Vlaanderen
is omgeving

Ventilatieprestaties in culturele centra in Vlaanderen

DEPARTEMENT
OMGEVING

omgeving.vlaanderen.be

Ventilatieprestaties in culturele centra in Vlaanderen
Deze studie vond plaats in 2022, tijdens de coronapandemie, en richt zich op cultuurhuizen. VPO gebruikte voor dit onderzoek sensorboxen, die ontwikkeld werden in samenwerking met VITO, de indoor@boxen om de luchtkwaliteit en ventilatie-effectiviteit op te volgen. De focus in dit onderzoek ligt op het meten van de CO_2-concentratie, aangezien dit een goede proxi is voor luchtkwaliteit. Complementair hieraan, werd ook een doorlichting van het ventilatiesysteem door een gespecialiseerde firma uitgevoerd. Uit de studie blijkt dat bij de meeste cultuurhuizen in ruimtes waar mensen langdurig verblijven vaak waarden gemeten worden hoger dan 900 ppm, de gezondheidsrichtlijn, en indicator voor voldoende ventilatie. De combinatie van CO_2-metingen en technische screenings vullen elkaar goed aan en tonen concreet waar verbeteringen mogelijk en/of nodig zijn.

De verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit rapport ligt bij de auteurs.

COLOFON

Verantwoordelijke uitgever
Toon Denys
Departement Omgeving
Koning Albert II-laan 15 bus 553, 1210 Brussel
www.omgevingvlaanderen.be

Een uitgave van het Departement Omgeving, **Vlaams Planbureau voor Omgeving**
vpo.omgeving@vlaanderen.be

Auteurs team Omgeving & Gezondheid, Vlaams Planbureau voor Omgeving, Departement Omgeving

Team Omgeving & Gezondheid, Departement Omgeving

Publicatiedatum
oktober 2024

Depotnummer
D/2024/3241/354

SAMENVATTING

Ventilatie beïnvloedt de kwaliteit van het binnenmilieu. De kwaliteit van de binnenlucht (IAQ[1]) draagt bij aan de totale persoonlijke blootstelling van bewoners van een gebouw aan bepaalde verontreinigende stoffen en is daarom een belangrijke milieudeterminant van gezondheid. Onderzoek toont aan dat Europese burgers gemiddeld 90% van hun tijd binnen doorbrengen. De Vlaamse overheid, en meer bepaald Departement Omgeving, voert sinds 2007 onderzoek uit naar IAQ in woningen en scholen om het beleid te informeren en te ondersteunen. In 2019 ontwikkelde het Vlaams Planbureau voor Omgeving van Departement Omgeving, samen met VITO een sensorbox met innovatieve en hoogwaardige sensortechnologie — de indoor@box genaamd — waarmee een aantal verontreinigende stoffen en parameters continu en in realtime kunnen worden gemeten. Dit maakt het mogelijk om resultaten realtime te communiceren, om veel gegevens over langere periodes te verzamelen en om verbanden te leggen met andere gegevens (bv. het weer, vragenlijsten, bezettingsgraden).

Met deze indoor@boxen voert Departement Omgeving sinds 2020 verschillende meetcampagnes uit in (semi-)openbare gebouwen waar mensen samenkomen of verblijven, zoals scholen, sportcentra, woonzorgcentra en culturele centra. De analyse richt zich vooral op CO_2-metingen en ventilatieprestaties. De rapporten geven concrete adviezen die rekening houden met de specifieke situatie van het gebouw, zodat de ventilatie verbetert. Daarnaast is het onderzoek beleidsondersteunend: de bestaande richtlijnen voor IAQ, meer bepaald de CO_2-waarden, werden tijdens de COVID-19 pandemie belangrijk in (semi)publieke gebouwen. Het onderzoek en de metingen laten toe om na te gaan of die richtlijnen haalbaar en effectief zijn voor de verschillende sectoren. De ventilatieprestaties worden beoordeeld dankzij een grondige technische doorlichting van de aanwezige ventilatiesystemen.

In de meest recente campagnes — die bij woonzorgcentra en bij cultuurhuizen — zijn er twee meetperiodes per locatie. Tussendoor is er bij de cultuurhuizen een technische doorlichting van het aanwezige ventilatiesysteem. Dit rapport gaat dieper in op de meetcampagne in tien verschillende culturele centra in Vlaanderen en Brussel, die varieerden in grootte, gebouwtype, ventilatiesysteem en publiekscapaciteit. Over het algemeen kunnen de ventilatiesystemen van de culturele centra bij hogere bezittingsgraden, niet voldoen aan de CO_2-richtlijnen, die van kracht waren tijdens de COVID-19 pandemie. De aanwezigheid van een ventilatiesysteem met voldoende debietimpuls, in verhouding tot de maximale capaciteit van de evenementenruimte, garandeert niet altijd gewenste CO_2-waarden. Bijkomende parameters hebben een invloed, bv. instellingen van het ventilatiesysteem, activiteitsgraad en debiet per persoon (m^3/uur/persoon), samenstelling van het publiek, onderhoud en beheer van het systeem... De combinatie van CO_2-metingen en technische screenings vullen elkaar goed aan en tonen precies aan waar verbeteringen nodig zijn. In de toekomst zouden de bevindingen van dit onderzoek kunnen worden samengevat en opgenomen in technische richtlijnen.

[1] IAQ staat voor Indoor Air Quality.

INHOUDSTAFEL

1 Inleiding 5
2 Eerder onderzoek 5
3 Materiaal en methode 7
3.1 Onderzoek in 10 culturele centra in Vlaanderen en Brussel 7
3.2 Metingen met de indoor@box: ventilatie-efficiëntie op basis van CO_2-waarden 9
3.3 Nazicht van de ventilatieinfrastructuur 10
3.4 Nazicht van de effectiviteit van de ventilatiesystemen via debietsmetingen en bezettingsgraad 11
4 Resultaten 11
4.1 Vergelijking globale CO2 resultaten en advieswaarden 12
4.2 ventilatie en maximale zaalbezetting 13
4.3 Ventilatiesystemen gelinkt aan de publiekscapaciteit en gemeten CO2 waarden 13
5 Besluit 15
6 Bedanking 15
7 Bibliografie 15

1 INLEIDING

De kwaliteit van de binnenlucht (IAQ) draagt bij aan de totale persoonlijke blootstelling van mensen in gebouwen aan bepaalde verontreinigende stoffen en is daarom een belangrijke milieudeterminant van gezondheid (Hoge Gezondheidsraad, 2017). Onderzoek toont aan dat Europeanen gemiddeld 90% van hun tijd binnen doorbrengen (Fernandes et al., 2009). Dit maakt een gezonde binnenluchtkwaliteit zeer belangrijk. De prestatie van (mechanische) ventilatie heeft invloed op de kwaliteit van het binnenmilieu. Met prestaties bedoelen we (1) de ventilatie-efficiëntie die aangeeft hoe efficiënt de verontreinigende stoffen in de lucht uit de ruimte worden verwijderd en (2) hoe efficiënt de verse lucht in de ruimte wordt verspreid door middel van luchtuitwisseling (Atkinson et al., 2009). In dit onderzoek hebben we de prestaties van de ventilatiesystemen beoordeeld dankzij grondige technische screenings van de systemen: we verzamelden informatie over de instellingen en luchtdebietmetingen en maakten andere berekeningen.

Binnenluchtkwaliteit kan veel parameters en vervuilende stoffen omvatten. In deze studie ligt specifieke focus op de CO2-niveaus als een indicatie voor ventilatie-effectiviteit, waarbij in tien verschillende culturele centra in Vlaanderen en Brussel gemeten werd. We gebruikten hiervoor de indoor@box, een sensorapparaat ontwikkeld samen met VITO. De CO2-resultaten werden gekoppeld aan andere parameters zoals de actuele en maximale bezetting van de ruimte, de instellingen van het ventilatiesysteem en luchtstroommetingen en -berekeningen. Door deze verschillende aspecten te combineren kunnen we conclusies trekken over de prestaties van de ventilatiesystemen.

2 EERDER ONDERZOEK

Sinds 2007 voert Departement Omgeving onderzoek uit naar de binnenluchtkwaliteit in woningen en scholen om concrete adviezen te geven aan de deelnemers en om het beleid te ondersteunen. Met de opkomst van nieuwe technologie zoals sensoren en daarbij horende dataoverdracht, ontwierp het Departement in 2019 verschillende sensorboxen in samenwerking met VITO (Lazarov et al., 2019). Met deze sensorboxen — indoor@boxen genaamd — kunnen *realtime* metingen van een aantal binnenluchtverontreinigende stoffen en componenten worden doorgegeven, zoals:

- fijnstof (PM);
- koolstofdioxide (CO2);
- koolstofmonoxide (CO);
- stikstofdioxide (NO2);
- vluchtige organische stoffen (VOC);
- temperatuur;
- relatieve vochtigheid.

Bovendien kunnen met de indoor@boxes gegevens over langere perioden van bijvoorbeeld twee weken worden verzameld. Ze worden jaarlijks gekalibreerd, om accurate meetresultaten te garanderen.

Zoals beschreven in eerder onderzoek zorgde de COVID-19 pandemie tussen 2020 en 2022 in België en Vlaanderen voor een grote focus op CO_2-waarden en hoe efficiënt er wordt geventileerd (De

Mulder et al., 2023). De algemene richtlijnwaarden tijdens de COVID-19 pandemie waren als volgt: als de CO_2-concentratie lager is dan 900 ppm (of niet meer dan 500 ppm hoger dan de buitenconcentratie), beschouwen we de ruimte als goed geventileerd (Taskforce Ventilatie van het coronacommissariaat, 2021). In de praktijk komt 900 ppm voor een volwassene met een standaard lichte activiteit overeen met een ventilatiedebiet van 40 m^3/u/persoon verse buitenlucht. Bij waarden boven 900 ppm moeten maatregelen worden genomen om onder de 900 ppm te komen (Taskforce Ventilatie van het coronacommissariaat, 2021). CO2-waarden worden beschouwd als een goede proxy om de kwaliteit van de binnenlucht, de ventilatie en de beluchting te controleren, en als een belangrijke preventieve maatregel om potentiële besmetting door overdracht van virussen via de lucht te beperken (Geyskens & Stranger, 2016). Sinds 2020 gebruikt Departement Omgeving in haar onderzoek de CO2-waarden van 900 ppm en 1.200 ppm als richtlijnen om een beeld te krijgen van de ventilatieprestaties.

Tijdens de COVID-19 pandemie hadden openbare binnenlocaties waar veel mensen samenkwamen, snel inzicht nodig in de situatie van CO2-niveaus, en meer bepaald hoe de ventilatie verliep en of deze verbeterd kon worden. Locaties met kwetsbare bevolkingsgroepen en/of waar veel mensen samenkomen, zoals scholen, woonzorgcentra voor ouderen, sporthallen en centra voor concerten of culturele evenementen, waren interessante locaties bij uitstek. Daarom startte Departement Omgeving samen met andere overheidspartners (van verschillende beleidssectoren zoals gezondheid, onderwijs, en sport en cultuur) meerdere meetcampagnes in 2020; de laatste is gepland in scholen tijdens de winter van 2024. De meetcampagnes varieerden van 2 weken (voor sporthallen) tot 4 maanden (voor woonzorgcentra) en vonden zowel in de zomer als in de winter plaats. De verschillende meetcampagnes maakten het mogelijk om te onderzoeken of de CO2-richtwaarden van 900 ppm en 1200 ppm werden gehaald door de verschillende sectoren en indien niet wat mogelijke verbeterpunten zijn. Er zijn rapporten beschikbaar voor de resultaten in scholen (Mampaey et al., 2021) en voor woonzorgcentra (De Kempeneer et al., 2024).

Tot nu toe heeft het onderzoek geleid tot verschillende overkoepelende inzichten:

- Ventilatiegedrag speelt bijvoorbeeld een belangrijke rol als het gaat om binnenluchtkwaliteit.
- Daarnaast zijn de technische aspecten van de ventilatie en kennis hierover primordiaal. Tijdens het installeren van de sensorboxen merkten we dat mensen op locatie - ongeacht het type sector - vaak weinig kennis hebben over de aanwezigheid van een ventilatiesysteem, de manier waarop het werkt of wanneer het laatste onderhoud heeft plaatsgevonden.
- Op basis van onze bevindingen concluderen we dat investeren in vraag gestuurde (mechanische) ventilatie - een systeem dat CO2-waarden meet en bewaakt - bijdraagt aan een betere luchtkwaliteit. Het verlaagt consistent de CO2-concentraties in het binnenmilieu, en helpt dus om de overdracht van virussen door de lucht te verminderen. Maar ook andere technische factoren van de ventilatie blijven belangrijk, zoals onderhoud en een juiste dimensionering en beheer van het ventilatiesysteem, met een adequate relatie tot bezetting en activiteit.

In dit rapport richten we ons op de metingen die werden uitgevoerd in culturele centra, en meer specifiek op de relatie tussen de CO2-metingen tijdens evenementen, het ventilatiesysteem, de instellingen ervan, en de feitelijke bezetting van de ruimte. Deze meetcampagne gaat verder dan eerdere campagnes in woonzorgcentra en scholen omdat er tussen twee meetperiodes een technische screening van het mechanische ventilatiesysteem werd uitgevoerd. Elk cultureel centrum ontving een gedetailleerd ventilatierapport met concrete aanbevelingen. De bedoeling was dat

culturele centra op basis van de screening bepaalde aanpassingen zouden doen en dat het effect daarvan bij de tweede meting terug te vinden zou zijn in de CO2-waarden. In de praktijk zagen we echter dat cultuurcentra niet in staat waren om hun systemen tussentijds aan te passen. Daarom worden de gegevens van de twee meetperioden samen als één dataset geanalyseerd. Daarnaast werden gegevens verzameld over activiteiten, bezetting en het berekende bijbehorende ventilatiedebiet in m^3/u/persoon en in relatie gebracht met de gemeten CO2-concentraties in de binnenlucht.

3 MATERIAAL EN METHODE

3.1 ONDERZOEK IN 10 CULTURELE CENTRA IN VLAANDEREN EN BRUSSEL

In dit rapport definiëren we "culturele centra", afgekort als CC, als alle soorten openbare gebouwen waar culturele evenementen plaatsvinden, zoals theater, concerten en podiumkunsten. In Vlaanderen en Brussel hebben de meeste steden minstens één cultureel centrum. Elk van deze gebouwen verschilt op het vlak van locatie, grootte, zaalcapaciteit, bouwleeftijd en type activiteiten. Bijna alle culturele centra zijn polyvalent op het vlak van activiteiten: muziekvoorstellingen (klassiek, pop, DJ, ...), theater, comedy, tentoonstellingen, cinema, staande of zittende activiteiten, enzovoort. Vaak bestaat een cultureel centrum uit verschillende zalen of evenementenruimtes die ook weer van elkaar verschillen. Globaal gezien zijn er ruimtes voor voorstellingen, voor ondersteunende activiteiten (bv. bar, vestiaire, inkomhal...) en ruimtes die zowel voorstellingen als ondersteunende activiteiten combineren (bv. bar/foyer, inkomhal/ticketbalie...). Dit rapport organiseert in tabel 1 de verschillende ruimtes binnen de tien culturele centra op basis van onderlinge verschillen en overeenkomsten.

Tabel 1 vat de volgende kenmerken samen:
(1) de locatie van de culturele centra[3];
(2) het type ruimte waar de metingen plaatsvonden[2]:
- voorstellingsruimte (voorstel.)
- ondersteunende ruimte (onderst.)
- combinatie voorstellings en ondersteunende ruimte (combi.)

(3) het type ventilatiesysteem in de verschillende ruimtes:
- mechanische balansventilatie (mech. bal)
- mechanische extractie (mech. extr.)
- mechanische ventilatie (mech. vent)
- geen mechanisch ventilatiesysteem (geen mech. vent)
- geen ventilatiesysteem (geen vent.): op basis van een visuele controle geen natuurlijk ventilatiesysteem kon worden gedetecteerd

(4) het aantal activiteiten dat plaatsvond in de eerste en tweede meetperiode;
(5) de maximale publiekscapaciteit van de evenementenruimte:
- zittende (zit.)

[2] Bijkomende informatie over het volume van de ruimte werd overwogen, maar dit is niet noodzakelijk aangezien het Vlaamse beleid zich baseerd op CO_2 per persoon.

- staand (st.)

(6) de regeling van het ventilatiesysteem:

- kloksturing (timer)
- manuele controle (man.)
- directe sturing (direct)

(7) de efficiëntie van de luchtuitwisseling in de verschillende ruimtes, gebaseerd op technische metingen en technisch advies van experts. Deze informatie werd samengevat op een beschrijvende manier met twee categorieën "optimaal" (opt.) en "niet optimaal" (niet opt.).
(8) het gemeten debiet/pulsie (m3/h).

De categorisering van de verschillende ruimtes waar metingen plaatsvonden is als volgt: 17 voorstellingsruimten, 5 ondersteunende ruimten en 4 ruimten die voorstellingsactiviteiten en ondersteunende activiteiten combineerden. 17 ruimtes hebben een mechanisch gebalanceerd ventilatiesysteem, een mechanisch ventilatiesysteem of een systeem met mechanische afzuiging (voornamelijk met kloksturing). Voor 5 ruimtes (ondersteunende ruimte 2.2, 3.2, 4.2, 6.2 en voorstellingsruimte 10.3) was het onbekend of er ventilatiesystemen aanwezig waren. Daarnaast zijn er 4 ruimtes waar geen mechanisch ventilatiesysteem aanwezig was (voorstellingsruimte 7.2 en 9.3, combinatieruimte 7.3 en ondersteunende ruimte 9.2), en één voorstellingsruimte (8.1) zonder ventilatiesysteem.

Tabel 1: Voornaamste kenmerken van de culturele centra, de onderzochte ruimtes en de ventilatietypes.

(1) Locatie CC[3]	(2) Type ruimte	(3) ventilatie-system	(4) Aantal activiteiten (periode 1 + 2)	(5) Max. Zaal capaciteit zittend/ staand	(6) Sturing vent. syst.	(7) Spoeling[4]	(7) Gemeten debiet/pulsie (m^3/h)
1. Hoofdstad	1. voorstel.	mech. bal.	11 + 11	1000 / 2000	timer	niet opt.	62.336
	2. voorstel.	mech. bal.	4 + 5	100 / 300	timer	niet opt.	13.316
	3. combi.	mech. bal.	11 + 11	geen info	timer	niet opt.	6.375
2. Gemeente	1. voorstel.	mech. bal.	2 + 8	428 zit.	man.	opt.	15.752
	2. onderst.	geen info	2 + 8	geen info	geen info	geen info	geen info
3. Gemeente	1.voorstel.	mech. bal.	2 + 10	329 zit.	timer	opt.	4.640
	2. onderst.	geen info	3 + 10	geen info	geen info	geen info	geen info
4. Gemeente	1. voorstel.	mech. bal.	7 + 9	402 zit.	timer	niet opt.	14.971
	2. onderst.	geen info	7 + 9	geen info	geen info	geen info	geen info
5. Stad	1. voorstel.	mech. bal.	3 + 14	290 / 670	timer	niet opt.	13.876
	2. onderst.	mech. bal.	3 + 4	150 st.	timer	geen info	1.124
6. Stad	1. voorstel.	mech. bal.	4 + 8	288 zit.	timer	geen info	11.041
	2. onderst.	mech. bal.	4 + 16	940 zit.	timer	geen info	25.756
	3. combi.	mech. extr.	5 + 12	NVT	timer	geen info	NA
	4. voorstelling	mech. bal.	3 + 9	803 zit.	timer & direct	geen info	24.514

[3] We definieerden steden als omgevingen met meer dan 50.000 inwoners en gemeenten als omgevingen met meer dan 5.000 inwoners in 2019.

7. Gemeente	1. onderst.	mech. bal.	1	NVT	timer	geen info	2.251
	2. voorstelling	geen mech. vent.	2 + 3	144 zit.	NVT	NVT	geen info
	3. combi.	geen mech. vent.	1	geen info	NVT	NVT	geen info
8. Gemeente	1. voorstel.	mech. bal.	2 + 5	480 st.	man.	opt.	8.791
	2. voorstel.	geen vent.	2 + 5	391 zit.	NVT	NVT	geen info
9. Stad	1. voorstel.	mech. bal.	3 + 9	127 zit.	direct	opt.	5.091
	2. onderst.	geen mech. vent.	4 + 4	geen info	NVT	NVT	geen info
	3. voorstel.	geen mech. vent.	6 + 3	130 zit.	NVT	NVT	geen info
10. Stad	1. voorstel.	mech. bal.	5 + 4	650 zit.	direct	opt.	29.794
	2. voorstel.	mech. vent.	2 + 2	400 st.	geen info	geen info	10.950
	3. voorstel.	geen info	4[5]	200 zit.	geen info	geen info	geen info

De indoor@boxen werden gedurende twee meetperioden gebruikt, telkens gedurende ongeveer twee weken: eenmaal in mei en juni, en eenmaal in oktober, november en december (2022). Over het algemeen waren er meer publieksevenementen gepland in de herfst dan in de lente. In totaal hebben we de CO2-niveaus gemeten tijdens ongeveer 290 evenementen. Tussen deze twee meetperiodes werden de ruimtes met mechanische ventilatie gescreend op de kenmerken van de ventilatiesystemen en het luchtdebiet (bv. regeling van het ventilatiesysteem volgens EN 13779:2004, gemeten debietpuls in m^3/u verse lucht volgens NBN EN 12792, NBN EN 13779 en EN12599 voor ventilatiekanaalmeting) en een beoordeling van de efficiëntie van luchtuitwisseling op basis van de locatie van de ventilatie- en afzuigpunten. Het is belangrijk op te merken dat de steekproef van gebouwen en voorstellingsruimten in dit onderzoek te klein is om generalisaties te maken voor alle culturele evenementencentra in Vlaanderen en Brussel. Toch volstaan de gegevens om een aantal beschrijvende uitspraken te doen.

3.2 METINGEN MET DE INDOOR@BOX: VENTILATIE-EFFICIËNTIE OP BASIS VAN CO_2-WAARDEN

De indoor@box kan verschillende verontreinigende stoffen kan meten, maar in deze meetcampagne werden alleen de CO2-meetresultaten gebruikt. De aanname is dat hoe hoger de CO2-concentratie is, hoe hoger de concentratie bioaerosolen (microdruppeltjes geproduceerd door ademhaling) die micro-organismen zoals bacteriën en virussen kunnen bevatten (Geyskens & Stranger, 2016). Naast contactoverdracht en druppeltransmissie kunnen deze zich ook via de lucht kunnen verspreiden. Bovendien is de CO2-concentratie een goede indicator voor de efficiëntie van ventilatie en beluchting in functie van de bezetting (Geyskens & Stranger, 2016).

[5] Voor die zaal hebben we alleen metingen voor de tweede periode, omdat alleen toen voorstellingen gepland waren.

Eén of meer indoor@boxen werden in de verschillende ruimtes van de tien culturele centra geplaatst. De indoor@box stuurt elke drie minuten een intervalmeting van de CO2-concentratie naar het dataplatform voor verdere analyse. Dankzij het platform is het mogelijk om de metingen in *realtime* te volgen, en om indien nodig in te grijpen wanneer de CO2-concentratie te hoog wordt. Metingen door de boxen leveren datapunten op die gecontroleerd kunnen worden aan de hand van de gezondheidsrichtlijnen van 900 en 1.200 ppm. Als tijdens een evenement de CO2-concentratie hoger wordt dan 900 ppm (of 500 ppm boven de buitenluchtconcentratie), is de ventilatiecapaciteit zoals die op dat moment wordt geleverd onvoldoende gezien de huidige bezetting. Concentraties boven 1.200 ppm moeten vanuit gezondheidsperspectief worden vermeden. Dit onderzoek rapporteert in welk percentage van de datapunten, tijdens gebeurtenissen, de CO2-concentratie hoger is dan 900 ppm (tabel 2), evenals hoeveel gebeurtenissen per ruimte een overschrijding van 900 ppm hebben (tabel 2).

Voor de tien culturele centra zijn aanvullende gegevens verzameld over de aard van de evenementen (die invloed heeft op het activiteitsniveau van het publiek, zoals zittend concert of DJ met dansend publiek,…), de bezetting (verkochte kaartjes) en de begin- en eindtijd van het evenement. Helaas konden niet alle culturele centra deze informatie verstrekken. Het is echter belangrijk voor de analyse om de duur van het evenement af te bakenen: op momenten zonder toeschouwers zijn de CO2-niveaus laag, terwijl ze tijdens evenementen duidelijk stijgen. Hiervoor werd een algoritme gebruikt waarbij alle plotselinge sterke stijgingen in CO2-concentraties worden geteld als gebeurtenissen, als zulke stijgingen plaatsvinden nadat mensen de locatie hebben betreden. Het einde van de voorstelling wordt gedefinieerd als na een significante daling van de piekwaarden. Elke gedefinieerde start van een gebeurtenis wordt gecombineerd met het daaropvolgende einde, dat gedefinieerd is door de genoemde afname in CO2-waarden, met een minimale tijdslimiet van 30 minuten en een maximum van 8 uur. Dit betekent dat de gebeurtenissen die voor de culturele centra worden gerapporteerd in kolom "Aantal activiteiten" van tabel 1 niet altijd volledig overeenkomen met de gebeurtenissen uit het algoritme. Een foutmarge kan bijvoorbeeld optreden als mensen een ruimte binnenkomen zonder optreden (bijvoorbeeld voor een repetitie) en ervoor zorgen dat de CO2 aanzienlijk stijgt. Het algoritme zal dit als een gebeurtenis noteren. Aan de andere kant, als de ventilatiesystemen goed werken tijdens de voorstelling, of als er een klein publiek bij de voorstelling is, treedt er geen significante CO2-stijging op. Dit wordt door het algoritme niet geregistreerd als een gebeurtenis. Deze foutmarge is aanvaardbaar omdat in principe alle situaties boven 900 ppm moeten worden vermeden.

3.3 NAZICHT VAN DE VENTILATIEINFRASTRUCTUUR

In de zalen met een mechanisch ventilatiesysteem werd de prestatie van het systeem geanalyseerd via luchtdebietmetingen (rooster- en/of kanaalmetingen). De mengsectie, indien geïnstalleerd, was uitgeschakeld tijdens de metingen, behalve in de voorstellingsruimten 6.2 en 6.4 (zie tabel 1 en 2), waar de mengsectie op 30% stond. De luchtgroepen en hun werking werden geanalyseerd. De pulsie-, extractieroosters en energierecuperatie werden voor elke ruimte in kaart gebracht, deels om de efficiëntie van de luchtuitwisseling te beoordelen, inclusief de regeling door kleppen. Het type luchtfiltratie en de staat van de filters werden ook beoordeeld. Pulsie en afzuigdebiet werden ook onderzocht om de balans te controleren (Tabel 1). Voor dit onderzoek werden alleen de ruimtes met een mechanisch systeem gescreend, omdat dit systeem bepaalt hoe de ventilatie van de ruimte plaatsvindt. We nemen hier alleen de volgende aspecten van de screening op voor verdere analyse: de werking van het systeem, de efficiëntie van de luchtuitwisseling en het debiet.

3.4 NAZICHT VAN DE EFFECTIVITEIT VAN DE VENTILATIESYSTEMEN VIA DEBIETSMETINGEN EN BEZETTINGSGRAAD

Aan culturele centra werd informatie gevraagd over de maximale bezetting van de ruimtes, alsook de effectieve bezetting per activiteit. Met deze informatie kan men bepalen of het ventilatiesysteem voldoende debiet levert voor de nominale capaciteit (N) en de werkelijke bezetting van de zaal. Het gemeten debiet van het mechanische ventilatiesysteem (Q_{mech} bepaald in m³/hr verse lucht) werd gebruikt om, op basis van zowel de werkelijke als de maximaal mogelijke bezetting, het debiet per persoon (m³/hr/persoon) te berekenen. Om 900 ppm (N900) te bereiken is een debiet van 40 m³/hr/persoon (V900) nodig voor 1.200 ppm (N1200) wordt dit 25 m³/hr/persoon (V1200), deze waarden zijn voor een MET (activiteitsgraad) gelijk aan 1,63 (Taskforce Ventilatie van het coronacommissariaat, 2021):

$$N_{900} = \frac{Q_{mech}}{V_{900}} \text{ or } N_{1200} = \frac{Q_{mech}}{V_{1200}} \quad (1)$$

Als niet aan deze waarden is voldaan, wordt de mogelijke maximale bezetting bepaald via het gemeten ventilatiedebiet. Daarnaast wordt het debiet bepaald dat nodig is om 900 of 1200 ppm te bereiken met de werkelijke bezetting. In deze analyse wordt rekening gehouden met de efficiëntie van de luchtuitwisseling.

4 RESULTATEN

In tien culturele centra is onderzocht of (1) het ventilatiesysteem van elke ruimte technisch in staat is om te voldoen aan de richtlijnen van 900 en 1200 ppm bij volledige capaciteit van de ruimte (berekend met een luchtstroom van 40 m3/u/pp voor 900 ppm, en 25 m3/u/pp voor 1200 ppm), en of (2) de CO2-waarden die werden gemeten met de indoor@boxen tijdens evenementen overeenkwamen met de technische specificaties van de ventilatiesystemen.

Tabel 2: Voornaamste resultaten van de CO2 metingen, de bezetting en de debieten per ruimte (in relatie tot de algemene gezondheidswaarden)

(1) Nr. Ruimte en locatie	(2) Percentage van de tijd waar CO_2>900ppm tijdens evenementen (Min. /Max.), gemeten met indoor@box	(3) Max. bezetting zan de zaal	(4) Nominale capaciteit (N900 / N1.200), volgens debiets-metingen	(5) Voldoende debiet bij max zaal-bezetting (900 ppm / 1.200 ppm)	(6) Min. aantal mensen bij CO_2>900 ppm[6]	(7) Percentage van de evenementen met CO_2>900 ppm, gemeten met indoor @box	(8) P1/P99 van de CO_2, metingen, gemeten met indoor @box
1.1	0 / 74	2000	1558/2493	No / Yes	1312	79	552 / 2940
1.2	0 / 68	300	333 / 533	Yes / Yes	35	31	541 / 1672
1.3	0 / 81	NA	159 / 255	NA	653	96	547 / 2571
2.1	0 / 77	428	394 / 630	No / Yes	151	50	622 / 1182
2.2	0 / 94	NA	NA	NA	NA	54	879 / 1104

[6] Enkel bij evenementen met gekende effectieve bezetting.

3.1	0 / 49	329	116 / 186	No / No	100	60	480 / 1607
3.2	9 / 63	NA	NA	NA	NA	75	524 / 2158
4.1	0 / 100	402	374 / 599	No / Yes	165	73	2463/ 5008
4.2	0 / 98	NA	NA	NA	108	22	723 / 1743
5.1	0 / 73	670	347 / 555	No / No	NA	63	600 / 2008
5.2	4 / 100	150	28 / 45	No / No	NA	100	1361/2832
6.1	0 / 83	288	276 / 442	No / Yes	150	67	781 / 1568
6.2	0 / 53	940	644 / 1030	No / Yes	850	19	560 / 1175
6.3	0 / 34	NA	NA	NA	60	92	519 / 1967
6.4	0 / 0	803	613 / 981	No / Yes	NA	0	566 / 798
7.1	0 / 65	NA	56 / 90	NA	NA	14	634 / 2048
7.2	0 / 54	144	NA	NA	NA	60	502 / 2541
7.3	0 / 76	NA	NA	NA	NA	63	501 / 1355
8.1	3 / 21	480	220 / 352	No / No	85	100	547 / 1098
8.2	20 / 93	391	NA	NA	80	100	848 / 1663
9.1	NA	127	127 / 204	Yes / Yes	NA	NA	NA
9.2	0 / 78	NA	NA	NA	NA	71	710 / 2337
9.3	0 / 84	130	NA	NA	NA	78	751 / 3025
10.1	0 / 75	650	745 / 1192	Yes / Yes	70	80	469 / 1725
10.2	0 / 76	400	274 / 438	No / Yes	200	75	546 / 2451
10.3	0 / 81	200	NA	NA	NA	80	568 / 2399

Tabel 2 vat de belangrijkste resultaten van het onderzoek samen. De tabel toont volgende zaken:
(1) de ruimtes die zijn onderzocht (voor meer details zie Tabel 1)
(2) het minimum en maximum percentage van de tijd dat een gemeten gebeurtenis 900 ppm overschreed, gebaseerd op indoor@box metingen
(3) de maximale publiekscapaciteit, gebaseerd op het ontwerp/beschikbare ruimte van de ruimte
(4) de maximale (nominale) publiekscapaciteit van de ruimte (voor 900 en voor 1200 ppm), gebaseerd op het gemeten debiet
(5) of er voldoende ventilatiecapaciteit is om CO2-waarden onder 900 of 1200 ppm te garanderen wanneer de ruimte op volle capaciteit is
(6) het minimum aantal bezoekers dat aanwezig was wanneer een overschrijding van 900 ppm werd gemeten tijdens een evenement (gebaseerd op evenementen met bekende capaciteit)
(7) het percentage evenementen waarbij de indoor@boxes CO2-niveaus hebben gemeten die 900 ppm overschreden
(8) de maximale P1 en P99 van alle evenementen waarbij de indoor@boxes CO2-waarden hebben gemeten. We kiezen P1 en P99 omdat maximale waarden belangrijk zijn in dit onderzoek, maar we willen toch bepaalde afwijkingen in de gegevens uitsluiten (bijvoorbeeld iemand die hoest op de sensor).

Op basis van tabel 1, tabel 2 en de andere verzamelde en geanalyseerde gegevens vatten we de bevindingen samen in 3 punten, waarbij we specifieke ruimtes als illustratie gebruiken.

4.1 VERGELIJKING GLOBALE CO2 RESULTATEN EN ADVIESWAARDEN

De resultaten van alle gemeten evenementen in de culturele centra laten toe om een paar conclusies te trekken. Met uitzondering van één voorstellingsruimte (6.4) was er in alle

voorstellingsruimten sprake van een CO2 overschrijding van de drempelwaarde van 900 ppm tijdens ten minste één evenement. De drempelwaarde van 900 ppm in de CO2-niveaus is overschreden tijdens 68% van de gemeten evenementen. De hoogste waarde die tijdens een evenement is gemeten is 5046 ppm. De metingen tonen aan dat de CO2-waarden in een voorstellingsruimte gemiddeld 900 ppm overschrijden tussen 1 en 70% van de duur van het evenement, met bij verschillende evenementen overschrijdingen gedurende meer dan 90% van de tijd. De meeste gemeten evenementen overschreden aanzienlijk de algemene gezondheidsrichtlijnen van 900 en 1200 ppm (en alsook de richtlijnen die van kracht waren tijdens de COVID-19 pandemie).

4.2 VENTILATIE EN MAXIMALE ZAALBEZETTING

Voor 14 van de ruimten waar er gemeten is, waren voldoende gegevens beschikbaar om te berekenen of het debiet van het aanwezige ventilatiesysteem (theoretisch) voldoende zou zijn, als de zaal op maximale publieksbezetting zou draaien. Om CO2-waarden onder de 900 ppm bij volledige publiekscapaciteit te garanderen, bleken slechts 3 ruimten (voorstellingsruimten 1.2, 9.1 en 10.1) voldoende ventilatiecapaciteit te hebben. Dit betekent dat in bijna 80% van de gevallen het ventilatiesysteem ondergedimensioneerd is of niet in staat is om CO2-waarden onder de 900 ppm te houden bij volledige publiekscapaciteit. In deze gevallen is de maximale publiekscapaciteit van de voorstellingsruimten tussen 4% en 65% hoger dan het ventilatiesysteem zou toelaten, met een piek van 81% (voorstellingsruimte 5.2). Om CO2-waarden te garanderen die onder 1200 ppm blijven, volstaan de ventilatiesystemen van 10 voorstellingsruimten. In de overige 4 ruimten, waar de dimensionering van het ventilatiesysteem geen waarden onder 1200 ppm kan garanderen, is vaak een ernstige ondermaatse dimensionering of een te laag gemeten debiet te zien, waar 17% tot 70% extra luchtdebiet nodig is om aan de 1200 ppm drempelwaarde te voldoen. Sommige ruimtes hebben ook een overgedimensioneerd ventilatiesysteem, met cijfers die variëren van 4% (voorstellingsruimte 6.1), tot 11% (voorstellingsruimte 1.2) en 13% (voorstellingsruimte 10.1) extra capaciteit van het luchtdebiet. Eén ruimte (voorstellingsruimte 9.1) heeft een ventilatiesysteem dat perfect gedimensioneerd is voor de maximale publiekscapaciteit.

4.3 VENTILATIESYSTEMEN GELINKT AAN DE PUBLIEKSCAPACITEIT EN GEMETEN CO2 WAARDEN

Een van de hypotheses van dit onderzoek is dat de resultaten van de CO2-metingen tijdens evenementen direct gerelateerd kunnen worden aan het ventilatiesysteem, de instellingen en de daadwerkelijke bezetting van de ruimte. In de praktijk bleken de CO2-waarden het resultaat te zijn van een complexer samenspel van talloze factoren, waarvan sommige niet altijd duidelijk waren. Deze complexiteit kan worden geïllustreerd aan de hand van enkele voorbeelden. Onze steekproef van voorstellingsruimtes met goed gedimensioneerde ventilatiesystemen is vrij klein (4 ruimtes): de analyse laat geen generalisaties toe. Het is echter opmerkelijk dat geen van deze ruimten in staat was om CO2-waarden onder 900 ppm te houden tijdens evenementen. Technische aspecten zoals de efficiëntie van de luchtverversing spelen een rol, net als het soort activiteit en de betrokkenheid van het publiek. Voorstellingsruimte 1.2, bijvoorbeeld, heeft theoretisch een goede dimensionering van het ventilatiesysteem om de CO2-waarden onder de 900 ppm te houden op volle capaciteit. Met een maximale capaciteit van 300 mensen voor de ruimte en een nominale capaciteit van 333 mensen om onder de 900 ppm te blijven op basis van het ventilatiesysteem, is er een overdimensionering van 11%. Om de CO2-waarden onder 1200 ppm te houden, is de overmaat zelfs 78%. Tijdens de twee meetperiodes in deze voorstellinsgruimte overschreden echter 31% van de

gebeurtenissen de drempelwaarde van 900 ppm tussen 5 en 68% van hun duur. Overschrijdingen van 900 ppm werden al gemeten bij een publiek van slechts 35 mensen. Deze resultaten kunnen worden verklaard doordat de instellingen van het ventilatiesysteem niet optimaal zijn, in het bijzonder de spoeling (zie tabel 1).

Een ander voorbeeld van een theoretisch goede dimensionering van het ventilatiesysteem is voorstellingsruimte 10.1. Met een maximale publiekscapaciteit van 650 en een nominale capaciteit van 745 om onder de 900 ppm CO2-waarden te blijven, is er een overmaat van 13%. Tijdens de meetperioden, met ongeveer 635 verkochte kaartjes, zat de voorstellingsruimte bijna op de maximale capaciteit, maar ruim onder de nominale capaciteit. De CO2-metingen geven echter aan dat er in 80% van de evenementen een overschrijding van 900 ppm is, variërend tussen 0 en 75% van de duur van het evenement. In bijna 50% van de gevallen zijn er ook overschrijdingen van 1200 ppm. Overschrijdingen van 900 ppm komen zelfs voor bij een werkelijke capaciteit van 70 personen. Volgens de technische gegevens is het ventilatiesysteem optimaal wat betreft de spoeling (zie tabel 1). Dit komt niet overeen met de verwachtingen, waardoor nader onderzoek nodig is, onder andere naar de activiteitsgraad en de behoefte aan verse lucht per persoon.

Van de 16 voorstellings- en combinatieruimten (met een bekend mechanisch ventilatiesysteem) hebben er volgens de berekeningen 11 onvoldoende debiet bij maximale bezetting voor 900 ppm. Er wordt verwacht dat ze bij een hoge bezetting van de ruimte gedurende langere perioden hoge CO2-waarden zullen geven. Over het geheel genomen lijkt dit het geval te zijn, 3 voorstellings- en combinatieruimten (5.2, 8.1, 8.2) hebben overschrijdingen van de 900 ppm grenswaarde bij 100% van hun evenementen, en 6 ruimten (1.3, 4.1, 5.2, 8.2, 9.3, 10.3) hebben ten minste één evenement met meer dan 80% van de duur van het event die 900 ppm overschrijdt. Drie ruimten die beter presteren dan de andere zijn het waard om kort besproken te worden. De eerste voorstellingsruimte, 6.2, heeft een mechanisch gebalanceerd ventilatiesysteem, een maximale zitcapaciteit van 940 en een nominale capaciteit van 644. Helaas zijn er geen technische gegevens over de capaciteit van de ruimte en geen technische gegevens over de efficiëntie van de spoeling. Tijdens de meetperiodes waren verschillende evenementen volgeboekt. Het is echter pas bij een capaciteit van 850 personen dat overschrijdingen van de 900-ppm waarde werden vastgesteld. Hoewel het ventilatiesysteem dus niet voldoende presteert bij de maximale capaciteit van 940 mensen, lijkt het erop dat het ventilatiesysteem zichzelf aanpast aan de bezetting van het publiek. We kunnen besluiten dat een technische screening van het ventilatiesysteem en CO2-metingen lijken elkaar aan te vullen om een goed beeld te krijgen van de ventilatieprestaties. De tweede voorstellingsruimte is 6.4, die al kort besproken is. Het is uitgerust met een mechanisch gebalanceerd ventilatiesysteem en is de enige voorstellingsruimte zonder overschrijdingen van het 900-ppm niveau. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het gebrek aan publiek: deze ruimte heeft een capaciteit van 803 mensen, en een nominale capaciteit van 613, maar tijdens de meetperiodes werden er slechts maximaal 400 tickets per evenement verkocht. Dit toont echter aan dat een verminderde publiekscapaciteit in bepaalde gevallen gunstig kan zijn voor de CO2-niveaus. Deze bevinding staat in contrast met de vorige paragraaf, waar sommige ruimtes nog steeds overschrijdingen van de CO2-niveaus hadden, zelfs als de maximale capaciteit niet werd bereikt. De derde voorstellingsruimte tenslotte (8.1) heeft een mechanisch gebalanceerd ventilatiesysteem en vertoont overschrijdingen van 900 ppm CO2-niveau bij alle evenementen, maar slechts gedurende een korte tijd (slechts 3-21% van de duur van het evenement), wat, vergeleken met de andere ruimten, opmerkelijk korter is. Dit suggereert dat het ventilatiesysteem pas na enige tijd begint te werken. Het is echter de moeite waard om op te merken dat deze ruimte niet op maximale capaciteit was met slechts 85 mensen die koperinstrumenten bespelen, terwijl de maximale capaciteit 480 is en de nominale capaciteit 220.

5 BESLUIT

Over het algemeen heeft het onderzoek aangetoond dat de meeste culturele centra moeite hebben om te voldoen aan de algemene gezondheidsrichtlijnen om CO2-concentraties onder de 900 ppm te houden. Zelfs als de maximale publiekscapaciteit van de ruimte niet wordt gehaald, wordt de richtlijn van 900 ppm vaak overschreden. Dit betekent dat er duidelijk ruimte is voor verbetering als het gaat om ventilatieprestaties. Elk cultuurhuis ontving een individueel rapport met aanbevelingen uit het onderzoek, waarmee ze verder aan de slag kunnen.

Het meten van CO2-waarden blijft een goede en eenvoudige indicator om te bepalen of een voorstellingsruimte voldoende geventileerd wordt -- zeker omdat in culturele centra de intensiteit van de activiteit en de samenstelling van het publiek (kinderen/volwassenen, zittend/staand) sterk kunnen variëren. Dit onderzoek toonde tegelijkertijd aan dat een ventilatiesysteem met voldoende debietpulsie, in verhouding tot de maximale capaciteit van de ruimte, niet altijd de gewenste CO2-waarden garandeert. Andere parameters die van invloed kunnen zijn — en dus niet mogen worden verwaarloosd — zijn bijvoorbeeld de instellingen van het ventilatiesysteem, de intensiteit van de activiteit in de ruimte, de samenstelling van het publiek, het onderhoud van het systeem, enzovoort. Een aspect om verder te onderzoeken is het bepalen van de activiteitsgraad en de behoefte aan verse lucht per persoon.

Om te bepalen of een ventilatiesysteem goed presteert, biedt het doorlichten van de ventilatie-infrastructuur een grote toegevoegde waarde. Verschillende parameters bepalen de goede werking: installatie en instelling (bv. debietpulsie), correct gebruik en onderhoud. Een screening identificeert deze parameters en waar nodig kunnen concrete verbeteringen worden aangebracht (bv. onderhoud van ventilatieroosters).

6 BEDANKING

We willen Joris Pieters, data scientist bij Keyrus, hartelijk bedanken voor zijn hulp bij de data-analyse, het ingenieursbureau AirX, voor de technische doorlichting, en de tien deelnemende culturele centra.

7 BIBLIOGRAFIE

Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C., & et al (eds), (2009). *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings.* World Health Organization.

De Mulder, S., Goethals, M., Verlaek, M., Gommé, L., De Kempeneer, N., Van Hoof, T., Mampaey, M., Van Haver, P., Teughels, C., Van Haute, G., & Van Campenhout, K. (2023). Living and Working in a Healthy Environment: How Sensor Research in Flanders can Help Measure and Monitor Exposure to Certain Environmental Factors. *KEEP ON PLANNING FOR THE REAL WORLD Climate Change Calls for Nature-Based Solutions and Smart Technologies*, 10.

Fernandes, E. D. O., Jantunen, M., Carrer, P., Seppanen, O., Harrison, P. T. C., & Kephalopoulos, S. (2009). *ENVIE - Co-ordination Action on Indoor Air Quality and Health Effects—Final Activity Report*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28314.85447

Geyskens, F., & Stranger, M. (2016). *Milieu en Gezondheid en Binnenhuis—Vraag om advies m.b.t. CO2 als indicator voor een gezond binnenmilieu, studie uitgevoerd in opdracht van Het Departement LNE, Dienst Milieu en Gezondheid* (p. 36).

Lazarov, B., Elen, B., Spruyt, M., & Stranger, M. (2019). *Long-term monitoring of environmental pollutants in the indoor climate of various housing types* (p. 83).

Mampaey, M., Verlaek, M., & De Kempeneer, N. (2021). Ventilatie op school in koudere periodes tijdens een pandemie zoals COVID-19 (p. 40). https://archief-algemeen.omgeving.vlaanderen.be/xmlui/bitstream/handle/acd/287516/overzichtsrapport_ventilatieschool.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Taskforce Ventilatie van het coronacommissariaat. (2021). *Aanbevelingen voor de praktische implementatie en bewaking van ventilatie en binnenluchtkwaliteit*