröja  <input type="checkbox"/>	byxor  <input type="checkbox"/>	kort kjol  <input type="checkbox"/>	strumpor  <input type="checkbox"/>
skjorta  <input type="checkbox"/>	långa shorts  <input type="checkbox"/>	lång kjol  <input type="checkbox"/>	inneskor  <input type="checkbox"/>
tunn topp/blus  <input type="checkbox"/>	korta shorts  <input type="checkbox"/>		

6. Den senaste halvtimmen har jag mest:



sittit stilla



stått upp



gått omkring



sprungit, hoppat

Vänd →

Skola:.....Klass:.....Rumsnr. | Datum:.....-.....-.....

7. Hur känner du dig just nu?

Mycket kall <input type="checkbox"/>	Kall <input type="checkbox"/>	Lite kall <input type="checkbox"/>	Varken kall eller varm <input type="checkbox"/>	Lite varm <input type="checkbox"/>	Varm <input type="checkbox"/>	Mycket varm <input type="checkbox"/>
---	----------------------------------	---------------------------------------	--	---------------------------------------	----------------------------------	---

8. Just nu önskar jag att det var:

Kallare Som det är nu Varmare
















9. Just nu tycker jag att luften känns:

Bra (frisk) Okej Dålig (instängd)

10. I klassrummet brukar jag tycka att:

Det är för kallt	inte alls <input type="checkbox"/>	lite <input type="checkbox"/>	mycket <input type="checkbox"/>
Det är för varmt	inte alls <input type="checkbox"/>	lite <input type="checkbox"/>	mycket <input type="checkbox"/>
Det luktar illa	inte alls <input type="checkbox"/>	lite <input type="checkbox"/>	mycket <input type="checkbox"/>
Det är störande ljud	inte alls <input type="checkbox"/>	lite <input type="checkbox"/>	mycket <input type="checkbox"/>
Dåligt ljus (för skarpt eller för lite ljus)	inte alls <input type="checkbox"/>	lite <input type="checkbox"/>	mycket <input type="checkbox"/>

11. Jag brukar känna mig så här i klassrummet: Ringa in ett ansikte.

Jag mår bra				Jag mår dåligt
Är pigg				Är trött
Kan koncentrera mig				Kan inte koncentrera mig
Har lust att arbeta				Har inte lust att arbeta
Har ingen huvudvärk				Har huvudvärk

Tack så mycket!

