

Verspreiding:



Referentietaak 10

Milieu en Gezondheid en Binnenhuis - Vraag om advies m.b.t. CO₂ als indicator voor een gezond binnenmilieu

Françoise Geyskens en Marianne Stranger

Studie uitgevoerd in opdracht van Het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (LNE), Dienst Milieu en Gezondheid

December 2016

Technology



VERSPREIDINGSLIJST

Kim Constandt

Mart Verlaek

Maja Mampaey

Karen Van Campenhout

INHOUD

HOOFDSTUK 1.	Achtergrond	1
HOOFDSTUK 2.	Toetsingswaarden CO₂ in het binnenklimaat	4
2.1.	<i>CO₂-grenswaarde als aanvullend bouwtechnisch voorschrift</i>	4
2.2.	<i>CO₂-grenswaarde indien gezondheidskundige grondslag</i>	9
HOOFDSTUK 3.	CO₂ als indicator voor bio-effluent concentraties in het binnenmilieu	11
HOOFDSTUK 4.	CO₂ als indicator voor niet-persoonsgebonden pollut concentraties in het binnenmilieu	13
HOOFDSTUK 5.	Aanbevelingen voor binnenlucht meetcampagnes met betrekking tot CO₂-luchtmetingen	20
HOOFDSTUK 6.	Beantwoorden onderzoeksvragen	23

HOOFDSTUK 1. ACHTERGROND

Onder het binnenmilieu van een gebouw verstaan we alle chemische, fysische en biotische factoren die relevant kunnen zijn voor de gezondheid, inclusief het welbevinden van bewoners van woningen en gebruikers van publiek toegankelijke gebouwen.

Vele aspecten van de kwaliteit van het binnenmilieu worden beïnvloed door ventilatie en ventilatievoorzieningen, met name het thermisch, akoestisch en visueel comfort evenals de binnenluchtkwaliteit (cf. IAQ: Indoor Air Quality).

Een gezonde ventilatie is een continu proces van binnenbrengen van verse buitenlucht en afvoeren van vervuilde binnenlucht met als doel de gezondheidsrisico's van verontreinigende stoffen (afkomstig van binnen- en buitenbronnen) zoveel mogelijk te verminderen en bovendien geen extra risico's (bv. door onjuist gebruik of onvoldoende onderhoud van het ventilatiesysteem) met zich mee te brengen. Een overzicht wordt getoond in Tabel 1, waarbij de link naar de chemische, fysische en biotische factoren uit het Vlaams Binnenmilieubesluit wordt aangeduid.

Tabel 1 : Ventilatiestrategie - Reductie van bronnen van binnenhuisvervuiling en terugdringen van aanwezige verontreinigende stoffen (typisch gestipuleerd in het Binnenmilieubesluit)

BiMi	Chemische factoren	Fysische factoren	Biotische factoren	Omschrijving bronnen
CO ₂	X	(x) *		Hoofdzakelijk uitgeademde lucht
Bio-effluenten	X	X	x	Metabolische processen t.g.v. aanwezigheid mens en dier
Andere pollutanten	X	X	x	Verontreinigende stoffen t.g.v. binnen- en buitenbronnen (bouwmaterialen, consumentenproducten en verkeer) en binnen activiteiten

(*) Momenteel wordt bekeken of CO₂ in de herziene versie van het BiMi-besluit opgenomen wordt

Het menselijk lichaam produceert afvalstoffen (zogenaamde bio-effluenten, hoofdzakelijk CO₂) die bij onvoldoende ventilatie hinder kunnen veroorzaken. Indien te weinig wordt geventileerd zullen mensen bij het betreden van de ruimte de daar aanwezige geur als onaangenaam ervaren (cf. PAQ: Perceived Air Quality).

Ook huisdieren zijn een typische bron van CO₂ (via ademhaling), andere bio-effluenten en microbiologische verontreiniging (zoals allergenen en huidschilfers).

Tal van menselijke activiteiten geven eveneens aanleiding tot een niet te vermijden vervuiling van de lucht. Voorbeelden zijn verwarming, koken, schoonmaken, onderhoud en roken.

Het gebouw zelf en de inrichting ervan kunnen eveneens een bron van vervuiling zijn.

Voor het beheersen van risico's van bouw- en inrichtingsmaterialen evenals consumentenproducten dient in eerste instantie een doeltreffende bron-reductiestrategie toegepast te worden. Daarop zal de basisventilatie dan worden afgestemd op de bronsterkte van

de overgebleven verontreinigingsbronnen. De basisventilatie heeft dus als doel om in een woning zonder extra bronnen voor een goede binnenluchtkwaliteit te zorgen.

Wetenschappelijk onderzoek bevestigt de effectiviteit van mechanische ventilatie met filtertoepassing ter beperking van de belasting van de binnenlucht door buitenbronnen, in het bijzonder verkeersgerelateerde pollutanten. Bij natuurlijk geventileerde gebouwen, waarbij de verluchting typisch ongecontroleerd verloopt via openen van ramen en via kieren of spleten, is het niet mogelijk om binnenkomende lucht te zuiveren d.m.v. filtertoepassingen.

De sleutelrol van CO₂-concentraties in het ontwerp en optimalisatie van een ventilatiesysteem is uitvoerig gedocumenteerd.

Reeds in 1997 nuanceerde Dr. Andrew Persily (Persily 1997; cf. verantwoordelijke revisie ASHRAE Ventilation Standard 62) de stelling dat CO₂ (met uitgeademde lucht als belangrijkste bron binnenshuis) een goede indicator is van de binnenluchtkwaliteit.

De afgelopen twee decennia heeft tevens onderzoek plaatsgevonden naar de gezondheidsimpact van CO₂ in het binnenklimaat, CO₂ als maat voor de perceptie van de luchtkwaliteit door niet-geadapteerde personen (cf. Perceived Air Quality, adaptatie is het verschijnsel dat een slechte(re) luchtkwaliteit niet meer of minder als dusdanig wordt ervaren na enige tijd aanwezig te zijn geweest in betrokken ruimte) evenals de relatie tussen CO₂-concentraties en ventilatiedebieten (Persily 2015a).

Deze onderzoeksresultaten hebben geleid tot de aanpassing van het ventilatiebeleid en de herformulering van ventilatiestandaarden (Persily 2015b). Praktijkrichtlijnen streven ernaar om de rol van ventilatie te verzoenen met (1) een gezonde kwaliteit van het binnenmilieu, door mensen te beschermen die het grootste deel van hun leven binnenshuis doorbrengen, en (2) door tezelfdertijd de nood aan een meer efficiënt energieverbruik voor comfort in gebouwen na te streven.

Vanuit het departement LNE werd aan VITO gevraagd of CO₂ een goede indicator is voor een gezond binnenmilieu. De adviesvraag bestond uit volgende onderdelen:

Probleem 1: Is CO₂ een goede indicator voor kwaliteit van het binnenmilieu/ventilatie?

CO₂ gebruiken als indicator kan dus leiden tot een niet echt kwaliteitsvol binnenmilieu als de CO₂-indicatie niet leidt tot voldoende ventileren en verluchten, maar tot te weinig ventileren en verluchten.

Dit kan het geval zijn als de niet-persoonsgebonden vervuiling sterker oploopt dan/niet-parallel oploopt met de persoonsgebonden vervuiling. In een woning zijn er bv. veel minder personen dan in een klas. Het kan ook zijn dat er niet enkel niet-persoonsgebonden vervuiling in een ruimte is waar je als enige persoon binnen gaat.

In beide gevallen zou dat kunnen betekenen dat het veel langer duurt voor je eindelijk aan de persoonsgebonden CO₂-waarde bent die voldoende gedragsverandering stimuleert (tenzij je de waarde lager zet, rekening houdend met de bezetting/gebruik van de ruimte (zowel qua activiteiten als qua tijdsgebruik).

Probleem 2: Is CO₂ een goede indicator in elke setting?

CO₂ is een maat voor persoonsgebonden vervuiling omdat het uitgeademd wordt door mensen. Is het nodig om in verschillende settings (onderwijs, publieke gebouwen, woningen, ...) ook een andere richtwaarde te gebruiken. Bv in een klaslokaal zit je met veel meer mensen dan in een

woning, is CO₂ dan een betere indicator dan in een woning waar bv. twee of vier personen wonen? Is het nodig om te werken met verschillende CO₂ waarde in verschillende settings (woning, publiek, kinderopvang)?

Is CO₂ een maat voor niet-persoongebonden vervuiling? Wanneer is CO₂ een goede indicator voor binnenmilieukwaliteit in de verschillende settings? Wanneer niet? En hoelang duurt het voor het een goede indicator wordt in een ruimte zonder mensen. Kan je op basis van een gemeten CO₂ concentratie een uitspraak doen over de kwaliteit van de binnenlucht in een woning? Zijn er studies die dit eventuele verband aantonen? Kan je dus zeggen op basis van een gemeten CO₂ concentratie dat er voldoende geventileerd en verlucht wordt?

Probleem 3: Wanneer wordt CO₂ een goede indicator?

Op dit moment wordt de boodschap gegeven om 24 uur per dag te ventileren. Mechanische ventilatiesystemen ventileren ook 24 uur per dag om de luchtkwaliteit in woningen gezond te houden. In woningen zonder ventilatiesysteem is het niet gemakkelijk om 24 uur per dag te ventileren. Niet alleen kan dit leiden tot een hoog energieverbruik, maar op het gebied van veiligheid kan het ook niet mogelijk zijn om ramen 24 uur op een kier te laten. Als het niet mogelijk is om 24 uur per dag te ventileren, hoelang duurt het bij een niet geventileerde ruimte voordat de kwaliteit ok is als je begint met ventileren?

Probleem 4: Zijn er andere indicatoren?

Als blijkt dat CO₂ niet of niet in alle omstandigheden een goede indicator is voor ventilatie of de kwaliteit van het binnenmilieu, zijn er dan andere indicatoren die die rol wel kunnen vervullen (bv. TVOS). Kan ook bekeken worden of er voor verschillende settings (woningen, scholen, ...) beter andere indicatoren en welke dan gebruikt worden?

Probleem 5: Wat zijn de goede indicatorwaarden indien CO₂ een goede indicator is?

Als blijkt dat CO₂ een goede indicator is voor ventilatie of de kwaliteit van het binnenmilieu, wat zijn dan de goede indicator waarden voor CO₂? Kan ook bekeken worden of er voor verschillende settings (woningen, scholen, ...) andere indicatorwaarden nodig zijn?

HOOFDSTUK 2. TOETSINGSWAARDEN CO₂ IN HET BINNENKLIMAAT

2.1. CO₂-GRENSWAARDE ALS AANVULLEND BOUWTECHNISCH VOORSCHRIFT

Aan het ontwerp en de realisatie van ventilatiesystemen worden minimale eisen opgelegd om een aangename en gezonde luchtkwaliteit te bekomen, in zowel residentiële als niet-residentiële gebouwen, bestemd voor menselijk gebruik.

Minimale eisen worden geformuleerd en uitgedrukt als een ventilatiedebiet op basis van de oppervlakte of de bezettingsgraad van betrokken ruimte.

Een samenvatting van de voornaamste bepalingen en eisen rond binnenluchtkwaliteit vanuit een aantal belangrijke Europese normen voor ventilatie/energieprestatie van gebouwen is opgenomen in Tabel 2 (Swaans et al. 2016).

In de norm EN 13779 (2010) voor ontwerp en prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingsystemen in niet-residentiële gebouwen, wordt de binnenlucht in vier IDA-classes ingedeeld waarbij klasse IDA-1 overeenstemt met een hoge binnenluchtkwaliteit en klasse IDA-4 met een lage binnenluchtkwaliteit. Het betreft hier een subjectieve beleving van de binnenluchtkwaliteit (cf. Perceived Air Quality of ervaren luchtkwaliteit), zie Tabel 3.

Verskillende methoden voor de classificatie van de binnenluchtkwaliteit (met de menselijke stofwisseling als belangrijkste bron van luchtvervuiling) zijn in de norm beschreven waaronder:

- Onrechtstreekse classificatie op basis van de aanvoer buitenlucht, als debiet per persoon,
- Classificatie op basis van het verschil in de CO₂-concentratie binnen/buiten (cf. ΔCO_2).

In het WTCB document 'Ventilatie van kantoorgebouwen' (WTCB, 2005) wordt verduidelijkt dat de indirecte classificatie op basis van het ventilatiedebiet per persoon volgens de EN 13779 gebaseerd

is op de classificatie volgens het CO₂-peil. Vanuit een gemiddelde CO₂-productie van een gebouwgebruiker bij zittend kantoorwerk en een toegelaten CO₂ concentratieverschil op basis van de IDA klassen, werden overeenkomstige ventilatiedebieten per klasse afgeleid. De op CO₂ gebaseerde IDA-klassen zijn dus nominaal gelijkwaardig met de buitenluchtdebieten voor rookvrije ruimten, bij een zeker niveau van activiteit. De CO₂-productie is in de realiteit echter afhankelijk van diverse factoren zoals de leeftijd, het activiteitsniveau, het geslacht, gewicht en lengte van een persoon (met activiteit als meest bepalende factor). De toegepaste formule voor omrekening van een toegelaten CO₂-concentratie naar een ventilatiedebiet is daarom enkel geldig voor een stabiele toestand met een langdurig constante emissie en dus bij een evenwichtssituatie.

Tabel 2: Overzicht van de verschillende normen voor ventilatie/energieprestatie van gebouwen

Norm	Bepalingen en eisen m.b.t. binnenluchtkwaliteit	
EN 13779 (2010)	Toepassingsgebied norm	Ventilatie voor <u>niet-residentiële</u> gebouwen Behandelt prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen
(Toekomstige EN 16798-3)		Ontwerp, prestaties van het systeem Natuurlijke systemen en woningen worden niet in deze norm behandeld Hoofdttekst + 5 informatieve bijlagen Tabel zonder voorbeelden zijn normatief
	Classificatie van afvoerlucht (ETA) en afgevoerde lucht (EHA)	Dezelfde tabel is eveneens met voorbeelden opgenomen in de bijlagen van de norm (=informatief) Beschrijving normatief
	Classificatie van de binnenluchtkwaliteit (IDA)	Tabellen met typische waarden en standaardwaarden zijn in bijlage van de norm opgenomen (= informatief)
EN 15251 (2007)	Toepassingsgebied norm	Deze norm bepaalt de binnenomgevingsparameters die van invloed kunnen zijn op de energieprestatie van gebouwen. (relatie tussen het binnenmilieu en energieprestatie van een gebouw) voor <u>residentiële en niet-residentiële gebouwen</u>
(Toekomstige EN 16798-1)		

Vooral toepasbaar in niet-industriële gebouwen waar de criteria voor het binnenmilieu bepaald worden door menselijke aanwezigheid en waar de productie of het proces geen grote impact op het binnenmilieu heeft.

De norm is bijvoorbeeld toepasbaar voor volgende bouwtypes:

Huizen, appartementen, kantoorgebouwen, scholen, ziekenhuizen, hotels en restaurants, sportfaciliteiten, ... (residentiële en niet-residentiële gebouwen)

In bijlage B van de norm EN 15251 zijn tabellen met aanbevolen ventilatiedebieten per persoon of per m² en CO₂-concentraties opgegeven (=informatief) alsook aanbevolen ventilatiedebieten gebaseerd op een component voor mens en gebouw (i.f.v. pollutieniveau)

Basis voor de criteria voor binnenluchtkwaliteit en ventilatiedebieten

prEN 16798-1

(mei 2015)

Classificatie gebaseerd op 'Perceived Air Quality'

Beschrijving normatief, categorieën met luchtdebieten i.f.v. het procentueel aantal ontevreden personen, voor verdunnen bio-effluenten en materiaalemissies in gebouwen

Tabellen met typische waarden en standaardwaarden zijn in bijlage van de (nieuwe) norm opgenomen (= informatief)

NBN D 50-001 (1991)

Toepassingsgebied
norm

Eisen betreffende luchtverversing in woongebouwen

Richtlijnen voor ventilatievoorzieningen in woongebouwen (op voorwaarde dat geen rekening dient gehouden met emissie van schadelijke stoffen door de gebruikte materialen of de bodem; ventilatie in hoofdzaak bedoeld ter bestrijding van de verontreiniging ten gevolge van de bewoning door de mens)

Tabel 3: Ventilatie debieten met buitenlucht per persoon - EN 13779

Klasse	Eenheid	Ventilatie debiet met buitenlucht per persoon			
		Niet rokerszone		Rokerszone	
		Typische waarden	Standaardwaarde	Typische waarden	Standaardwaarde
IDA 1	$\text{l.s}^{-1}.\text{persoon}^{-1}$	> 15	20	> 30	40
IDA 2	$\text{l.s}^{-1}.\text{persoon}^{-1}$	10 – 15	12,5	20 - 30	25
IDA 3	$\text{l.s}^{-1}.\text{persoon}^{-1}$	6 – 10	8	12 - 20	16
IDA 4	$\text{l.s}^{-1}.\text{persoon}^{-1}$	< 6	5	< 12	10

EN norm 13779 definieert de buitenluchtdebieten per persoon voor klasse IDA 2 van de binnenluchtkwaliteit als standaardwaarde.

Overeenkomstig het Besluit algemene bepalingen energiebeleid, Bijlage X "Ventilatievoorzieningen in niet-residentiële gebouwen: bepalingsmethode en eisen" (HVNR, 2011) mag het ontwerpdebiet bij de dimensionering van ventilatiesystemen niet kleiner zijn dan het minimum debiet dat overeenkomt met binnenluchtklasse IDA 3 (cf. ΔCO_2 800 ppm).

De bijlage van deze norm bepaalt tevens dat voor de ventilatievoorzieningen in woongebouwen de norm NBN D50-001 moet gevolgd worden en somt de uitzonderingen op die regel op. Aanbevelingen en eisen betreffende het comfort in termen van CO_2 concentraties worden in laatstgenoemde norm echter niet geformuleerd.

Tabel 4 : Classificatie van de binnenluchtkwaliteit op basis van het CO_2 -niveau - EN 13779 en EN 15251

EN 13779 IDA klasse	Typische waarden ΔCO_2 in ppm	Standaardwaarde ΔCO_2 in ppm	EN 15251 Comfortklasse	ΔCO_2 waarde in ppm voor energieberekeningen
------------------------	--	---	---------------------------	--

1	≤ 400	350	I	350
2	400 – 600	500	II	500
3	600 – 1000	800	III	800
4	> 1000	1200	IV	> 800

In Tabel 4 wordt naast de indeling in IDA-klassen eveneens een indeling in comfortklassen volgens EN 15251 (2007) toegevoegd.

Bemerk dat alle aspecten met betrekking tot de binnenluchtkwaliteit (waaronder de IDA klassen) zullen worden verwijderd uit de norm EN 13779 (cf. toekomstige standaard EN 16798-3) bij een volgende revisie en waarna ze behandeld zullen worden in EN 15251 (cf. toekomstige standaard EN 16798-1). EN standaarden 16798-1 en EN 16798-3 zijn momenteel nog in de goedkeuringsfase en worden daarom niet meegenomen in deze bespreking. De actuele status van beide normen (met CEN/TC 156 als studiec commissie) is consulteerbaar via <https://standards.cen.eu> : uiterste datum voor het leveren van commentaar op beide finale normontwerpen was respectievelijk 26 juli 2016 (voor FprEN 16798-3) en 17 augustus 2016 (voor FprEN 16798).

In de norm EN 15251 zijn voor de verschillende comfortklassen aanbevolen ventilatiedebieten (q_{tot}) voor niet-residentiële gebouwen opgenomen, waarbij zowel rekening gehouden wordt met een ventilatiedebiet voor de aanwezige personen (q_p) als met een bijkomend ventilatiedebiet voor materiaalemissies (q_B). Het vereiste ventilatiedebiet voor de materiaalemissies hangt af van het verwachte pollutieniveau van de gebouwen (zeer laag, laag of niet laag) (zie Tabel 5).

Tabel 5: Voorbeelden van aanbevolen ventilatiedebieten voor niet-residentiële gebouwen met standaard bezettingsdichtheid voor drie niveaus van pollutie van de gebouwen zelf - EN 15251

Type gebouw of ruimte	Comfort klasse	Vloeropp m ² / Persoon	q_p	q_B	q_{tot}	q_B	q_{tot}	q_B	q_{tot}	Toevoegen bij roken
			l/s, m ²	l/s, m ²		l/s, m ²		l/s, m ²		l/s, m ²

			bij bezetting	voor gebouwen met een zeer laag pollutie-niveau		voor gebouwen met een laag pollutie-niveau		voor gebouwen met een niet laag pollutie-niveau		
Enkel kantoor	I	10	1,0	0,5	1,5	1,0	2,0	2,0	3,0	0,7
	II	10	0,7	0,3	1,0	0,7	1,4	1,4	2,1	0,5
	III	10	0,4	0,2	0,6	0,4	0,8	0,8	1,2	0,3
Landschapskantoor	I	15	0,7	0,5	1,2	1,0	1,7	2,0	2,7	0,7
	II	15	0,5	0,3	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9	0,5
	III	15	0,3	0,2	0,5	0,4	0,7	0,8	1,1	0,3
Conferentiezaal	I	2	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0	5,0
	II	2	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9	3,6
	III	2	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8	2,0
Auditorium	I	0,75	13,3	0,5	13,8	1,0	16	2,0	17	
	II	0,75	9,3	0,3	9,6	0,7	11,2	1,4	11,9	
	III	0,75	5,3	0,2	5,5	0,4	6,4	0,8	6,8	
Restaurant	I	1,5	7,0	0,5	7,5	1,0	8,0	2,0	9,0	
	II	1,5	4,9	0,3	5,2	0,7	5,6	1,4	6,3	5,0
	III	1,5	2,8	0,2	3,0	0,4	3,2	0,8	3,6	2,8
Klaslokaal	I	2,0	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0	

	II	2,0	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9
	III	2,0	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8
Kleuterschool	I	2,0	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0
	II	2,0	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9
	III	2,0	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8
Warenhuis	I	7,0	1,4	0,5	1,9	1	2,4	2,0	3,4
	II	7,0	1,0	0,3	1,3	0,7	1,7	1,4	2,4
	III	7,0	0,6	0,2	0,8	0,4	1,0	0,8	1,4

In een aantal Europese landen is de basis-eis voor ventilatie gecombineerd met een CO₂ grenswaarde als aanvullende eis. Deze varieert van 900 ppm tot 5000 ppm, met 1200 ppm als typische waarde (cf. middelmatige binnenluchtkwaliteit IDA 3, indien buitenlucht concentratie 400 - 500 ppm). In deze context fungeert CO₂ als maat voor comfort, bij aanwezigheid van persoonsgebonden vervuiling en maximale bezetting van niet-residentiële gebouwen (typisch scholen en kantoren). Het betreft geen gezondheidskundige toetsingswaarde.

Een kritiek aspect van het gebruik van CO₂ als indicator voor ventilatie is de meting ervan. Gemiddelde CO₂ concentraties kunnen bepaald worden over langere periodes van bezetting en niet-bezetting van vertrekken; maar kunnen ook bepaald worden tijdens kortere periodes van bezetting. In principe zijn bij een voldoende hoge bezettingsgraad CO₂ piek-concentraties een goede maat voor ventilatie, dan wel op voorwaarde dat een steady-state (een evenwichtssituatie) in de ruimte bereikt wordt. Echter, indien de luchtverversingsgraad in een ruimte erg laag is, zal deze steady-state nooit voorkomen, waardoor CO₂ metingen moeilijker gebruikt kunnen worden als maat voor ventilatie.

2.2. CO₂-GRENSWAARDE INDIEN GEZONDHEIDSKUNDIGE GRONDSLAG

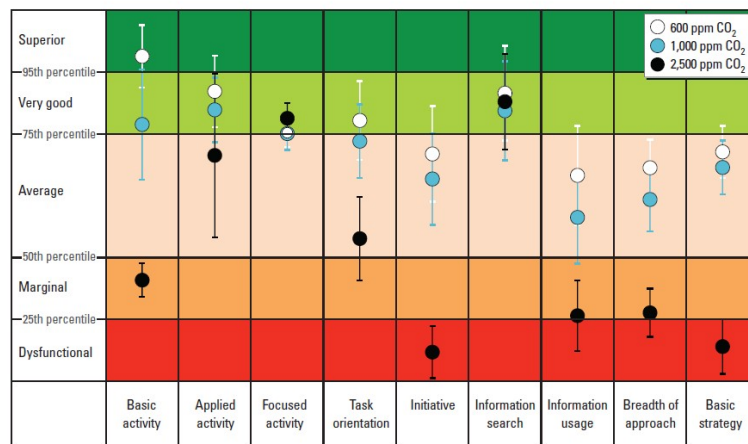
In een niet-industriële omgeving vormt CO₂ op zich geen onmiddellijk risico voor de gezondheid.

Enkel bij concentraties vanaf 5000 ppm - de grenswaarde voor beroepsmatige blootstelling aan betrokken stof - kunnen klachten zoals hoofdpijn en sufheid ontstaan. Ademhalingsmoeilijkheden treden op vanaf 3 %, verlamingsverschijnselen bij 6 %. De dodelijke dosis bedraagt 8 tot 10 %.

Verbanden tussen verhoogde CO₂-concentraties en een toename van gezondheidsklachten en verminderde werkprestaties (cf. klachten i.v.m. het Sick Building Syndroom) werden in het verleden veelal toegeschreven aan andere vervuilende stoffen binnenskamers.

Recente literatuur focust echter op de effecten van CO₂ op comfort en prestaties van blootgestelde personen.

In een recent onderzoek naar het verband tussen CO₂-concentraties en cognitief functioneren (Satish et al. 2012) werden 22 proefpersonen blootgesteld aan respectievelijk 600, 1000 en 2500 ppm CO₂ in een gecontroleerde kantooromgeving. Daarop werd het cognitief functioneren van deelnemers gemeten via de uitvoering van negen deeltaken.



Bron: Satish et al. 2012

Figuur 1: Directe effecten van verhoogde CO₂-concentraties in een gecontroleerde kantooromgeving

Dit onderzoek toonde een matige achteruitgang van de werkprestaties (zie Figuur 1) aan, bij de uitvoering van zes van de negen deeltaken, vanaf een CO₂-concentratie van 1000 ppm. Bij verhoging van de CO₂-concentratie tot 2500 ppm werd een aanzienlijke beperking in executieve functies vastgesteld voor 7 deeltaken. Ook Wargocki (2007) rapporteerde dalende prestaties van schoolgaande kinderen bij een lager ventilatievoud.

Aanvullend toonde Mendell et al (2013) in een 2-jarige opvolgstudie aan dat absentieïsme afneemt met 1.6% per l/s.p (liter per seconde per persoon) extra luchttoevoer. En ook Petersen (2015) en Haverinen (2015) toonden aan dat prestaties toenemen bij lagere CO₂ concentraties.

Over de impact van ventilatievoud op de gezondheid van gebouwgebruikers (eerder dan comfort en prestaties) zijn echter minder data gekend. Het beperkt wetenschappelijk onderzoek over deze relatie duidt niet op een uitgesproken effect. Aanvullend onderzoek is nodig om aard en omvang van dit effect te kunnen vaststellen en daarop een gezondheidskundige toetsingswaarde voor CO₂ als verontreinigende stof in het binnenmilieu te definiëren.

HOOFDSTUK 1. CO₂ ALS INDICATOR VOOR BIO-EFFLUENT CONCENTRATIES IN HET BINNENMILIEU

De concentratie van bio-effluenten (lichaams- en geurstoffen) is gecorreleerd met de concentratie CO₂ die metabolisch door de mens wordt geproduceerd. De productie van bio-effluenten (in hoofdzaak CO₂ en waterdamp) is functie van het activiteitsniveau van betrokken personen. De luchtconcentratie van deze stoffen (met CO₂ als indicator) is bijgevolg een maat voor de bezettingsgraad van de betrokken ruimte.

In de context van binnenluchtkwaliteit worden vooral bio-effluenten, vanwege hun geur, als onaangenaam ervaren. Bovendien kunnen deze stoffen (deeltjes, biologische aërosolen en vluchtige organische stoffen) aanleiding geven tot gezondheidseffecten (Zhang et al. 2016).

Het belang van bio-effluenten op onze perceptie van het binnenmilieu werd aangetoond door middel van gecontroleerde blootstellingstesten. Zo rapporteerden Zhang et al. (2015) recent, op basis van dergelijke gecontroleerde blootstellingstesten, dat personen die enkel blootgesteld worden aan CO₂ geen impact op cognitieve functies ondervinden, terwijl bij een blootstelling aan CO₂ in combinatie van bio-effluenten, wel een duidelijke impact op de cognitieve functies waargenomen wordt.

Ventileren heeft ondermeer tot doel deze persoonsgebonden vervuiling, en lichaamsgeuren in het bijzonder, terug te dringen (cf. q_p in Tabel 5) tot een niveau waarbij 80 % van de niet-geadapteerde personen (lees bezoekers) de binnenluchtkwaliteit als comfortabel ervaren (overeenkomstig de EN 15251 eis voor comfortklasse II).

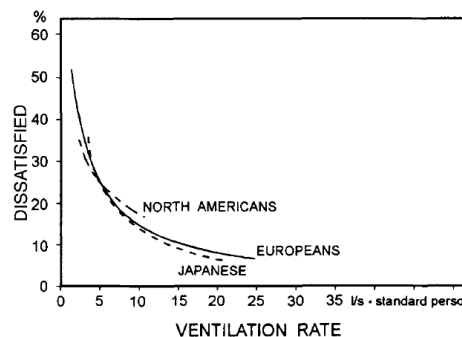


Fig. 2 Percentage of dissatisfied unadapted persons ("visitors") as a function of the ventilation rate when human bioeffluents are the exclusive pollutants. Studies from European (Fanger and Berg-Munch, 1983; Berg-Munch et al., 1986), North American (Cain et al., 1983) and Japanese (Iwashita et al., 1990) studies show remarkable agreement

Bron: Fanger 1998

Figuur 2 Ervaren luchtkwaliteit (of PAQ) als functie van het ventilatiedebiet indien persoonsgebonden vervuiling

De relatie tussen het gehalte lichaamsgeurstoffen en CO₂-concentraties bij het betreden van een ruimte werd ook experimenteel vastgesteld (Fanger en Berg-Munch 1983, Rasmussen et al. 1985, Berg-Munch et al. 1986), zoals getoond in Figuur 3.

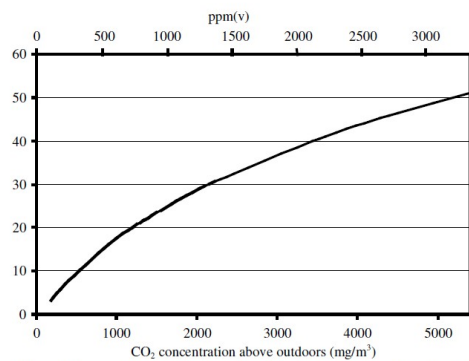


Figure 2 Percent of Visitors Dissatisfied with Bioeffluents Odor as a Function of CO₂ Concentration (CEC 1992)

Bron: CEC. 1992. *Guidelines for Ventilation Requirements in buildings. Report No. 11, European Concerted Action Indoor Air Quality & Its Impact on Man. Commission of the European Communities, Brussels*

Figuur 3 Ervaren luchtkwaliteit als functie van de CO₂-concentratie (minus de buitenluchtconcentratie)

Herinner de typische grenswaarde voor CO₂ als aanvullende eis in sommige Europese bouwvoorschriften: een ventilatiedebiet van 6 tot 10 l/s per persoon (typisch voor IDA 3 binnenluchtkwaliteit) dient (minimaal) gegenereerd teneinde de CO₂-concentratie terug te brengen tot 1200 ppm (of 800 ppm ΔCO₂, indien 400 ppm CO₂-buitenluchtconcentratie) opdat de concentratie bio-effluenten wordt gehandhaafd op een niveau waarbij binnenlucht niet als bedompt of benauwd wordt ervaren.

Door de CO₂-concentratie te meten ontstaat een indirecte indicatie van de aanwezigheid van een overmaat aan bio-effluenten. In principe zou dus in bezette ruimten, waar een rookverbod geldt en de vervuiling hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door menselijke stofwisseling (dus niet door

materiaalemissies, cf. q_B voor gebouwen met een zeer laag pollutieniveau in Tabel 5), de CO₂-concentratie gebruikt kunnen worden als indicator van de binnenluchtkwaliteit.

Ook in de situatie van een lage bezetting, indien het vermoeden bestaat dat het ventilatiesysteem in een ruimte niet goed functioneert of de gebouwverluchting meer algemeen onvoldoende is (in geval geen mechanisch ventilatiesysteem aanwezig is), typisch in woningen met klachten, is het zinvol CO₂-metingen uit te voeren als initiële stap in het remediëringsplan.

Om echter CO₂ als IAQ-waardemeter of indicator te kunnen gebruiken bij klachten in ruimten met hoge bezettingsgraad (typisch in scholen, in mindere mate in kantoorruimten), dient de correlatie tussen CO₂-concentraties en niet-persoonsgebonden vervuiling te worden bevestigd. Deze relatie wordt besproken in het volgende hoofdstuk.

HOOFDSTUK 3. CO₂ ALS INDICATOR VOOR NIET-PERSOONSgebonden POLLUENT CONCENTRATIES IN HET BINNENMILIEU

In de wetenschappelijke literatuur is er slechts zeer geringe informatie beschikbaar over CO₂ als indicator voor niet-persoonsgebonden luchtpollutie. De relaties tussen CO₂-concentraties en deze van VOS (t.g.v. zowel binnen- als buitenbronnen en ook menselijke activiteiten) en fijn stof in het binnenmilieu, werden immers zelden gekwantificeerd. In het kader van de referentietoets zal in 2017 bekeken worden of afgelopen Vlaamse IAQ projecten deze analyse toelaten.

Volgens een recent gepubliceerd onderzoek naar de binnenluchtkwaliteit in 567 woningen (cf. survey I) en 310 niet-residentiële gebouwen (cf. survey II, met name kinderdagverblijven, kleuterscholen en lagere scholen) in Frankrijk (Ramalho et al. 2015; Anses 2013), fungeert CO₂ als tracer voor binnenluchtpollutie ten gevolge van formaldehyde (Form), acetaldehyde (Acet), acroleïne (Acro), benzeen (Benz), PM_{2,5} en PM₁₀ :

- Zowel in de residentiële als in de niet-residentiële survey wordt immers een significant positieve, maar zwakke correlatie van de gemiddelde concentratie formaldehyde en benzeen met de overeenkomstige CO₂-concentratie vastgesteld.
- In de woningen geldt daarenboven een significant positieve correlatie van CO₂ met acetaldehyde, acroleïne, PM_{2,5} en PM₁₀. CO₂ correleert het sterkst met acetaldehyde (enkel beproefd in survey I) met een alsnog lage Pearson correlatiecoëfficiënt van 0,371 , indien CO₂ uitgemiddeld wordt over de perioden van aanwezigheid van mensen in betrokken ruimten.

Een overzicht van deze (Pearson) correlatieanalyse tussen CO₂ en binnenluchtpolluenten, en binnenluchtpolluenten onderling in de woningen, kinderdagverblijven en kleuterscholen wordt getoond in Tabel 6.

Tabel 6 Het resultaat van de (Pearson) correlatieanalyse voor binnenluchtpolluenten in residentiële en niet residentiële gebouwen in Frankrijk

Woningen	CO₂	Form	Acet	Acro	Benz	PM₁₀
Formaldehyde	0,191					
Acetaldehyde	0,371	0,241				
Acroleïne	0,247	0,310	0,644			
Benzeen	0,150	0,058	0,318	0,365		
PM ₁₀	0,209	0,011	0,315	0,410	0,237	
PM _{2,5}	0,123	0,053	0,365	0,479	0,248	0,880
Kinderdagverblijven	CO₂	Form				
kleuterscholen						
Formaldehyde	0,283					
Benzeen	0,105	-0,025				

Bold: p-waarde < 0,00001; Bold en italic: p-waarde < 0,05

Met CO₂ uitgemiddeld over perioden van bezetting van beproefde ruimten

Bron: Anses, Concentrations de CO₂ dans l' air intérieur et effets sur la santé, Avis de l'Anses - Rapport d' expertise collective (juli 2013), annex 3 (Ramalho et al., 2013)

Tabel 7 illustreert in welke mate de correlatie van CO₂-concentraties met de concentratie van binnenluchtpolluent wordt beïnvloed door externe factoren, met name het gebruik van centrale stookinstallaties, seizoeninvloeden en de aanwezigheid van een CO-emitterend verwarmingselement (met CO > 3 ppm) evenals rokers in beproefde ruimten.

Aanvullend op het grootschalige Franse onderzoek naar het verband tussen IAQ en CO₂, voerde Ramalho et al. (2015) een literatuurstudie uit naar beschikbare wetenschappelijke literatuur met betrekking tot de correlatie tussen CO₂ en binnenluchtpolluenten in vergelijkbare casestudies.

Tabel 8 toont het resultaat van deze literatuurstudie. Hieruit blijkt echter dat de significant positieve, doch zwakke, correlatie tussen formaldehyde en CO₂, zoals vastgesteld in Franse niet-residentiële gebouwen (tijdens survey II), niet bevestigd wordt in analoge onderzoeken in andere landen, zoals China of Canada.

Ter gelegenheid van woning surveys in Canada en Frankrijk (op andere locaties dan deze beproefd tijdens survey I) daarentegen werd wel een positieve correlatie van CO₂-concentraties met formaldehyde concentraties teruggevonden, dit naar analogie met bevindingen uit de Franse survey I.

Tabel 7 Het resultaat van de (Pearson) correlatieanalyse voor binnenluchtpolluenten in woningen, kinderdagverblijven en kleuterscholen te Frankrijk als functie van externe, potentieel beïnvloedende factoren

Correlatie CO ₂	R (Pearson) p-waarde	Form	Acet	Acro	Benz	PM10	PM2,5	Form	Benz
Woningen							Kinderdagverblijven kleuterscholen		
Buiten stookseizoen		<u>0,244</u> 0,002	<u>0,367</u> < 0,0001	<u>0,250</u> 0,001	0,126 0,113	0,025 0,812	0,002 0,986		
Tijdens stookseizoen		<u>0,241</u> < 0,0001	<u>0,338</u> < 0,0001	<u>0,208</u> < 0,0001	0,101 0,067	<u>0,217</u> 0,003	<u>0,150</u> 0,045		
CO ≤ 3 ppm		<u>0,324</u> < 0,0001	<u>0,370</u> < 0,0001	<u>0,269</u> 0,001	0,130 0,123	0,025 0,767	-0,040 0,645		
CO > 3 ppm		0,116 0,187	<u>0,389</u> < 0,0001	<u>0,207</u> 0,018	<u>0,192</u> 0,030	<u>0,270</u> 0,002	<u>0,185</u> 0,042		
Zomer		0,098 0,576	0,275 0,110	0,281 0,102	0,223 0,204	0,262 0,134	0,215 0,238	<u>0,244</u> < 0,0001	-0,080 0,106
Winter		<u>0,194</u> 0,004	<u>0,265</u> < 0,0001	<u>0,167</u> 0,013	0,074 0,282	0,101 0,281	-0,030 0,755	<u>0,277</u> < 0,0001	<u>-0,104</u> <u>0,033</u>
Niet-rokers		<u>0,179</u> 0,001	<u>0,299</u> < 0,0001	<u>0,293</u> < 0,0001	0,103 0,063	<u>0,279</u> 0,0001	<u>0,258</u> 0,0004		
Rokers		<u>0,221</u> 0,003	<u>0,485</u> < 0,0001	<u>0,260</u> 0,001	<u>0,215</u> 0,006	<u>0,210</u> 0,045	0,131 0,224		
Globaal		<u>0,191</u> < 0,0001	<u>0,371</u> < 0,0001	<u>0,247</u> < 0,0001	<u>0,150</u> 0,001	<u>0,209</u> 0,0004	<u>0,123</u> 0,044	<u>0,283</u> < 0,0001	<u>0,105</u> 0,002

Met CO₂ uitgemiddeld over perioden van bezetting van beproefde ruimten

Bron: Anses, Concentrations de CO₂ dans l' air intérieur et effets sur la santé, Avis de l'Anses - Rapport d' expertise collective (juli 2013), annex 3 (O. Ramalho et al., 2013)

Tabel 8 Literatuurstudie naar de correlatie tussen CO₂ en binnenluchtpolluenten ter gelegenheid van binnenluchtmeetcampagnes wereldwijd

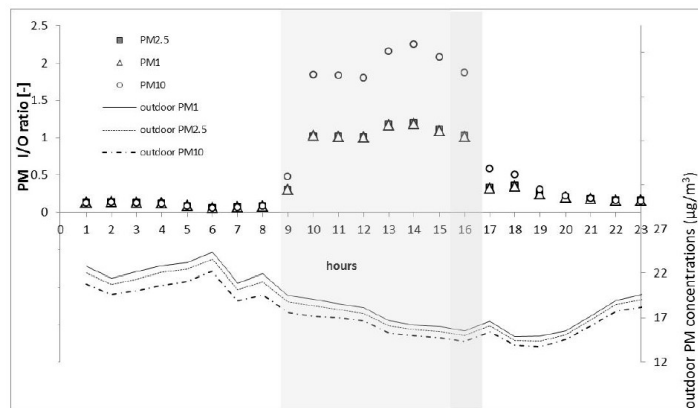
Bron: Ramalho et al., 2015

CO ₂ Correlatie (Ref. in publicatie)	Residentiële gebouwen			Niet-residentiële gebouwen					
	Survey I	[49]	[50, 51]	Survey II	[42]	[45]	[46]	[47]	[48]
	Frankrijk	Canada	Frankrijk	Frankrijk	UK	China	Frankrijk	Duitsland	Canada
	Woningen	woningen	woningen	kinderdagverblijven kleuterscholen lagere scholen	scholen	scholen	scholen	scholen	kinderdagverblijven
	567 locaties	59 locaties	resp. 61, 196 locaties	310 locaties 896 ruimten	6 locaties 18 klassen	10 locaties 31 klassen	8 locaties	64 locaties 70 klassen	21 locaties
	7 dagen			4,5 dagen					
Formaldehyde	✓	✓	✓	✓		x			x
Acetaldehyde	✓	✓	✓						✓
Acroleïne	✓	✓							
Benzeen	✓			✓	✓				
PM₁					✓				
PM₂							✓	✓	
PM_{2,5}	✓							✓ (*)	
PM₃							✓	✓	
PM₁₀	✓				✓			✓ (**)	
(*)	zomerperiode niet significant, winterperiode significant								
(**)	zomer- en winterperiode beide significant								

In een meetcampagne in achttien klaslokalen van zes Londense scholen (Chatzidiakou 2014, zie tevens Ref. [42] in Tabel 8) werd de indoor CO_2 -concentratie omschreven als een maat voor de binnentemperatuur, fijn stof en VOS, met uitzondering van verkeersgerelateerde luchtpolluenten (met NO_2 als typisch voorbeeld).

De auteurs toonden het verband tussen de concentratie van PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ en PM_1 stoffracties en de bezettingsgraad van beproefde klaslokalen aan, een effect dat zich vooral uit voor PM_{10} deeltjes vanwege resuspensie van depositiestof ten gevolge van de bezetting van het klaslokaal.

Figuur 4 illustreert deze verbanden tussen luchtpolluentconcentraties in een klaslokaal.



Bron: Chatzidiakou (2014)

Figuur 4 Uurgemiddelde I/O ratio en outdoor concentraties van drie PM-fracties gedurende één dag (buiten het stookseizoen)

Uit het bovenvermeld Frans onderzoek (cf. survey I en II) blijkt echter ook dat CO_2 niet geschikt is als unieke indicator voor binnenluchtkwaliteit.

Beschouw daartoe Figuur 5.

In dit onderzoek (in residentiële en niet-residentiële gebouwen) bleek dat bij een CO_2 -concentratie lager dan 750 ppm (cf. IDA 1 klasse met hoge binnenluchtkwaliteit) de richtwaarde voor het binnenmilieu zoals geformuleerd door Anses (en tevens deze van BiMi 2004) alsnog overschreden werd:

- Voor formaldehyde (met richtwaarde $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$):
overschrijding in 82 % van de woningen en 44 % van de niet-residentiële gebouwen,
- Voor benzeen (met richtwaarde $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$):
overschrijding in 40 % van de woningen en 44 % van de niet-residentiële gebouwen.

Vanuit de veronderstelling dat CO_2 een sluitende indicator voor de binnenluchtkwaliteit zou zijn, moet bij een CO_2 -concentraties lager dan 750 ppm (cf. meest stringente eis overeenkomstig EN 13779) het aantal overschrijdingen van de grenswaarde voor beide carcinogene stoffen nul te zijn, wat niet gemeten wordt. Toch wordt ook vastgesteld dat bij een dalende CO_2 -concentratie (lees strengere binnenluchtkwaliteitseisen in kader van ventilatiestrategie) het aantal overschrijdingen van de richtwaarde voor elk van de gemeten binnenluchtpolluenten in de woningen survey gevoelig daalt (uitgezonderd voor formaldehyde): tot 40 % voor benzeen en acetaldehyde, 48 % voor acroleïne.

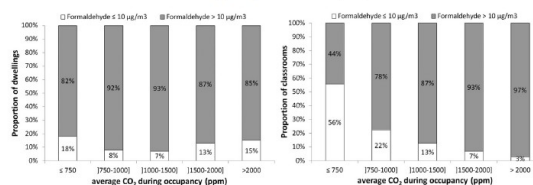


Fig. 4. Proportion of dwellings (left) and classrooms (right) that exceeds the formaldehyde guideline value according to CO₂ concentration averaged on the occupancy period.

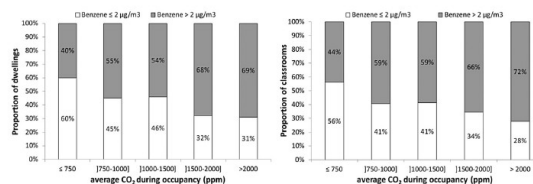


Fig. 5. Proportion of dwellings (left) and classrooms (right) that exceeds the benzene guideline value according to CO₂ concentration averaged on the weekly occupancy period.

Bron: Ramalho et al. 2015

Figuur 5 Overschrijding van de ANSES richtwaarden voor binnenluchtpolluenten als functie van de CO₂-concentratie ter gelegenheid van een grootschalige Franse onderzoek in residentiële en niet-residentiële gebouwen

Voor beide stoffracties werd dezelfde tendens vastgesteld, zei het wel in mindere mate: Het aantal overschrijdingen bij CO₂-concentraties lager dan 750 ppm bedraagt 74 % voor de PM₁₀ fractie (met Anses richtwaarde 20 µg/m³), en zelfs 88 % voor de PM_{2.5} fractie (met Anses richtwaarde 10 µg/m³). Een CO₂-concentratie lager dan 750 ppm, is bijgevolg geen garantie voor luchtconcentraties van binnenluchtpolluenten onder de respectievelijke richtwaarden.

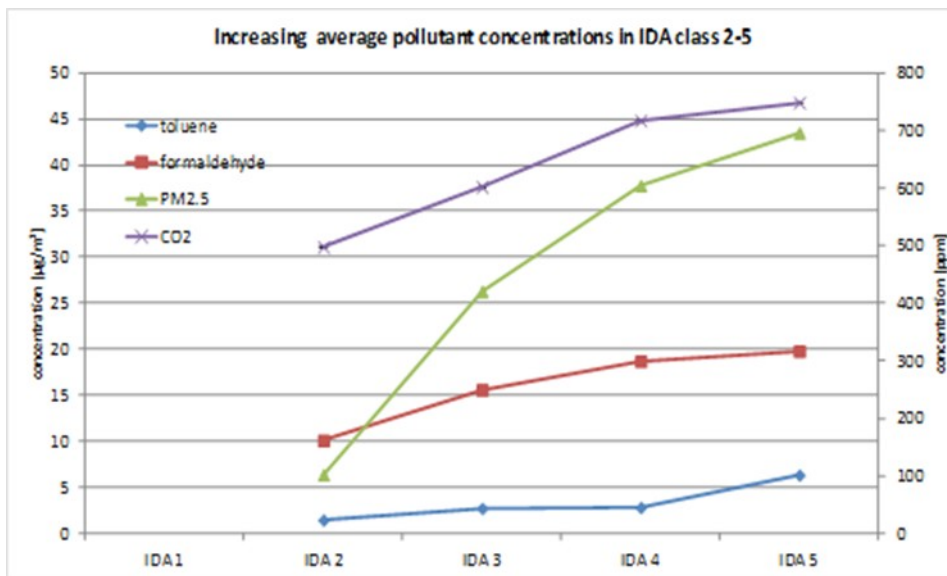
In de grootschalige Franse survey in niet-residentiële gebouwen (cf. survey II) werd eenzelfde tendens vastgesteld, met een daling van het aantal overschrijdingen van de grenswaarde tot 44 % voor benzeen en formaldehyde. De auteurs benadrukken het belang van preventie van binnenluchtpollutie via bronreductie, als onderdeel van een geïntegreerde ventilatiestrategie. Op basis van de beschikbare gegevens van het onderzoek kan echter niet opgemaakt worden of de lagere CO₂-concentratie in de gebouwen te wijten is aan een lagere bezettingsgraad dan wel een betere ventilatie.

In het verkennend onderzoek Schone Lucht Lage Energie (Stranger et al. 2012) uitgevoerd in opdracht van LNE, werd de binnenluchtkwaliteit bepaald in 51 lage-energie gebouwen in Vlaanderen, waarvan 25 woningen en 26 klaslokalen. In deze studie werd de binnenluchtkwaliteit beschouwd in functie van het totale ventilatievoud, en niet het CO₂-gehalte. Dit totale ventilatievoud werd bepaald op basis van lektheidsmetingen, gecombineerd met luchtdebietsmetingen van het ventilatiesysteem.

In de klaslokalen werd het IDA-classificatiesysteem (in overeenstemming met EN standaard 13779), met classificatie op basis van het totale ventilatievoud rekening houdend met de klasbezetting, een geschikte indicator bevonden voor de aanwezigheid van een aantal van de gekarakteriseerde chemische en fysische contaminanten in het binnenmilieu (PM_{2.5}, CO₂, formaldehyde en in mindere mate toluen). De binnenconcentraties van deze componenten vertoonden de tendens om toe te nemen met de IDA-klasnummer. Opmerkelijk is ook hier de associatie tussen CO₂- en formaldehyde-concentraties in klaslokalen (zie Figuur 6).

In de woningen werd echter geen verband tussen totaal ventilatievoud en IAQ gevonden.

Merk op dat IDA 5 niet bestaat volgens de norm. Deze werd aanvullend gedefinieerd, omdat een aantal klaslokalen een duidelijk lager ventilatievoud had dan de laagste IDA-klasse in de norm.



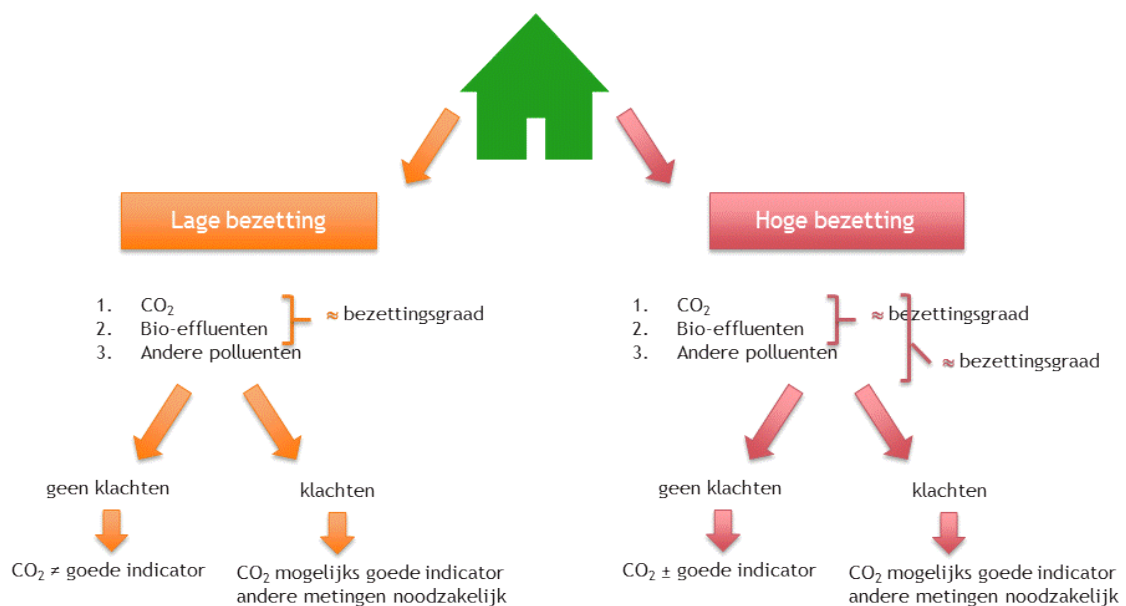
Bron: Schone Lucht Lage Energie, LNE 2012

Figuur 6 Luchtconcentraties in klaslokalen in functie van het totale ventilatievoud van de lokalen (waarbij het totaal aantal leerlingen in de klas in rekening wordt gebracht)

Op basis van beschikbare literatuur over het verband tussen CO₂ en chemische agentia kan geen sluitende relatie tussen het voorkomen van de parameters in residentiële en niet-residentiële omgevingen vastgesteld worden. Zowel de geassocieerde pollutanten als de sterkte van de correlaties variëren. Onderzoekers zijn het er echter wel duidelijk over eens dat het ventilatievoud zelf (niet berekend op basis van CO₂), een belangrijke bepalende factor is voor de kwaliteit van de binnenlucht. De meetmethode van het ventilatievoud blijft een moeilijke keuze, al blijkt een gecombineerde bepaling van de luchttoevoer via het ventilatiesysteem en de lekdichtheid van de woning één van de meest accurate meetmethoden.

HOOFDSTUK 4. AANBEVELINGEN VOOR BINNENLUCHT MEETCAMPAGNES MET BETREKKING TOT CO₂-LUCHTMETINGEN

Op basis van heersende ventilatienormen en praktijkrichtlijnen, en vaststellingen uit de wetenschappelijke literatuur, wordt het gebruik van CO₂ als indicator voor de kwaliteit van het binnenmilieu met oog op comfort (cf. Perceived Air Quality) en de gezondheid (cf. Indoor Air Quality) van gebruikers van residentiële en niet-residentiële gebouwen, geadviseerd volgens het schema zoals getoond in Figuur 7.



Figuur 7 Is CO₂ een goede indicator voor de kwaliteit van het binnenmilieu?

Hierbij wordt volgende gedachtegang voorgesteld:

- Bij een **lage bezettingsgraad** werd aangetoond dat CO₂ in het binnenmilieu gecorreleerd is met bio-effluenten. Het voorkomen van andere polluenten is echter functie van binnenactiviteiten, van de gebouwschil, van de buitenlucht en ook van ventilatie.
 - o In gebouwen **zonder gezondheidsklachten**, kan CO₂ niet gehanteerd worden als indicator van het BiMi. Dit omdat de verwachte concentratie eerder laag is, en een relatie met het voorkomen van andere polluenten onwaarschijnlijk is.
 - o In gebouwen **met gezondheidsklachten**, kan CO₂ mogelijk een goede indicator zijn. Dit bijvoorbeeld in gebouwen waar het ventilatiesysteem niet optimaal werkt.
- Bij een **hoge bezettingsgraad** werd eveneens aangetoond dat CO₂ in het binnenmilieu gecorreleerd is met bio-effluenten, maar daarnaast zijn er ook een aantal studies die aantonen dat een aantal andere polluenten, bijvoorbeeld PM₁₀ of formaldehyde, gecorreleerd kunnen zijn met CO₂.
 - o In gebouwen **zonder gezondheidsklachten**, kan CO₂ beschouwd worden als indicator voor bepaalde polluenten in het binnenmilieu, zoals PM₁₀ of formaldehyde. Dit geldt echter niet voor alle polluenten, zoals polluenten die afkomstig zijn van de buitenomgeving.

- o In gebouwen **met gezondheidsklachten**, kan CO₂ mogelijk een goede indicator zijn. Dit bijvoorbeeld in gebouwen waar het ventilatiesysteem niet optimaal werkt. Echter, aanvullende metingen zijn nodig om uit te sluiten dat de gezondheidsklacht gerelateerd is aan bronnen die geen functie zijn van gebouwbezetting of activiteiten van de gebouwgebruikers.

In de wetenschappelijke literatuur wordt echter nooit duidelijk gedefinieerd vanaf welke bezetting men praat over een 'hoge bezettingsgraad'. In publicaties wordt het onderscheid eerder gemaakt op basis van de doeleinden van het gebouw/lokaal. Zo worden klaslokalen, kinderopvang en kantoren typisch beschouwd als lokalen met 'hoge' bezettingsgraad, terwijl woningen beschouwd worden als gebouwen met 'lage' bezettingsgraad.

In de geest van de EN norm 15251 worden luchtmetingen van specifieke pollutanten waaronder formaldehyde, VOS en fijn stof (PM₁₀ of PM_{2.5}) voornamelijk aangeraden bij (gezondheids)klachten van bewoners in residentiële gebouwen (cf. klachten indien lage bezetting) of gebruikers van niet-residentiële gebouwen (cf. klachten indien hoge bezetting, typisch in kinderdagverblijven, scholen en kantoorruimten).

Meer specifiek, in het kader van klachteninventarisatie (cf. lokaliseren en inschatten grootteorde concentratie luchtpolluenten) zullen CO₂-metingen worden uitgevoerd:

- In woningen (waar de verwachte ΔCO₂-concentratie laag is), met de bedoeling na te gaan of slecht functioneren of onvoldoende onderhoud van het mechanische ventilatiesysteem aan de basis ligt van de klachten binnenkamers; CO₂ fungeert hier als maat voor de luchtverversing (tevens indicatief te gebruiken indien natuurlijke ventilatie). In deze context kan CO₂ gebruikt worden als sensibilisatie-instrument in projecten rond binnenmilieu, maar dan enkel als maat voor luchtverversing.
- In niet-residentiële gebouwen (typisch met hoge bezettingsgraad): CO₂ is indicator van discomfort vanwege hoge concentraties bio-effluenten (cf. ervaren luchtkwaliteit of perceived air quality).
- Via CO₂-metingen kan mogelijk de concentratie van luchtpolluenten vanwege bronnen en menselijke activiteiten (cf. niet-persoonsgebonden pollutie) worden geschat op grond van correlatie tussen CO₂-concentraties en concentraties van betrokken luchtpolluenten, dit in niet-residentiële gebouwen met hoge bezettingsgraad waar klachten vanwege de gebruikers zich manifesteren.

In ruimten met hoge bezetting fungeert CO₂ tevens als waardemeter voor remediërende acties bij klachten, met name optimalisatie van het ventilatiesysteem en/of bijkomende bronreductie.

In klachtenvrije woningen, typisch gekenmerkt door lage ΔCO₂-waarden is het weinig relevant CO₂-metingen uit te voeren, tenzij als controleparameter binnen de ventilatiestrategie (cf. vraaggestuurde ventilatie op basis van CO₂-meting) of als onderdeel van surveillance metingen in beleidsondersteunend kader (met het binnenmilieubesluit als toetssteen).

CO₂ is een goede indicator van binnenluchtkwaliteit in klachtenvrije gebouwen met hoge bezetting.

De bijdrage van het gebouw en de buitenomgeving tot de binnenmilieukwaliteit is minimaal geacht, en dit op basis van de afwezigheid van geur- en acute gezondheidsklachten vanwege de gebruiker. Het afwezig zijn van klachten betekent echter niet dat er geen hinder is. Tevens is de omvang van geuite klachten vaak niet bruikbaar om de ernst van de situatie in te schatten. De keuze van "gezonde" materialen en consumentenproducten evenals een adequate filtratie van de

buitenlucht via het ventilatiesysteem zijn objectieve criteria waaraan strikt dient voldaan binnen dit meetconcept. Al bij het ontwerp van het gebouw en het ventilatiesysteem in het bijzonder dient hieraan de nodige aandacht besteed te worden (cf. het minimale ventilatiedebiet).

In de beleidsondersteunende studie te Frankrijk (Ramalho et al. 2015; Anses 2013) is gebleken dat de beoordeling van de binnenluchtkwaliteit op basis van CO₂-metingen een ontoereikend vangnet is voor residentiële en niet-residentiële gebouwen waar grenswaarden voor target indoor pollutanten worden overschreden ondanks lage CO₂-concentraties (zie Fig. 6). Tevens concludeerde Anses (cf. l' Agence nationale de sécurité sanitaire de l' alimentation, de l' environnement et du travail) dat er onvoldoende wetenschappelijke evidentie beschikbaar is teneinde een gezondheidskundige grenswaarde voor CO₂ in het binnenklimaat te definiëren (Stranger et al. 2012).

HOOFDSTUK 5. BEANTWOORDEN ONDERZOEKSVRAGEN

Probleem 1: Is CO₂ een goede indicator voor kwaliteit van het binnenmilieu/ventilatie?

CO₂ als indicator van binnenmilieu-kwaliteit:

CO₂ is in alle situaties een goede indicator van bio-effluenten in het binnenmilieu. In een ruimte met een hoge bezettingsgraad, zonder gezondheidsklachten van de gebouwgebruikers, kan CO₂ een indicator voor het binnenmilieu zijn. In ruimtes zonder gezondheidsklachten van de gebouwgebruikers maar met een lage bezettingsgraad, is CO₂ geen goede indicator van de binnenluchtkwaliteit. In geval van gezondheidsklachten van gebouwgebruikers, kan CO₂ een goede indicator zijn van binnenluchtkwaliteit, bijvoorbeeld wanneer een ventilatiesysteem niet werkt, maar zijn aanvullende karakterisaties van het binnenmilieu noodzakelijk.

CO₂ als indicator van ventilatie

Het ventilatievoud is een goede indicator van ventilatie, indien juist gemeten, wat voornamelijk bij natuurlijke ventilatie moeilijk is. Bij een voldoende hoge bezettingsgraad kunnen CO₂ piekconcentraties een goede maat voor ventilatie, dan wel op voorwaarde dat een steady-state (een evenwichtssituatie) in de ruimte bereikt wordt. Echter, indien de luchtverversingsgraad in een ruimte erg laag is, zal deze steady-state nooit voorkomen, waardoor CO₂ metingen moeilijker/niet bruikbaar is als maat voor het kwantificeren van ventilatie. Indicatief kan je CO₂ in sensibilisatieprojecten gebruiken als indicator voor voldoende luchtverversing.

Probleem 2: Is CO₂ een goede indicator in elke setting?

Bij een hoge bezettingsgraad kan CO₂ een goede indicator voor de kwaliteit van het binnenmilieu zijn. Hoeveel personen met m² dit inhoudt wordt in de literatuur niet gespecificeerd; gebouwen worden echter onderverdeeld naargelang het beoogde gebruik. Hoge bezettingsgraad zijn typisch klaslokalen, kinderopvangcentra en kantoorgebouwen. Lage bezettingsgraad zijn residentiële woningen.

Probleem 3: Wanneer wordt CO₂ een goede indicator?

CO₂ is in alle situaties een goede indicator van bio-effluenten in het binnenmilieu. In een ruimte met een hoge bezettingsgraad, zonder gezondheidsklachten van de gebouwgebruikers, kan CO₂ een indicator voor het binnenmilieu zijn.

Probleem 4: Zijn er andere indicatoren?

Veel gebruikte andere indicatoren voor comfort en kwaliteit van binnenmilieu zijn temperatuur, relatieve vochtigheid, VOS (totaal), deeltjes (PM_x), licht, geluid en telling van het aantal aanwezigen.

Voor elk van deze parameters bestaan, naast de analytische, kwantitatieve meetmethoden, "low-cost" sensoren, die de kwaliteit van het binnenmilieu relatief eenvoudig en in real-time indicatief (dus niet kwantitatief) kunnen evalueren en d.m.v. directe feedback aan gebouwgebruikers een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan sensibiliseren en informeren (Indoor@Box).

Probleem 5: Wat zijn de goede indicatorwaarden indien CO₂ een goede indicator is?

Literatuuronderzoek heeft aangetoond dat er weinig studies zijn waarbij de CO₂-concentratie in het binnenklimaat is gerelateerd aan de analyse van gezondheidsklachten vanwege de gebruikers van residentiële en niet-residentiële gebouwen. Een gezondheidskundige advieswaarde voor CO₂ in het binnenmilieu werd bijgevolg niet gedefinieerd.

In een aantal Europese landen is echter de basis-eis voor ventilatie gecombineerd met een CO₂ grenswaarde als aanvullende eis. Deze varieert van 900 ppm tot 5000 ppm, met 1200 ppm als typische waarde (cf. middelmatige binnenluchtkwaliteit IDA 3, indien buitenlucht concentratie 400 - 500 ppm). In deze context fungeert CO₂ dan als maat voor comfort, bij aanwezigheid van persoonsgebonden vervuiling en maximale bezetting van niet-residentiële gebouwen (typisch scholen en kantoren). Het betreft geen gezondheidskundige toetsingswaarde.

Literatuurlijst

Anses, Carbon dioxide (CO₂) in indoor air - Concentrations and health effects, Updated on 10/09/2013. Overgenomen van: <https://www.anses.fr/en/content/carbon-dioxide-co2-indoor-air>

Anses, Concentrations de CO₂ dans l' air intérieur et effets sur la santé, Avis de l'Anses – Rapport d' expertise collective, juli 2013

Bijlage X Ventilatievoorzieningen in niet-residentiële gebouwen: bepalingsmethode en eisen, September 2011 (Bijlage HVNR) Overgenomen van: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/epb/doc/bijlage10_20110908.pdf

CEC. 1992. Guidelines for Ventilation Requirements in buildings. Report No. 11, European Concerted Action Indoor Air Quality & Its Impact on Man. Commission of the European Communities, Brussels

Chatzidiakou E., Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in school classrooms, PhD thesis volume I, UCL Institute for Environmental Design and Engineering - The Bartlett University College London, September 2014 Overgenomen van : <http://discovery.ucl.ac.uk/1469440/>

Fanger P.O., Discomfort Caused by Odorants and Irritants in the Air, Indoor Air 1998; Suppl. 4: 81-86 Overgenomen van: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1998.tb00013.x/abstract>

Haverinen-Shaughnessy U., Shaughnessy R.J. Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. PLoS ONE 10(8): e0136165. doi:10.1371/journal.pone.0136165 2015

M. Stranger et al., Clean Air, Low Energy - Schone Lucht, Lage Energie, Verkennend onderzoek naar de binnenmilieukwaliteit van duurzame gebouwen: invloed van buitenmilieu en ventilatie, Studie uitgevoerd in opdracht van LNE en VEA, VITO-rapport 2012/MRG/R/363, November 2012. Overgenomen van: https://www.lne.be/themas/milieu-en-gezondheid/onderzoek/rapport_Clean_Air

Mendell M. J., Eliseeva, A., Davies M., Spears M., Lobscheid A., Fisk W. J., Apte M. G.. Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools. Indoor Air 23 (6), 515–528, 2013

NBN D50-001: 1991 Ventilatievoorzieningen in woongebouwen

NBN EN 13779 NL: 2010 Ventilatie voor niet-residentiële gebouwen - Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingsystemen

NBN EN 15251: 2007 Binnenmilieu-gerelateerde inputparameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek

Persily A., Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62, [Building and Environment Volume 91](#), September 2015, Pages 61 – 69 Overgenomen van: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000839>

Persily A., Indoor carbon dioxide concentrations in ventilation and indoor air quality standards, Proceedings of 36th AIVC, Conference on effective ventilation in high performance buildings September 23-24, 2015 Madrid, Spain. Overgenomen van: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=919027

Persily A.K., Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide, 1997 overgenomen van: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/FY2BP_HSP/um/indoorCO_b97044.pdf

Petersen S., Jensen K.L., Pedersen A.L., Rasmussen H.S. The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children. *Indoor Air*. 2016 26(3), 366-79.

Ramalho O. et al., Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values, *Building and Environment* 93 (2015) 115 - 124

Satish U. et al., Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance, *Environmental Health Perspectives*, volume 120, number 12, December 2012. Overgenomen van: <http://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/120/12/ehp.1104789.pdf>

Swaans W., M. Stranger, S. Verbeke, Studie uitgevoerd in opdracht van Agentschap Zorg en Gezondheid, Binnenhuismilieu referentietaak 2: IDA klassen - Eindrapport, VITO rapport 2015/RG/R/0453, April 2016

Ventilatie van kantoorgebouwen, Naar een betere formulering van de eisen ..., Versie 29 augustus 2005, Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Afdeling Bouwfysica en Binnenklimaat Overgenomen van: http://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?dtype=publ&doc=hybvent_nl.pdf&lang=nl

Zhang X. et al., Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance, *Indoor air* 2016. Overgenomen van: https://www.researchgate.net/publication/292381995_Effects_of_Exposure_to_Carbon_Dioxide_and_Bioeffluents_on_Perceived_Air_Quality_Self-assessed_Acute_Health_Symptoms_and_Cognitive_Performance

Zhang X., Wargocki P., Lian Z. Effects of Exposure to Carbon Dioxide and Human Bioeffluents on Cognitive Performance. *Procedia Engineering*, 121, 138-142, 2015.