

Auteur

Ir. A.M.S. Weersink (Saxion University of Applied Sciences); Dr. Ir. C. Struck (Saxion University of Applied Sciences)
Dr. Ir. R.P. van Leeuwen (Saxion University of Applied Sciences)

Anticiperend ventileren in bestaande scholen met DIG-air

Er zijn veel scholen waar de binnenluchtkwaliteit tekortschiet door onvoldoende ventilatie [1]. Zowel het niet of onvoldoende gebruiken van ventilatievoorzieningen als inadequate technische ventilatievoorzieningen kunnen daarvan de oorzaak zijn. Personentellingen zijn te gebruiken voor prognoses van de CO₂-concentratie in ruimten. Daarover in dit artikel meer. CO₂-prognoses en CO₂-metingen zijn beiden in te zetten voor ventilatiesturing. Met ventilatiehoeveelheden afgestemd op de vraag overschrijdt de CO₂-concentratie de grenswaarde niet en wordt onnodig energiegebruik in de winter voorkomen. Saxion experimenteerde met het hybride ventilatiesysteem DIG-air in één van haar leslokalen. Aanvullende ventilatie via een automatische raamsturing achter een transparant geleide-element zorgt voor verlaging van de CO₂-concentratie in het lokaal. Kortstondige spuiventilatie – als er geen personen in de ruimte zijn – werkt zeer efficiënt.

Onvoldoende ventilatie leidt tot te hoge CO₂-concentraties in klaslokalen. In veel bestaande scholen is de CO₂-concentratie te hoog [2]. In het kader van het TFF Project Duurzame Intelligente Gebouwen (DIG) is een hybride ventilatiesysteem, DIG-air, ontwikkeld om de luchtkwaliteit in klaslokalen van bestaande schoolgebouwen te verbeteren. DIG-air combineert een bestaand mechanisch ventilatiesysteem met aanvullende natuurlijke ventilatie (add-on). Dit artikel beschrijft de ervaringen met DIG-air en de ontwikkeling van een model om DIG-air anticiperend te besturen op basis van geprognosticeerde CO₂ concentraties. Door de ventilatiehoeveelheid af te stemmen op het aantal aanwezige personen in de ruimte en daarbij de vereiste grenswaarde in het oog te houden, zijn te hoge CO₂-concentraties en te lage ruimtetemperaturen in de winter te voorkomen en worden energieverliezen beperkt. Dit artikel gaat in op een methode om die ventilatiebehoefte te bepalen.

Ventilatie-eisen gebaseerd op CO₂-concentratie

De CO₂-concentratie in een klaslokaal is een goede maat voor de luchtverversing per persoon [3]. Meer ventileren met schone buitenlucht betekent daling van de CO₂-concentratie en de concentratie van andere vervuilende deeltjes in de lucht (Gezondheidsraad, 2010). Een hoge CO₂-concentratie heeft een negatief effect op leerprestaties van kinderen, zoals taal- en rekenvaardigheden [1,4,5,6], maar ook op cognitieve prestaties, zoals informatie zoeken en strategieën bedenken [7]. Om de luchtkwaliteit in scholen te verbeteren zijn de regels in het Bouwbesluit 2012 aangescherpt. Toen is de minimum vereiste ventilatie voor scholen verhoogd naar 30 m³/h per persoon. De ventilatiecapaciteit in veel bestaande scholen is gebaseerd op het minimum Bouwbesluitniveau van vóór 2012, waardoor de ventilatiecapaciteit vaak tekortschiet. Het programma "Frisse Scholen" stimuleert verbetering van de ventilatie. Frisse Scholen hanteert voor de hoogste A-klasse minimaal 12 dm³/s, voor de B-klasse 8,5 dm³/s en voor de C-klasse 6 dm³/s verse luchttoevoer per persoon. Deze hoeveelheid ventilatie heeft als doel de CO₂-concentratie in leslokalen te beperken tot 800 ppm (parts per million) (A), 950 ppm (B), respectievelijk 1200 ppm voor de C-klasse. Opdrachtgevers kiezen zelf de te hanteren klasse en bovengrenswaarde. Een zwaardere klasse betekent dat meer ventilatiecapaciteit aanwezig moet zijn.

Is er voldoende ventilatie in een klaslokaal

De CO₂-concentratie in een klas is afhankelijk van het ventilatiegebied, de CO₂-concentratie in de buitenlucht, overige lucht die wordt toegevoerd – bijvoorbeeld als een deur naar de gang openstaat –, de netto CO₂-productie in de ruimte en eventueel CO₂-opname via planten. De CO₂-productie in de ruimte is afhankelijk van aanwezige personen in een ruimte en de hoeveelheid CO₂-die een mens produceert en afgeeft via uitgeademde lucht. Of in een klaslokaal voldoende wordt geventileerd – of aan de klasse eis wordt voldaan – is te bepalen op basis van CO₂-metingen. In veel Frisse Scholen hangt daarom een CO₂-meter die de concentratie aangeeft (vaak in ppm) en een rood-geel-groen-indicator bevat. De indicator geeft daarmee aan of de CO₂-concentratie wel/niet te hoog is.

Add-on gevel/plafondventilatie

Veel leslokalen bij Saxion in Enschede kampen ook met te weinig ventilatie. Bij Saxion wordt in één van de leslokalen dat is omgebouwd tot Living Lab, onderzoek uitgevoerd aan een hybride ventilatiesysteem (DIG-air) dat is ontwikkeld binnen TFF project "Duurzaam Intelligente Gebouwen (DIG)". Het DIG-air ventilatiesysteem is de combinatie van het bestaande mechanische CAV-ventilatiesysteem met een add-on systeem voor luchttoevoer via het bestaande raamsysteem en het plafond. Bouwkundestudenten [8] ontwierpen als add-on element voor een van de Saxion leslokalen een remontabel transparant voorzetelement dat achter een te openen raam wordt geplaatst. Dat element, dat het uitzicht niet belemmert, dient als transparant luchttoevoerkanaal. Het originele klepraam in de gevel wordt automatisch via een actuator geopend. Buitenlucht wordt door een ventilator boven het plafond via dit voorzetelement aangezogen. Die lucht stroomt via dubbeldoeks geperforeerde textielen plafondplaten van Trevira CS met een lage snelheid het leslokaal in om tocht te voorkomen. Vanwege de onverwarmde luchttoevoer is het voorkómen van tocht een belangrijk aandachtspunt. Lucht uit het vertrek warmt enigszins de koude toevoerlucht op via het open plafondsysteem. Teveel ventileren is in de winter niet wenselijk omdat de temperatuur in het vertrek dan te sterk daalt, de kans op koudeval toeneemt en dit tot energieverlies leidt. In de deurpost van het lokaal bevindt zich een personenteller. Data van de personenteller worden, evenals de CO₂-concentratie en de temperatuur, opgeslagen in een computer buiten het lokaal.

Anticiperend besturen

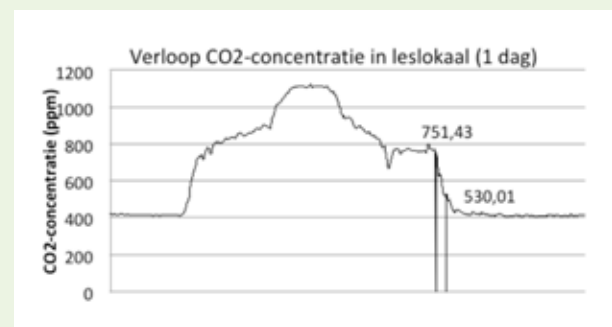
De CO₂-concentratie in een afgesloten lokaal met een constante ventilatiehoeveelheid en een constante CO₂-productie door aanwezige personen, verloopt als een e-macht (zie kader met voorbeeld en afbeeldingen 1 en 2). Het ventilatievoud bepaalt hoe stijl deze curve verloopt. In lokalen waar slecht geventileerd wordt neemt de CO₂-concentratie snel toe nadat een groep leerlingen het lokaal is binnengekomen. Andersom geldt ook dat de CO₂-concentratie snel afneemt direct na ontruiming van het lokaal. Wel duurt het lang voordat het eindniveau wordt bereikt. Als in een ruimte geruime tijd de CO₂-productie constant is – zoals in leslokalen – en de achtergrondconcentratie bekend is, dan kan berekend worden hoeveel ventilatie nodig is om de maximum CO₂-grenswaarde niet te overschrijden. Hierop kan de ventilatie gestuurd worden (zie voorbeeld). De meerwaarde van ventilatiesturing op

basis van personentellingen ten opzichte van CO₂-sturing hangt af van het CO₂-niveau waarbij wordt bijgestuurd (extra ventilatie), de hoeveelheid ventilatielucht en de CO₂-productie in het lokaal. In het lokaal van Saxion leverde dit een verschil van 50 ppm op in geval van bijsturing op 600 ppm bij een lokaal met 50% bezetting. Bij 100% bezetting is dit verschil marginaal.

Ventilatievoud berekenen op basis van de CO₂-concentratie

Het ventilatievoud is theoretisch gezien te berekenen uit het verloop van de CO₂-concentratie vanaf het moment dat de CO₂-productie in de ruimte stopt – dat is het moment dat alle leerlingen tegelijkertijd het lokaal verlaten – tot het moment dat de CO₂-concentratie in het lokaal gelijk is aan de buitenluchtconcentratie. Deze methode, waarbij CO₂-als tracergas wordt ingezet, heeft nadelen. Niet alle personen in de ruimte verlaten tegelijkertijd het vertrek. Het moment waarop de CO₂-productie stopt is niet één-éénduidig. De ruimte is na het stopzetten van CO₂-productie niet direct afgesloten, waardoor luchtuitwisseling mogelijk is met omringende ruimtes, waarvan de condities niet bekend zijn. In onze casus is het verschil in het gemeten (mechanische) ventilatiedebiet en het ventilatiedebiet bepaald volgens de CO₂-meterstand ca. 10%. Hieruit is te concluderen dat het bepalen van de hoeveelheid ventilatie op basis van CO₂-metingen in het leslokaal een toepasbare indicatieve methode is.

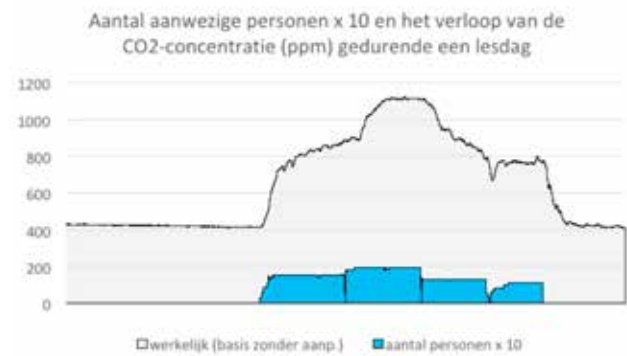
Hoeveelheid ventilatie in een leslokaal



Uit het verloop van de CO₂-concentratie na afloop van de les (geen CO₂-productie) is het ventilatiedebiet in het leslokaal te bepalen (op $t=30174$ s eindigt de les en verlaten studenten het vertrek. Op dat moment bedraagt de CO₂-concentratie 751 ppm.

Sturing op geprognosticeerd CO₂-verloop

In figuur 1 staat voor een dag het geregistreerde CO₂-verloop en het aantal personen (x10) dat aanwezig is in elk van de vier lesblokken (blauw). Uitgaande van een gemiddelde CO₂-productie van een mens van circa $4,5 \text{ à } 5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (Willems, 2013), is de totale CO₂-productie per tijdseenheid te bepalen tijdens de lessen. Uit de metingen gedurende de nachtperiode is de CO₂-concentratie in de buitenlucht bekend (ca. 400 ppm). Het geprognosticeerde CO₂-verloop wordt bepaald met de massabalans en de "basis instelling" van het ventilatiesysteem in m³/h. Het resultaat van de prognose voor deze eerste les is de blauw gestippelde lijn. Op het moment dat de eerste les stopt en leerlingen het lokaal verlaten, neemt direct de CO₂-concentratie af door ventilatie "basis instelling"). Tegelijkertijd komt er een nieuwe groep studenten het lokaal binnen, die zorgt voor CO₂-productie en dus toename van de CO₂-concentratie. Dit zorgt voor verdere toename van de CO₂-concentratie in het lokaal. Aan het eind van de les is dit anders. Een grote groep verlaat het lokaal en een kleinere groep komt binnen. De deur staat open. Dat is te



Figuur 1: CO₂-verloop (ppm) tijdens een voorjaarsdag, gemeten in een leslokaal van Saxion. De blauwe blokken zijn de vier lesblokken met de resultaten van persontellingen (aantal leerlingen x 10)

zien aan het bolle verloop van de CO₂-grafiek. De CO₂-concentratie neemt sterk af. De CO₂-concentratie wordt tijdens de tweede les te hoog. Verhoging van de ventilatie, tot het gewenste niveau van 900 ppm, is hier de juiste actie (zie figuur 2). Hierdoor verandert de prognose voor het CO₂-verloop voor de tweede les, maar ook nog voor de derde les. In dit geval is 450 m³/h extra ventilatie nodig om de grenswaarde van 900 ppm niet te overschrijden (zie figuur 3). Als deze hoeveelheid niet kan worden geleverd, dan moet een overschrijding van de grenswaarde worden geaccepteerd.

Enige tijd later, op $t=31001$ s, bedraagt de CO₂-concentratie in het lokaal 530 ppm. De CO₂-concentratie buiten bedraagt 411 ppm).

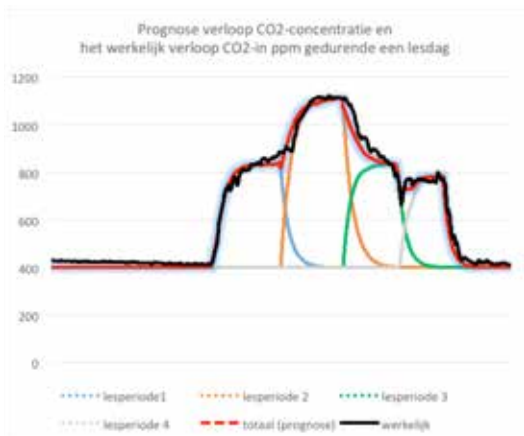
In bovenstaand voorbeeld vertrekken op tijdstip $t=30174$ seconde alle studenten uit het leslokaal. De CO₂-concentratie, bepaald met Siemens QPA20, is dan 751 ppm. Op tijdstip $t=31001$ seconde is de CO₂-concentratie gedaald tot 530 ppm. De ventilatie in de ruimte draait maximaal totdat de achtergrondconcentratie (C_e buiten) van 411 ppm wordt bereikt. Uit deze gegevens is nu het ventilatievoud n , en dus ook de ventilatiehoeveelheid in de ruimte te berekenen:

$C_i t = C_e + (C(0) - C_e) e^{-nt}$ (zie kader voor verklaring van de symbolen)
Invullen levert: $530 = 411 + (751 - 411) e^{-n \cdot (31001 - 30174)}$ [ppm]

Hieruit volgt het ventilatievoud $n = (1,06677/827) \times 3600 = 4,6$ per uur. Bij een inhoud van het leslokaal van 213,3 m³, bedraagt de ventilatiehoeveelheid 990 m³/h. Volgens metingen aan het venti-

latiesysteem zou dit 907 m³/h moeten zijn. Dit zou dus een afwijking van 10% betekenen. Er zijn verschillende oorzaken hiervoor aan te wijzen. Bij deze methode is het lastig om te bepalen wat het te selecteren 'aanvangsmoment' is waarbij $P=0$. Niet alle studenten lopen immers tegelijkertijd het vertrek uit. Verder komt door het openen van de deur naar de gang een luchtstroming tussen vertrekken tot stand waardoor de CO₂-massabalans wordt verstoord. In ons voorbeeld heerst er in het leslokaal een overdruk, waardoor het openen van de deur tot een verhoogde luchtstroming leidt.

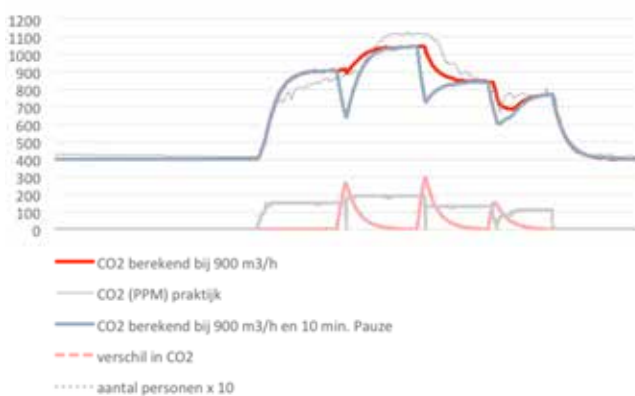
In de casus van Saxion is er sprake van lichte overdruk in het vertrek. Dit zorgt voor een grotere luchtstroom op het moment de deur naar het vertrek wordt geopend. Ook openen en sluiten van ramen in het vertrek heeft invloed op de hoeveelheid ventilatie en daarmee het verloop van de CO₂-concentratie. Maar ook bij het aflezen van de grafiek ontstaan onnauwkeurigheden.



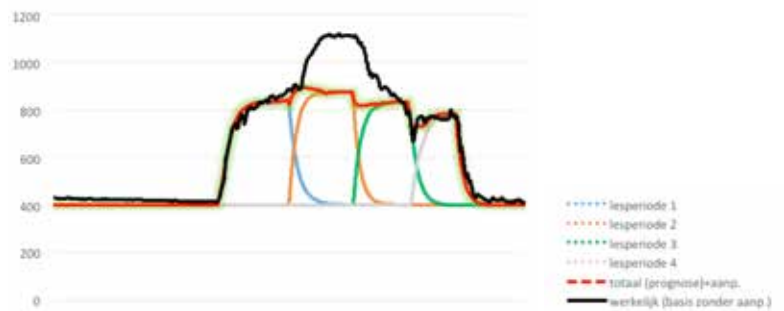
Figuur 2: CO₂-verloop (ppm) gedurende de lesdag (zwarte lijn) en de geprognosticeerde bijdrage van de CO₂-concentratie per lesblok (gestippelde lijnen). De rode gestreepte lijn is het geprognosticeerde CO₂-verloop.

Effectief doorventileren in de pauze

Een effectieve wijze om de CO₂-concentratie te reduceren is fors doorventileren (liefst spuien) als de klas leeg is en er dus geen CO₂-productie is. In figuur 4) wordt dit aangetoond in twee scenario's die zijn doorgerekend voor het klaslokaal uit voorgaande voorbeelden, met hetzelfde aantal personen, maar verschillende ventilatiehoeveelheden. Voor het eerste scenario is de ventilatiehoeveelheid constant 900 m³/h. Voor het tweede scenario geldt dit ook, maar dan zijn er drie pauzes van 10 minuten (lege klassen). Het resultaat is opmerkelijk. Er ontstaan verschillen van ca. 250 à 300 ppm die lange tijd doorwerken in de les. De CO₂-concentratie is in het lokaal waar geen pauzes zijn gehouden gemiddeld over de vier lesblokken 42 ppm hoger dan in het andere klaslokaal.



Figuur 4: CO₂-verloop (ppm) gedurende de lesdag (zwarte lijn) en de geprognosticeerde CO₂-concentratie per lesblok (rode doorlopende lijn), uitgaande van 900 m³/h ventilatie zonder pauzes. De grijze lijn is de CO₂-concentratie als er 3x 10 minuten pauze is waarin 900 m³/h wordt doorgeventileerd in een lege klas.



Figuur 3: CO₂-verloop (ppm) gedurende de lesdag (zwarte lijn) en de geprognosticeerde bijdrage van de CO₂-concentratie per lesblok (gestippelde lijnen); in lesperiode 2 is de ventilatiehoeveelheid afgestemd op de maximum CO₂-concentratie 900 ppm. De rode gestreepte lijn is het geprognosticeerde CO₂-verloop gedurende de dag.

Gebruikersoordeel

In de winter van 2015-2016 zijn voor en na installatie van het add-on gedeelte van het hybride DIG-air-systeem schriftelijke enquêtes afgenomen. In totaal zijn 143 enquêtes afgenomen. Hiervan zijn er voor installatie van het systeem 62 afgenomen en 81 na installatie van het systeem. Teveel geluidproductie van de ventilator boven het plafond blijkt een aandachtspunt. Te hoge geluidproductie maakt ventileren in de maximum stand niet wenselijk. Ook zijn er enkele kritische plekken geconstateerd met betrekking tot vallende koude luchtstroom uit het plafond. De geperforeerde plafondplaten zijn daarom daarna niet allemaal aaneensluitend op een rij opgehangen, maar om en om wel/niet geperforeerd. Een aandachtspunt vormen luchtspleten langs armaturen in het plafond, die voor lokaal discomfort kunnen zorgen bij lage buitenluchtemperaturen. Overall gezien is het oordeel van gebruikers over het systeem positief.

Door het geluidprobleem kan maximaal 360 m³/h extra ventilatie-lucht via het add-on gedeelte van het hybride ventilatiesysteem DIG-air worden toegevoerd. Dit is een aanzienlijke hoeveelheid in vergelijking tot de 550 m³/h die momenteel in de leslokalen via de centrale luchtbehandelingskast (CAV) wordt toegevoerd.

Conclusie

Als in bestaande gebouwen de mechanische ventilatie tekortschiet, is een add-on ventilatievoorziening in de gevel te overwegen om rechtstreeks van buiten extra lucht aan te voeren. Het ontwikkelde hybride DIG-Air systeem is daarvan een voorbeeld. Het add-on gedeelte daarvan, het voorzetraam in combinatie met een dubbeldoeks geperforeerde Trevira CS plafondplaat, maakt extra ventilatie mogelijk met een beperkte kans op koudeval in de winter.

Uitzicht naar buiten blijft aanwezig en het architectonische beeld aan de buitenzijde van het gebouw blijft onaangetast. Het DIG-air systeem maakt vraaggestuurd ventileren mogelijk via personentellingen en CO₂ concentratiemetingen. Zonder (getelde) personen in de ruimte is spuiventilatie mogelijk om in korte tijd de CO₂-concentratie sterk te laten dalen ten voordele van de luchtkwaliteit in de daarop volgende les. Verdere optimalisatie van de regelingen zijn nog een aandachtspunt in het kader van energiebesparing. Niet altijd zijn de gewenste grote hoeveelheden ventilatie te leveren, warmteterugwinning ontbreekt nog in het systeem en regelingen zijn verder te optimaliseren. De geluidproductie van de ventilator voor aanzuiging van de lucht is een aandachtspunt. Verdere ontwikkeling van add-on systemen voor andere raamtypen is wenselijk. Het onderzoek toont aan dat onvoldoende nauwkeurig is te voorspellen hoe de CO₂-concentratie verloopt als alleen de ventilator-gestuurde luchtstroming en de personentelling bekend zijn. Het openen van ramen en deuren door gebruikers heeft een te groot effect op de CO₂-concentratie. Aanvullende CO₂-metingen zijn nodig om een redelijke indicatie te kunnen geven van de toekomstige ventilatiebehoefte om te zorgen voor een goede binnenluchtkwaliteit. Teveel ventilatie is vanuit het oogpunt van energieverlies niet wenselijk.

Zeer effectief voor de CO₂-reductie is spuien in een pauze tussen lange lessen. Als dit betere prestaties en gezondere studenten en docenten oplevert dan is meer communicatie hierover en verplichte pauzes zeker de moeite waard. Een volgende stap is de waardering van het klimaat door aanwezig zijn in een lokaal te monitoren, bijvoorbeeld via een App, en daarop bij te sturen. Als dat bijdraagt aan verbetering van studieresultaten, studenttevredenheid en gezondheid, dan is dat pad de moeite waard om te exploreren.

In opdracht van Tech For Future voerde het lectoraat Duurzame Energie Voorziening (DEV) van Saxion University of Applied Science onder leiding van Ir. J. de Wit (emeritus lector DEV) onderzoek uit naar Duurzame Intelligente Gebouwen. Informatie in dit artikel is gebaseerd op onderzoeksresultaten uit dit TFF onderzoek.

Figuur 5: Compilatie van elementen van het add-on ventilatiesysteem DIG-air

Foto A: Verschillende testopstellingen gaatjesplafonds

Foto B: Demomodel DIG-Air in Saxion

Foto C: Demomodel DIG-Air in Saxion

Foto D en E: Remontabel transparant voorzetelement voor geleiding van aanvoerlucht (Hermesen, e.a. 2016)

Foto F: Actuator op raam voor automatische opening en sluiting van het raam

Foto G: Fabricage prototype met verschillende perforatiegraad en diameters



Bronnen

1. Gezondheidsraad. Binnenluchtkwaliteit in basisscholen. Den Haag: Gezondheidsraad, (2010); publicatienr. 2010/06. ISBN 978-90-5549-795-9
2. Versteeg, H., Onderzoek naar de kwaliteit van het binnenmilieu in basisscholen, (2007), Opdrachtgever Ministeries van VROM, OCW, SZW en VWS, artikelcode Artikelcode 8055, 19 juli 2007.
3. Willems, E. (2013), Cauberg Huygen, Onderzoek prestatie-eisen ventilatie in scholen.
4. Wargocki, P., Wyon, D.P., Matysiak, B., and Irgens, S. (2005). The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children. In Proceedings of Indoor Air 2005. Beijing, China: Tsinghua University Press
5. Gids, W.F. de, D.J. van Oel, J.C. Phaff, A. Kalkman (2007), Het effect van ventilatie op de cognitieve prestaties van leerlingen op een basisschool, TNO-rapport 2206-D-1078/B, Delft, 2007
6. Kajtar, L., Herczeg, L., Lang, E., Hrustinzky, T. and Banhidi, L. (2006) Influence of carbon dioxide pollutant on human well being and work intensity, Healthy Buildings 2006, Vol. 1, Lisbon, Portugal, 85-90
7. Satish, U., M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert and W. B. Fisk Is CO₂-an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂-Concentrations on Human Decision-Making Performance. Environ Health Perspect 2012, 20.
7. Hermesen, J., Sinkeler, R., Voortman, L. (2016), Rapportage DIG Air - minoronderzoek Tech For Future, Saxion 2016
9. Laussmann, D., Helm, D., (2011) Measurements Using Tracer Gases, Robert Koch Institute Germany, Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality, In Tech, 2011, pp. 365-406