

Auteurs Dr.ir. F. (Francesco) Franchimon - Franchimon ICM, dr.ir. M.G.L.C. (Marcel) Loomans (TU Eindhoven)

CO₂ als indicator voor ventilatiekwaliteit versus CO₂ als ontwerpcriterium

Niet alleen in onze buurlanden is er beleid hoe om te gaan met ventileren, maar nu ook in Nederland wordt er ruimer aandacht aan geschonken, onder andere vanuit de campagne 'Ventileren Zo Gedaan' [1] en het Rapport 'Ventilatie in relatie tot COVID-19 en een goede binnenluchtkwaliteit' [2;3]. CO₂-meters worden daarbij vaak genoemd om een indicatie te krijgen of er voldoende geventileerd wordt.

Ventileren is bedoeld om luchtverontreinigingen in het binnenmilieu te verdunnen en te verwijderen. Luchtverontreinigingen kunnen veroorzaakt worden door de ruimte, denk aan (toxische) emissies uit materialen en apparaten (bijvoorbeeld vluchtige organische stoffen), maar ook aan micro-organismen (bijvoorbeeld bacteriën, gisten en schimmels). Luchtverontreinigingen kunnen ook vanuit de buitenlucht komen, bijvoorbeeld ultra fijnstof. Mensen verontreinigen zelf ook de lucht. Denk aan (i) bio-effluenten (bijvoorbeeld CO₂), waarbij individuele activiteiten van mensen (bijvoorbeeld rusten, lichte inspanning, zware inspanning) de hoogte van de productie bepalen en (ii) het uitstoten van virussen (bijvoorbeeld het coronavirus) waarbij stemgebruik (bijvoorbeeld spreken, stem verheffen, schreeuwen, zingen) en het ademhalingsvolume mede de hoogte van de productie van aerosolen bepalen die virusmateriaal kan bevatten. Om die reden kan de luchtkwaliteit van een binnenruimte in principe niet uitsluitend beoordeeld worden door enkel het meten van CO₂-concentraties. Wel kan het meten van de CO₂-concentratie iets vertellen over de ventilatiekwaliteit, mits bekend is wat de context is waarbinnen gemeten is. Een belangrijk discussiepunt hierbij is de eenheid van de ventilatie-eis. Wordt er een eis per persoon gesteld of een ventilatie-eis op ruimteniveau. Aangezien luchtverontreinigingen

ook door de ruimte veroorzaakt kunnen worden of door individuele activiteiten en individuele uitstoot van virusdeeltjes, is het pleidooi om niet alleen eisen te stellen per persoon, maar ook op ruimteniveau de ventilatie te laten meewegen. Als de bezetting in een ruimte verlaagd wordt omdat de CO₂-grenswaarde wordt overschreden dan zal daardoor de CO₂-concentratie lager worden. Maar dit geldt niet voor de concentratie aan luchtverontreinigingen veroorzaakt door bijvoorbeeld de ruimte of door persoon-gerelateerde verontreinigen die van persoon-tot-persoon verschillen (bijvoorbeeld de uitstoot van virussen). Voor de volledigheid, sommige persoon-gerelateerde verontreinigen tussen personen zijn onderling van eenzelfde orde van grootte (denk aan CO₂-productie) en andere persoon-gerelateerde verontreinigen kunnen sterk verschillen tussen personen (denk aan virus-uitstoot).

CO₂ als ontwerpcriterium

Traditioneel wordt de toelaatbare CO₂-concentratie als prestatie-eis vastgesteld in ontwerpgegevens voor de hoeveelheid luchtverversing in een ruimte. Er wordt dan een ventilatievoud van een ruimte bepaald aan de hand van het ontwerpcriterium uit bijvoorbeeld het Bouwbesluit, Programma van Eisen Gezonde Kantoren of het Programma van Eisen Frisse Scholen. Hier wordt niet expliciet uitgegaan van infectiepreventie. Wanneer infectiepreventie een ontwerpcriterium zou zijn, dan kan het ventilatievoud afwijken ten opzichte van het meer traditionele ontwerpcriterium, namelijk de ventilatie-eis per persoon. In ieder geval bepaalt het traditionele ontwerpcriterium de capaciteit van het systeem om bij volle bezetting de toelaatbare CO₂-concentratie niet te overschrijden. Hierin is dus de CO₂-productie per persoon het leidende uitgangspunt.

Wat ontbreekt in deze aanpak is het rekening houden met ruimte-gerelateerde verontreinigingen (denk aan materialen) en persoon-gerelateerd verontreinigen die van persoon tot persoon kunnen verschillen. Hoewel ruimte-gerelateerde verontreinigingen soms nog wel worden meegenomen, geldt dit nog niet voor persoon-gerelateerde verontreinigingen. Bij dit laatste vormt het coronavirus natuurlijk een duidelijk voorbeeld.

CO₂ als indicator voor ventilatiekwaliteit

Wanneer de CO₂-concentratie met een CO₂-meter (Foto 1) gemeten wordt om een indicatie te krijgen over de werking van het ventilatiesysteem, ongeacht of dat een natuurlijk of mechanisch ventilatiesysteem is en ongeacht of de ventilatiecapaciteit al op een andere manier bepaald is, zijn andere parameters relevant om tot het juiste inzicht te komen. De bezettingsgraad, de leeftijd en het metabolisme van de mensen die in een ruimte verblijven bepalen de CO₂-productie in die ruimte, uitgaande dat er geen significante andere CO₂-productie bronnen aanwezig zijn.

Bij toepassing van luchtreiniging, naast ventilatie, bijvoorbeeld met (lokale) luchtreiniging, zal een ventilatie-equivalent ontstaan. De binnenluchtkwaliteit wordt in dat geval bepaald door de ventilatie en de luchtreiniging. In dit artikel wordt ervan uitgegaan dat er geen luchtreiniging plaatsvindt.

Voorbeeld: bij een volledig bezet klaslokaal (30 leerlingen en een docent) van een bovenbouw van het voorgezet onderwijs zal bij een CO₂-concentratie van 1.200 ppm geconcludeerd kunnen worden dat er voldoende geventileerd wordt, als klasse

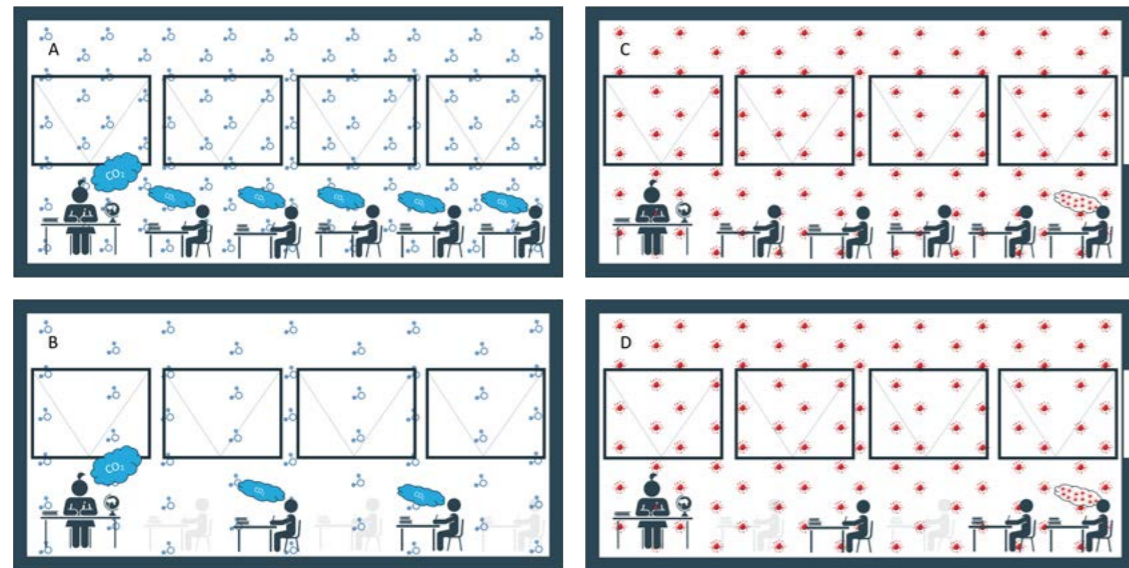
C van het Programma van Eisen Frisse Scholen de norm is. Echter, bij een half bezet klaslokaal (15 leerlingen en 1 docent) van een onderbouw van het basisonderwijs zal bij een CO₂-concentratie van 1.200 ppm geconcludeerd moeten worden dat er onvoldoende geventileerd wordt. In dit voorbeeld wordt ervan uitgegaan dat er geen vraaggestuurde ventilatie aanwezig is. De CO₂-productie in die situatie is veel lager door de lagere bezetting en ook lager vanwege de leeftijd van de kinderen. De CO₂-grenswaarde zou daarom gecorrigeerd moeten worden naar de context waarbinnen de CO₂-concentratie gemeten wordt om een indicatie te krijgen of er voldoende geventileerd wordt.

Besmettingskans en bezetting

In de eerdergenoemde campagne en in de handreiking [2;3] wordt geadviseerd om de bezettingsgraad te verlagen wanneer de CO₂-concentraties te hoog oplopen. Een lagere bezetting resulteert echter niet in een lagere besmettingskans voor de mensen die wel in de ruimte verblijven. Uitgaande dat één besmet persoon bepalend is voor de virusconcentratie in de gehele ruimte heeft het verlagen van de bezetting geen effect. Dit in tegenstelling tot de CO₂-concentratie waarbij iedere persoon in principe evenredig veel bijdraagt aan de CO₂-productie en daarmee de CO₂-concentratie. In Figuur 1 is dit gevisualiseerd. In relatie tot de besmettingskans vormt dit dus een aanvullend argument om niet enkel naar de ventilatie op persoonsniveau te kijken. Voor de volledigheid, een lagere bezetting leidt wel tot minder secundaire besmettingen, omdat er minder mensen in de ruimte aanwezig zijn. Daarnaast is de kans dat een besmet persoon aanwezig is theoretisch gezien ook lager.



Foto 1: CO₂-meter met stoplichtfunctie



Figuur 1: In A-B is te zien dat de CO₂-productie evenredig is met het aantal mensen in de ruimte (in dit voorbeeld is geen rekening gehouden met de CO₂-productie die verschillend is per leeftijdscategorie) en in C-D de virusconcentratie bepaald wordt door de besmette persoon. Het verschil tussen B en D geeft aan dat een lagere bezetting bij B leidt tot een lagere CO₂ concentratie en bij D de virusconcentratie gelijk blijft, ongeacht de bezetting.

Correctie van grenswaarden

De grenswaarden bij ontwerp zijn gebaseerd op de aanname dat een ruimte volledig bezet is en dat er activiteiten plaatsvinden die behoren bij die ruimte.

Met de informatie uit een eerder artikel uit TVVL Magazine [4] kan de hoeveelheid verse toegevoerde lucht aan de hand van de CO₂-productie en de gemeten CO₂-evenwichtsconcentratie berekend worden volgens:

$$Q = \frac{n * (C * 3600 * 1000)}{C_{CO2,bi} - C_{CO2,bu}}$$

Waarin:

- Q hoeveelheid verse toegevoerde lucht aan de ruimte (m³/h)
- n Aantal personen (-)
- C CO₂-productie per persoon (l/s/persoon)
- C_{CO₂,bi} gemeten CO₂-concentratie in de ruimte met CO₂-meter (ppm)
- C_{CO₂,bu} CO₂-concentratie in de buitenlucht (ppm)

Wanneer er meerdere leeftijdsgroepen binnen een ruimte aanwezig zijn of mensen voeren verschillende activiteiten uit dan kan de hoeveelheid verse toegevoerde lucht berekend worden aan de hand van de gesommeerde CO₂-productie en de gemeten CO₂-evenwichtsconcentratie:

$$Q = \frac{(n_1 * C_1 + n_i * i + \dots + n_N * C_N) * 3600 * 1000}{C_{CO2,bi} - C_{CO2,bu}}$$

De CO₂-productie per persoon voor verschillende leeftijdsgroepen en activiteiten is terug te vinden in Tabel 1.

Stoplichtmodel

In de praktijk worden er verschillende grenswaarden door CO₂-meter fabrikanten gehanteerd als het gaat om feedback te geven naar de gebruiker. Vaak gebeurt dat in de vorm van een stoplichtmodel, waarbij de indicator groen, geel/oranje of rood kleurt. Hier nemen we ter illustratie de uitgangspunten van de GGD als basis (zie Tabel 2 [6]).

Hiermee kunnen de stoplichtgrenswaarden tussen de verschillende kleursignalen worden vastgesteld. Vanuit het gemiddelde van de tijdelijk acceptabele range (1.000 – 1.400 ppm) wordt de grenswaarde in stoplichtmodellen bijna altijd gesteld op 1.200 ppm, zodat kleursignalering van de CO₂-meter bij hogere CO₂-concentraties rood moet kleuren. Bij een concentratie onder de 800 ppm zou de kleursignalering van de CO₂-meter groen moeten kleuren (zie Tabel 3).

Leeftijd categorie	Kinderdagopvang, peuterspeelzaal	BSO	PO onderbouw	PO bovenbouw	VO onderbouw	VO bovenbouw, MBO, HBO, WO	Volwassenen
Activiteit	0 tot <4	4 tot <12	4 tot <8	8 tot <12	12 tot <16	16 tot <21	>=21
Slapen (MET 1)	0,0013	0,0021	0,0018	0,0024	0,0032	0,0033	0,0032
Rust (MET 1,2)	0,0015	0,0025	0,0022	0,0029	0,0038	0,0041	0,0039
Lichte inspanning (MET 1,4)	0,0018	0,0029	0,0025	0,0034	0,0045	0,0048	0,0046
Matige inspanning (MET 4)	0,0050	0,0084	0,0073	0,0096	0,0127	0,0135	0,0132
Zware inspanning (MET 6)	0,0075	0,0126	0,0109	0,0144	0,0189	0,0202	0,0200

Tabel 1: CO₂-productie (l/s/persoon) (naar leeftijd en activiteit, [gebaseerd op [5]).

Echter, deze CO₂-grenswaarden tussen de verschillende categorieën zijn statisch. Zij moeten feitelijk gecorrigeerd worden voor de bezetting, activiteit en leeftijdsgroep die relevant zijn voor de ruimte waar de CO₂-concentratie met CO₂-meters gemeten wordt. Een voorbeeld maakt dit duidelijk (zie Kader).

Het voorbeeld laat zien dat in de geschetste situatie de kleursignalering al bij een veel lagere waarde naar rood

moet kleuren. Hierbij functioneert het stoplicht vooral om aan te geven dat de ventilatie in de ruimte (vanuit het ontwerpuitgangspunt) onvoldoende is.

Om de grenswaarde van groen te bepalen moet er op basis van het voorbeeld stoplichtmodel (Tabel 3) 400 ppm vanaf getrokken worden. Dus vanuit deze invalshoek zou de kleursignalering pas groen kleuren bij 300 ppm. Dat is onder de aangenomen CO₂-buitenconcentratie van 450 ppm. Om die reden zou een glijdende

CO ₂ -concentratie (ppm) (98-percentiel)	Gezondheidskundige Beoordeling
<800	Streefwaarde
800-1.000	Acceptabel
1000-1.400	Tijdelijk acceptabel
>1.400	Onacceptabel

Tabel 2: Gezondheidskundige beoordeling CO₂ concentraties [6].

<800	ppm	groen
800-1.200	ppm	geel
>1.200	ppm	rood

Tabel 3: Voorbeeld stoplicht model op basis van de uitgangspunten van de GGD [6].

Rekenvoorbeeld klaslokaal kleuters

In een klaslokaal zitten 15 kleuters en een docent. De activiteit en de leeftijdscategorie is verschillend tussen de kleuters en de docent.

De activiteit van de kleuters (leeftijdsgroep 4-8 jaar) wordt ingeschat op lichte inspanning (metabolisme 1,4 MET) en de activiteit van de docent (leeftijdsgroep > 21 jaar) wordt ingeschat op rustig (metabolisme 1,2 MET). Uitgaande 6 l/s per persoon (eis voor bestaande bouw uit SUVIS-regeling) betekent dat voor een klas-

lokaal, ontworpen voor 30 leerlingen en 1 docent, een hoeveelheid verse toegevoerde lucht aan de ruimte van 670 m³/h. Tot slot wordt er een CO₂-buitenconcentratie aangenomen van 450 ppm.

$$C_{CO2,bi} = 450 + \frac{((1*0,0039+15*0,0025)*3600*1000)}{670} = 672 \text{ ppm}$$

Aangezien CO₂-meters normaliter een afwijking kennen van ongeveer 10% kunnen deze berekende grenswaarden naar boven toe worden afgerond met 50 ppm. Dat zou in het rekenvoorbeeld betekenen dat de CO₂-meter kleursignalering rood af zou moeten geven wanneer de CO₂-concentratie > 700 ppm bedraagt.

schaal logischer zijn. De grenswaarde voor de kleursignalering groen kan dan bijvoorbeeld bepaald worden volgens:

$$C_{CO_2, groen, nieuw} = C_{CO_2, bu} + (C_{CO_2, rood, nieuw} - C_{CO_2, bu}) \frac{(C_{CO_2, groen, ori} - C_{CO_2, bu})}{(C_{CO_2, rood, ori} - C_{CO_2, bu})}$$

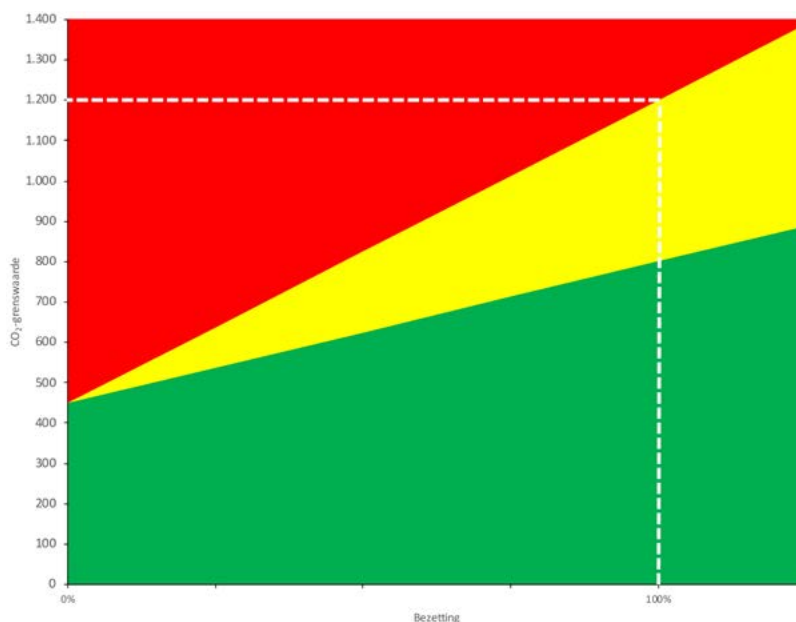
Waarin:

$C_{CO_2, groen, nieuw}$	CO ₂ -grenswaarde voor kleursignaal behorende bij nieuwe groene zone	(ppm)
$C_{CO_2, rood, nieuw}$	CO ₂ -grenswaarde voor kleursignaal behorende bij nieuw vastgestelde rode zone	(ppm)
$C_{CO_2, groen, ori}$	originele CO ₂ -grenswaarde voor kleursignaal behorende bij groene zone	(ppm)
$C_{CO_2, rood, ori}$	originele CO ₂ -grenswaarde voor kleursignaal behorende bij rode zone	(ppm)
$C_{CO_2, bu}$	CO ₂ -buitenconcentratie	(ppm)

Schematisch kan dan de grenswaarde voor de CO₂-concentratie voor de kleursignalering (stoplichtmodel), wanneer bijvoorbeeld voor bezetting wordt gecorrigeerd, volgens Figuur 2 verlopen. Hier wordt de CO₂-grenswaarde alleen gebruikt als indicator voor de ventilatie.

Conclusie

CO₂monitoren om de ventilatiekwaliteit te borgen vraagt om de juiste context om een correcte indicatie van die ventilatiekwaliteit te krijgen. Ongeacht hoe de ventilatiecapaciteit voor een ruimte bepaald is, te onderscheiden in een ventilatie-eis per persoon (afhankelijk van bezetting) eventueel verdisconteert met een ventilatie-eis voor de ruimte (onafhankelijk van bezetting). De statische grenswaarden die momenteel door CO₂-meters met stoplichtfunctie gehanteerd worden bieden die context niet, waardoor vaak onterecht de kwaliteit van ventilatie als voldoende wordt beoordeeld. Het rekenvoorbeeld met de kleuterklas laat dat goed zien. In veel gevallen is goed na te gaan welke bezetting een ruimte kent, welke leeftijdsgroepen daar aanwezig zijn en welke activiteiten daar plaatsvinden. Zodoende kan de default grenswaarden voor de rode, gele en groene kleursignalering betrekkelijk eenvoudig bepaald



Figuur 2: Schematische weergave CO₂ grenswaarde voor de kleursignalering wanneer gecorrigeerd wordt voor bezetting (100% bezetting is de bezetting volgens ontwerp waarbij 1.200 ppm zou leiden tot de ventilatie-eis bij bijvoorbeeld klasse C van Frisse Scholen). Een ruimte zonder mensen zou de CO₂-buitenconcentratie moeten aannemen.

worden. Hiermee wordt tenminste een vergelijkbare luchtkwaliteit ten aanzien van niet aan een persoon gerelateerde bio-effluenten (CO₂-productie) gerealiseerd. Als voorbeeld hiervan is het coronavirus, en de bijbehorende besmettingskans, op dit moment natuurlijk relevant.

Referenties

1. <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-volksgezondheid-welzijn-en-sport/nieuws/2021/10/11/meer-aandacht-voor-goed-ventileren>
2. Taskforce ventilatie van het coronacommissariaat van België, 2021. Aanbevelingen voor de praktische implementatie en bewaking van ventilatie en binnenluchtkwaliteit in het kader van COVID-19.
3. <https://www.binnenklimaattechniek.nl/algemeen/corona-binnenklimaattechniek>
4. Dijken van, F. Jacobs, P. Zeiler, W., 2020. Corona: nieuwe aandacht voor ventilatie in scholen. TVVL Magazine 2(10): 19-21.
5. Persily, A. & L. de Jonge, L., 2017. „Carbon dioxide generation rates for building occupants,” Indoor Air 27(5): 868-879.
6. Habets, T, et al, 2006. GGD Richtlijn Beoordelen van ventilatie in scholen. Landelijk centrum medische milieukunde. Definitieve versie 20-12- 2006, actualisatie februari 2008.