

VEREENVOUDIGDE METHODIEK

Methodiek om op eenvoudige wijze
de effectiviteit van een
ventilatiesysteem te bepalen

DATUM 28 april 2025
AUTEURS R. Traversari, A. de Lange,
ORGANISATIE TNO
RAPPORTNUMMER TNO 2025 R10909

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Inhoudsopgave

1. Samenvatting.....	4
2. Inleiding	4
1. Natuurlijke ventilatiesystemen	5
2. Mechanische ventilatiesystemen	5
3. Conclusie systeemtype	5
4. Keuze methodiek.....	6
5. Methodiek	8
Literatuur.....	14
Bijlage 1	16

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

1. Samenvatting

Dit rapport betreft de derde fase van het werk dat wordt uitgevoerd binnen Werkpakket 2 van het Clean Air for Everyone (CLAIRE) programma. Werkpakket 2 "ventilatie-eigenschappen" heeft twee hoofddoelstellingen:

- Voorbij de huidige stand van zaken gaan in het begrijpen van het gedrag van aerosoldeeltjes onder verschillende soorten ventilatiesystemen en realistische operationele omstandigheden;
- Het ontwikkelen van een meer verfijnd modelgebaseerd begrip van effecten, interacties en gevoeligheden, evenals methodologieën.

Dit rapport schetst het theoretische kader voor een eenvoudige methode om de effectiviteit van ventilatiesystemen in ruimtes te bepalen. Deze methode werd besproken en overeengekomen tijdens verschillende vergaderingen met de industrie, geïnitieerd door Binnenklimaat Techniek en Jaga.

2. Inleiding

Het hoofddoel van WP2 is om een "Method for assessing ventilation performance in confined environments" te ontwikkelen. Deze methode moet op een eenvoudige wijze en met enige zekerheid kunnen bepalen of de effectiviteit van het systeem op orde is. Op basis van de resultaten kan worden bepaald of nader onderzoek naar het ventilatiesysteem wenselijk is. Dit houdt in dat het systeem een hoeveelheid verse lucht toevoert die overeenkomt met het gewenste niveau zoals bijvoorbeeld de eisen voor nieuwbouw uit het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl), het programma van eisen frisse scholen, het programma van eisen gezond binnenklimaat langdurige zorg, het programma van eisen Gezonde Kantoren, het programma van eisen Gezonde woningen, etc. (Boerstra et al., 2024; Loomans et al., 2022; Platform Gezond Binnenklimaat, 2018; RVO, 2021). Klasse C staat in deze programma's van eisen meestal voor het wettelijke minimum ontwerpniveau.

De basis voor de ontwikkeling van deze methodiek zijn de uitgevoerde metingen in een aantal ruimten (10 klaslokalen en 4 gemeenschappelijke ruimten in de langdurige zorg) voordat er interventies aan het ventilatiesysteem waren doorgevoerd en de resultaten van de metingen nadat er een interventie was gepleegd (de Lange et al., 2025; Lange & Traversari, 2024).

Bij het tot stand komen van deze methode is afstemming geweest met een aantal partners in het CLAIRE programma zoals afgevaardigden van Binnenklimaattechniek, Binnenklimaat Nederland en Jaga. Het CLAIRE-project wordt ondersteund door Health~Holland, Topsector Life Sciences & Health, via het Public-Private Partnership (PPP) Allowance programma onder projectnummer LSHM22032. Health~Holland is de handelsnaam van de Nederlandse Topsector Life Sciences & Health. Health~Holland is een van de tien topsectoren die zijn opgezet door het Ministerie van Economische Zaken om het Nederlandse innovatiepotentieel te benutten voor een substantiële bijdrage aan mondiale maatschappelijke uitdagingen.

Voor meer informatie over Health~Holland zie: <https://www.health-holland.com/>

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

De methode is bedoeld om een indruk te krijgen van de hoeveelheid verse lucht die aan een ruimte wordt toegevoerd. Indien de bepaalde verse luchthoeveelheid lager is dan de gewenste hoeveelheid kan worden besloten of nader onderzoek door een deskundig installateur of adviseur noodzakelijk is. De methodiek geeft een eerste grove indicatie van de hoeveelheid en kan niet worden gebruikt om de exacte hoeveelheid te bepalen.

1. Natuurlijke ventilatiesystemen

De metingen voor interventie laten zien dat bij systemen die uitsluitend gebruik maken van natuurlijke ventilatie de verse lucht hoeveelheid sterk afhankelijk is van de buitencondities. Met name de windsnelheid en windrichting zijn hierbij van groot belang. In de winter kan het temperatuurverschil tussen binnen en buiten ook enigszins bijdragen aan de ventilatie, met name wanneer het temperatuurverschil met buiten groot is. Er zijn ook natuurlijke ventilatiesystemen die op dat principe werken. Hierdoor kan niet op ieder moment de toevoer van een minimale hoeveelheid verse buitenlucht worden gegarandeerd. Tijdens het overgrote deel (ca. 90%) van de uitgevoerde metingen bleek minder lucht dan vereist te worden toegevoerd (Lange & Traversari, 2024). Slechts in een paar gevallen op zeer winderige dagen werd hier wel aan voldaan. Met name in een situatie waar veel mensen in een ruimte aanwezig zijn en een gegarandeerde minimale hoeveelheid verse buitenlucht per persoon noodzakelijk is om de kans op transmissie van virussen en andere pathogenen binnen bepaalde grenzen te houden, lijkt deze vorm van ventilatie niet wenselijk.

2. Mechanische ventilatiesystemen

Ventilatiesystemen met een mechanische toe- en/of afvoer kunnen bij een goed ontwerp en juiste instelling, inregeling en onderhoud de minimaal benodigde hoeveelheid verse buitenlucht beter garanderen. Uit de metingen (de Lange et al., 2025; Lange & Traversari, 2024) blijkt dat het niet per definitie zo is dat als er een mechanisch ventilatiesysteem aanwezig is, wel in alle gevallen de vereiste hoeveelheid verse lucht toegevoerd wordt. Daarnaast kunnen door toevoer van onverwarmde buitenlucht met name in de winter (tocht)klachten ontstaan bij systemen waarbij de ventilatielucht via roosters boven ramen wordt toegevoerd. Dat geldt ook indien de ramen als ventilatievoorzieningen moeten worden ingezet. Deze comfort-issues kunnen met name bij kwetsbare personen zoals in de langdurige zorg onwenselijk zijn, zie ook P3Venti (Weersink et al., 2024). Naast de luchthoeveelheid is ook de luchtverdeling voor de ventilatie effectiviteit van belang.

3. Conclusie systeemtype

Bij systemen gebaseerd op natuurlijke ventilatie waarbij een minimale hoeveelheid verse buitenlucht wordt vereist met als doel de concentratie van pathogenen onder een bepaalde waarde te houden kan (tijdelijk) gebruik worden gemaakt van luchtreinigers. Het heeft echter wel de sterke voorkeur om in die situatie de ventilatiesystemen aan te passen, maar indien dat niet mogelijk is, zouden luchtreinigers een tijdelijke tussenoplossing kunnen zijn. Uit metingen blijkt dat met het toepassen van luchtreinigers de deeltjesconcentratie in een ruimte kan worden gereduceerd door deze deeltjes

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

af te vangen (de Lange et al., 2025). Deze luchtreinigers hebben met name in scholen echter vaak een keerzijde. Ze kunnen eenvoudig buiten werking worden gesteld, zijn molest gevoelig, nemen schaarse ruimte in en produceren geluid.

4. Keuze methodiek

Het inschatten of een ventilatiesysteem voldoende effectief is, is zelfs voor deskundigen erg lastig. De effectiviteit van een systeem wordt primair bepaald door de hoeveelheid verse buitenlucht die wordt toegevoerd en secundair door de verdeling van de lucht in de ruimte. Uit de binnen het kader van CLAIRE uitgevoerde metingen blijkt dat systemen met een beperkte toegevoerde luchthoeveelheid kritisch zijn voor de luchtverdeling. Bij het toevoeren van een relatief lage luchthoeveelheid treedt vaak een situatie op waarbij er gebieden in de ruimte zijn met hoge deeltjesconcentraties ten opzichte van de gemiddelde concentratie. Bij het toevoeren van een grotere hoeveelheid verse buitenlucht wordt de concentratieverdeling in een ruimte vaak homogener. De positie van toe- en afvoer lijkt daar in de praktijksituatie niet veel effect op te hebben. Wel hebben experts in een werksessie aangegeven dat inrichtingsonderdelen zoals hoge kasten etc. impact kunnen hebben op de luchtstroming en daarmee de concentratieverdeling. De belangrijkste parameter betreft dus de totaal toegevoerde hoeveelheid verse buitenlucht. Het inschatten daarvan zonder enige vorm van metingen uit te voeren is vrijwel onmogelijk. De luchthoeveelheid kan worden gemeten met behulp van specifieke meetapparatuur zoals een luchtsnelheidsmeter en een luchtdebietmeter. Bij gebruik van een luchtsnelheidsmeter moet ook het doorstroomde oppervlak worden bepaald en moet rekening worden gehouden met tal van andere factoren, waaronder de spreiding van de concentratie in de ruimte (inhomogeniteit). Ook het gebruik van een luchtdebietmeter vergt de nodige kennis en vaardigheden, al is dat minder complex dan het gebruik van een luchtsnelheidsmeter. Organisaties moeten deze deskundigheid vaak inhuren waardoor het niet of beperkt plaatsvindt.

Een andere methode om de toegevoerde luchthoeveelheid te bepalen is met tracergas (Penman, 1980; A. K. Persily, 1997). Bij deze methode wordt een bekende hoeveelheid eenvoudig meetbaar inert gas aan een ruimte toegevoerd en wordt de resulterende concentratie bepaald. Vaak moet de resulterende concentratie op veel punten worden bepaald om een betrouwbare gemiddelde waarde te krijgen. Ook CO₂ kan als tracergas worden gebruikt. CO₂ is goed meetbaar met relatief eenvoudige meetapparatuur (Penman, 1980; Smith, 1988). Ook wordt CO₂ door mensen zelf uitgeademd. De hoeveelheid uitgeademde CO₂ is afhankelijk van het metabolisme van aanwezige mensen (leeftijd, activiteiten en individuele persoonlijke karakteristieken). Als het aantal mensen, het activiteitsniveau en de gemiddelde CO₂-concentratie in een ruimte bekend zijn, kan via een eenvoudige berekening een goede inschatting worden gemaakt van de hoeveelheid toegevoerde verse buitenlucht. Sommige richtlijnen geven de nadelige effecten van een hogere CO₂-concentratie weer op basis waarvan eisen worden gesteld aan de maximale CO₂-concentratie. Uit een literatuurstudie (Lange et al., 2024) blijkt echter dat de resultaten uit de studies geen eenduidig beeld geven of en in welke mate er een effect is van een CO₂-concentratie in een ruimte op:

- 1) cognitieve prestaties,
- 2) fysiologische parameters,
- 3) comfort, beleving en klachten,

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

4) afwezigheid en ziekte.

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Het is daarom niet met zekerheid aan te geven dat de CO₂-concentratie hier een effect op heeft. Dit wordt veroorzaakt doordat de meeste studies a) geen rekening houden met confounding factors en b) de blootstellingsduur vaak relatief kort was en vragenlijsten een lange periode besloegen terwijl de CO₂-concentratie slechts over relatief korte periode is gemeten.

Ook is er geen eenduidige bewijslast voor aan te houden maximale CO₂-concentraties. Naast het literatuuronderzoek (Lange et al., 2024) komt dit tot uiting in de vele verschillende waardes die internationaal als richtlijn/streefwaarde worden aangehouden. Iedere grenswaarde is daarmee zeer arbitrair en niet onderbouwd door wetenschappelijke literatuur en consensus. Wel lijkt er een relatie te zijn tussen de CO₂-concentratie en de inactivatiesnelheid van SARS-CoV-2, hoe hoger de CO₂-concentratie hoe stabiel het virus en hoe langer het duurt voordat deze wordt geïnactiveerd (Haddrell et al., 2024).

Doordat er vaak al CO₂-meters beschikbaar zijn en de eenvoud van deze methodiek op basis van natuurlijk geproduceerde CO₂ ook door minder deskundigen kan worden toegepast, wordt deze in dit document verder uitgewerkt (Masterplan Ventilatie, 2021).

5. Methodiek

Het meten van de CO₂-concentratie in een ruimte lijkt relatief eenvoudig maar er zijn wel een aantal belangrijke aandachtspunten. In dit document wordt de methodiek stapsgewijs weergegeven.

Stap 1. Selectie CO₂-meter

Er zijn veel verschillende CO₂-meters te koop. Volgens het Bouwbesluit 2012 (tegenwoordig het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl)) is het vanaf 1 juli 2015 verplicht om nieuwe basisscholen te voorzien van een eenvoudige CO₂-meter. Een eenvoudige CO₂-meter geeft alleen de actuele waarde van de CO₂-concentratie aan en registreert niet in een geheugen. Deze meter is verbonden aan het elektriciteitsnet en werkt dus niet op batterijen. Ook moet deze CO₂-meter een “alarmfunctie” hebben. Een alarmfunctie is voor deze methode echter niet noodzakelijk.

Voor een CO₂-meter die gebruikt wordt om de hoeveelheid vers toegevoerde lucht te bepalen wordt geadviseerd om een CO₂-meter te gebruiken die:

- zelfkalibrerend is en werkt volgens het principe van een niet-dispersieve infrarood (NDIR) gassensor,
- een geheugenfunctie heeft waarmee de gemeten CO₂-waarden samen met het tijdstip waarop die waarden zijn gemeten worden opgeslagen en kunnen worden uitgelezen.

Stap 2. Plaatsing CO₂-meter

Uit experimenten blijkt dat in tegenstelling tot wat verwacht mag worden op basis van de dichtheid van CO₂ (ca. 1,5 maal die van lucht) de hoogste CO₂-concentratie zich meestal niet laag (onderin) in een ruimte bevindt maar juist relatief hoog in de ruimte, op ca 1,8 meter (Mahyuddin & Awbi, 2010). Dit wordt veroorzaakt doordat de uitgeademde CO₂ een hogere temperatuur heeft dan de omgevingslucht in de ruimte, door diffusie, door de luchtstroming (toe- en afvoer boven in de ruimte) en door temperatuurstratificatie.

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

In deze studie bleek de horizontale verdeling van de CO₂-concentratie in de ruimte van de toegevoerde luchthoeveelheid afhankelijk te zijn maar waren de verschillen beperkt (76-123 ppm). Om een indicatie van de hoeveelheid verse lucht te bepalen lijkt het verantwoord om voor de eenvoud op één plaats in de ruimte te meten. Hierbij moet wel worden gerealiseerd dat de verdeling ook afhangt van ventilatietype (meng of verdringing), locatie van toevoer en afvoer, etc.. Op meer plaatsen meten en de waarden middelen is beter maar is ook complexer.

Plaats de CO₂-meter op ca 1,8 meter hoogte in de ruimte waarin de vers toegevoerde luchthoeveelheid moet worden bepaald. Let hierbij op dat de CO₂-meter zo min mogelijk beïnvloed wordt door deuren ramen, raamroosters en toevoerroosters. Als er een afvoerrooster aanwezig is kan dat een goede positie zijn om de gemiddelde waarde te bepalen. Ook moet de CO₂-meter niet te dicht bij CO₂-bronnen worden geplaatst zoals een persoon. Houd minimaal 70 cm afstand tot personen. Zorg ervoor dat er tijdens de meting geen open vuur (bijvoorbeeld brandende kaarsen, met brandstof gevoed sfeer element of gasfornuis) in de ruimte aanwezig is. Deuren die openstaan en een verbinding creëren met andere ruimten in het gebouw waar CO₂ wordt geproduceerd door aanwezige mensen moeten zo veel mogelijk worden voorkomen omdat dit effect kan hebben op de gemeten CO₂-concentratie (Smith 1988). Het is daarom van belang dat de inpandige deuren zo veel mogelijk gesloten worden gehouden.

Stap 3. Registratie aantal personen

Registreer ten minste voor één representatieve (werk)dag het gemiddeld aantal personen per uur en het activiteitsniveau in de ruimte waarvoor de hoeveelheid verse buitenlucht moet worden bepaald. Hiervoor kan bijlage 1 worden gebruikt. Hierbij is het van belang dat de bezetting van de ruimte zo constant mogelijk is. Persily 1997 heeft berekend dat in een ruimte met 30 personen per 100 m² en een luchthoeveelheid van 2,5 dm³/s per persoon er na ongeveer 2,8 uur een stabiele situatie ontstaat (95% van de evenwichtsconcentratie). Bij een luchthoeveelheid van 7,5 dm³/s per persoon is de 95% waarde al na 46 minuten bereikt.

Stap 4. Berekening van de hoeveelheid vers toegevoerde buitenlucht.

Bepaal voor de uren waarvan de bezetting van de ruimte en het activiteitsniveau van de mensen in de ruimte bekend is, zie stap 3, de gemiddelde CO₂-concentratie over die uren.

Middels formule 1 kan de gemiddelde hoeveelheid vers toegevoerde lucht gedurende een uur (Q_t) in m³/h worden berekend op basis van de CO₂-concentratie, het gemiddeld aantal personen in de ruimte en de gemiddelde CO₂-emissie op basis van leeftijd en activiteitsniveau.

Equation 1

$$Q_t = \frac{n_t * C_t * 3600 * 1000}{C_{CO_2;bi;t} - C_{CO_2;bu;t}}$$

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Waarin:

- Q_t hoeveelheid vers toegevoerde lucht aan de ruimte in uur t [m^3/h]
- n_t Gemiddeld aantal mensen in de betreffende ruimte gedurende uur t [-]
- C_t gemiddelde CO_2 productie per persoon gedurende uur t , volgens tabel XXX [liter/s/persoon]
- $C_{\text{CO}_2;\text{bi};t}$ gemiddelde CO_2 concentratie gedurende uur t in de betreffende ruimte in uur t [ppm]
- $C_{\text{CO}_2;\text{bu};t}$ gemiddelde CO_2 concentratie gedurende uur t in buitenlucht in uur t , [ppm]

Er kan van worden uitgegaan dat als de gemeten concentratie over een uur niet meer varieert dan ΔC_{eq} bepaald met formule 2, dat dan de evenwichtsconcentratie is bereikt (A. K. Persily, 1997).

Equation 2

$$\Delta C_{eq} = \frac{166 * 10^3 * n_t * C_t}{V}$$

Waarin:

- ΔC_{eq} De maximaal toelaatbare spreiding van de metingen over één uur om een betrouwbare evenwichtsconcentratie te bereiken [ppm]
- n_t Gemiddeld aantal mensen in de betreffende ruimte gedurende uur t [-]
- C_t gemiddelde CO_2 productie per persoon gedurende uur t , volgens tabel 1 [liter/s/persoon]
- V Is het volume van de ruimte [m^3]

In de praktijk zal het echter zeer lastig zijn om aan deze voorwaarde voor een stabiele evenwichtsconcentratie te voldoen waardoor de betrouwbaarheid van de methode afneemt en het resultaat slechts een indicatie van de toegevoerde verse luchthoeveelheid betreft.

Voor de gemiddelde buitenluchtconcentratie kan over het algemeen 400 ppm worden aangehouden. Deze waarde wijkt af van de werkelijke CO_2 -concentratie buiten maar vrijwel alle CO_2 -meters ijken zichzelf op basis van de buitenlucht en nemen daarbij aan dat in de buitenlucht de CO_2 -concentratie 400 ppm bedraagt. De op de CO_2 -meter weergegeven waarde is dus feitelijk een toename t.o.v. de basiswaarde van 400 ppm. De werkelijke CO_2 -concentratie varieert over het jaar waarbij de concentratie in mei het hoogst is en in september het laagst. Het gebruik van een CO_2 -meter bestemd voor metingen in een ruimte zijn om bovengenoemde reden niet geschikt om de exacte CO_2 -concentratie in de buitenlucht te meten. Gebaseerd op (A. Persily & Jonge, 2017) kan de CO_2 -emissie van personen worden ingeschat, tabel 1. Deze inschatting is weergegeven in tabel 1. Er zit enige spreiding in de CO_2 -productie van individuen waardoor de werkelijke productie van de in tabel 1 gegeven waarden kan afwijken, dit heeft effect op de berekende verse luchthoeveelheid (Penman, 1980).

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Tabel 1. CO₂-emissie in liter per seconde per persoon (op basis van een gemiddelde respiratoir quotient (RQ) van 0,85).

Activiteitsniveau	Leeftijd			
	Tot 12 jaar (48 kg ^a)	Vanaf 12 jaar tot 21 jaar (73, 2 kg ^a)	Vanaf 21 jaar tot 65 jaar (gemiddeld 40 jaar, 80,8 kg ^b)	Vanaf 65 jaar (gemiddeld 70 jaar, 78.4 kg ^b)
Rustig zittend/kantoorwerk	0,0031 (MET = 1,3)	0,0051 (MET = 1,4)	0,0056 (MET = 1,4)	0,0039 (MET = 1)
Fysieke arbeid	0,0095 (MET = 4)	0,00145 (MET = 4)	0,0160 (MET = 4)	0,00155 (MET = 4)
De MET-waarde ofwel het metabool equivalent is een meeteenheid binnen de fysiologie voor de hoeveelheid energie die een bepaalde fysieke inspanning kost, uitgedrukt in het zuurstof verbruik per kg lichaamsgewicht per minuut. De gegeven massa in kg is het gemiddelde gewicht van de personen. Zowel de MET waarde als de massa betreft het gemiddelde van vrouwen en mannen. Voor kinderen is in rust een waarde van 1,3 Met aangehouden (Pontzer et al., 2021).				

Over één dag kan de gemiddelde luchthoeveelheid in de betreffende uren rekenkundig worden gemiddeld om een gemiddelde waarde over een gehele dag te krijgen. Meerdere metingen maakt de methode nauwkeuriger. Zit er een grote spreiding tussen de waarden per uur dan verdient het aanbeveling de hoeveelheid verse lucht op meerdere momenten te bepalen.

De berekende indicatie van de hoeveelheid verse lucht kan worden vergeleken met bijvoorbeeld de eisen voor nieuwbouw uit het Bbl, het programma van eisen frisse scholen, het programma van eisen gezond binnenklimaat langdurige zorg, het programma van eisen Gezonde Kantoren, het programma van eisen Gezonde woningen, etc. (Boerstra et al., 2024; Platform Gezond Binnenklimaat, 2018; RVO, 2021). Klasse C staat in deze programma's van eisen voor het wettelijke minimum ontwerpniveau. Het systeem moet in staat zijn deze hoeveelheid te realiseren. In de praktijk kan dit afwijken omdat het systeem niet in de ontwerpstand staat.

Op basis daarvan kan worden bepaald of de berekende hoeveelheid verse lucht voldoende is om aan de eisen/wensen te voldoen.

Deze bepaling kan ook verder versimpeld worden. Wordt uitgegaan van een bepaalde minimale hoeveelheid verse lucht per persoon die moet worden toegevoerd, dan kan als grove indicatie ook de gemeten CO₂-concentratie zelf worden beschouwd. Voor een basisschool kan worden uitgegaan van het minimale niveau van 21,6 m³ verse lucht per uur per persoon ((RVO, 2021), klasse C) en een productie van 0,0022 liter CO₂ per seconde per persoon, rustig zittend tot 12 jaar (tabel 1). Op basis hiervan kan worden berekend dat dit leidt tot een maximale CO₂-concentratie van afgerond 770 ppm (767 ppm)^c. Is de gemeten CO₂-concentratie dus structureel hoger dan 770 ppm dan is de hoeveelheid toegevoerde lucht lager dan de gewenste/vereiste 21,6 m³ per uur per persoon.

^a Bron: Ruwe data van de Vijfde Landelijke Groeistudie (uit 2009)

^b Bron: State line lengte een gewicht van personen, ondergewicht en overgewicht; vanaf 1981

^c Uitgaande van een CO₂ concentratie in de buitenlucht van 400 ppm i.v.m. de ijking van CO₂ meters.

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Voor de langdurige zorg wordt een verse luchthoeveelheid van 25 m³ per uur per persoon nagestreefd ((Boerstra et al., 2024), klasse C). Dit leidt samen met de CO₂-productie van een rustig zittend persoon met een leeftijd vanaf 65 jaar tot een maximale CO₂-concentratie van 950 ppm (932,8 ppm).^c Ook hier geldt dat als de gemeten CO₂-concentratie dus structureel hoger dan 950 ppm, de hoeveelheid toegevoerde lucht lager lijkt te zijn dan de gewenste/vereiste 25 m³ per uur per persoon.

Is de gemeten CO₂-concentratie hoger dan respectievelijk 770 ppm of 950 ppm dan levert dit echter geen acuut probleem op met betrekking tot cognitieve prestaties, fysiologie, comfort, beleving en klachten of afwezigheid en ziekte (Lange et al., 2024). Enige dat gesteld kan worden dat er zeer waarschijnlijk minder verse buitenlucht wordt toegevoerd dan gewenst/vereist.

Binnenklimaattechniek heeft een tool “Indicator besmettingskansen via aerosolen V3.0”^d, waarmee op basis van de gemeten CO₂-concentratie, het aantal aanwezige tijdens de meting en het activiteitsniveau de hoeveelheid toegevoerde lucht (Q_v) kan worden berekend. Teven wordt met deze tool aangegeven of wordt voldaan aan het bouwbesluit. Hierbij worden zoals in het achtergronddocument bij deze tool is aangegeven, echter wel andere waarden voor de CO₂-emissie voor de verschillende populaties (tabel 1.) aangehouden. Deze emissiefactoren kunnen in het model niet worden aangepast. Bij gebruik van deze tool zal de berekende ventilatiehoeveelheid (Q_v) dan ook afwijken van de in dit document beschreven methode. Dit is op zich geen groot knelpunt omdat de bepaalde ventilatiehoeveelheid slechts een indicatie betreft. Er moet in deze tool echter geen waarde worden toegekend aan de berekende besmettingskansen.

Stap 5. Definiëren van acties

Als de onder stap 4 bepaalde hoeveelheid verse buitenlucht aan de wensen voldoet hoeft er verder geen actie te worden ondernomen anders dan de hoeveelheid periodiek, bijvoorbeeld 6-maandelijks, te controleren.

Als de onder stap 4 bepaalde hoeveelheid verse buitenlucht lager is dan de gewenste hoeveelheid kunnen de volgende stappen worden doorlopen:

- 5a. Bepaal op een andere dag nogmaals de indicatieve hoeveelheid verse lucht, blijft die ruim lager dan de gewenste hoeveelheid ga dan verder met 5b,
- 5b. Worden de ventilatievoorzieningen gebruikt zoals in het ontwerp bedoeld, zie ook www.ventilerenzogedaan.nl? Zo niet, gebruik de voorzieningen dan zoals bedoeld en bepaal de hoeveelheid opnieuw, stap 2 t/m 4. Let op: bij natuurlijke ventilatiesystemen is de hoeveelheid toegevoerde buitenlucht sterk afhankelijk van de condities buiten zoals temperatuur, windrichting en snelheid. Om die reden kan de hoeveelheid per dag en zelfs per uur sterk wisselen. Vooral de minimale hoeveelheid toegevoerde lucht is hierbij van belang. Om deze betrouwbaar te bepalen is vaak een langere meetperiode noodzakelijk.
- 5c. Is de hoeveelheid vers toegevoerde lucht ook bij het correct gebruik van de voorzieningen lager dan gewenst, benader dan een deskundig installateur of adviseur. Deze kan de toegevoerde luchthoeveelheid met goede meetapparatuur nauwkeurig vaststellen.

^d zie <https://indicatorbesmettingskansen.nl/project/bewerken/ventilatie/>

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

- 5d. Als zich een pandemische situatie of een situatie met veel aerogene besmettingen voordoet en het niet mogelijk is om de verse luchthoeveelheid op korte termijn op het wenselijke niveau te brengen, overweeg dan tijdelijk een (mobiele) luchtreiniger toe te passen. Een luchtreiniger is zeker geen wondermiddel en ook geen vervanger voor het toevoeren van voldoende verse buitenlucht. Met een luchtreiniger kan wel de concentratie deeltjes (pathogenen) worden gereduceerd. Een luchtreiniger heeft ook een keerzijde: deze produceert vaak geluid, neemt ruimte in, moet voor een optimale werking vaak midden in een ruimte worden geplaatst en is molest gevoelig.

Stap 6. Randvoorwaarden

Zoals iedere methodiek heeft ook deze methode een aantal beperkingen waar rekening mee moet worden gehouden. Dit betreft onder andere de volgende punten:

Deze methodiek is niet geschikt voor systemen die op basis van de CO₂-concentratie worden geregeld. Ook is de methode niet geschikt voor situaties met een sterk wisselende bezetting (aantal personen en leeftijdssamenstelling) in een ruimte.

De nauwkeurigheid van deze methodiek is afhankelijk van de wijze waarop de gebruikte waarden voor aantal personen en de CO₂-emissie zijn bepaald. Omdat slechts op één punt in de ruimte de CO₂-concentratie wordt gemeten is deze methode bij lagere luchthoeveelheden minder nauwkeuring omdat de concentratieverdeling in de ruimte minder homogeen is. Als de ruimte groter wordt neemt de nauwkeurigheid af.

Inpandige deuren die openstaan hebben effect op de gemeten CO₂-concentratie en moeten daarom tijdens de metingen zo veel mogelijk gesloten worden gehouden.

Bij natuurlijke ventilatiesystemen is de hoeveelheid toegevoerde buitenlucht sterk afhankelijk van de condities buiten zoals windrichting en snelheid. Om die reden kan de hoeveelheid per dag en zelfs per uur sterk wisselen. Vooral de minimale hoeveelheid toegevoerde lucht is hierbij van belang. Om deze betrouwbaar te bepalen is vaak een langere meetperiode noodzakelijk. Ook het openhouden van deuren heeft vaak effect op deze hoeveelheid.

Er kan geen eenduidige grenswaarde voor een CO₂-concentratie worden aangegeven vanuit gezondheid of vanuit prestaties, noch voor kinderen, noch voor volwassenen (Lange et al., 2024). Hiervoor is geen consistent bewijs vanuit de wetenschappelijke literatuur.

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Literatuur

- Boerstra, A. C., van Heumen, S. P. M., Jacobs, P., Kompatscher, K., Kort, H. S. M., de Kort, J. M. A., te Kulve, M., Loomans, M. G. L. C., & Traversari, A. A. L. (2024). *Programma van Eisen Gezond Binnenklimaat Langdurige Zorg 2024*.
- de Lange, A., Kompatscher, K., Traversari, R., & Bezemer, R. (2025). *TNO 2025 R10401: Investigate the effect of different types of ventilation systems on the particle exposure risk in classrooms*.
- Haddrell, A., Oswin, H., Otero-Fernandez, M., Robinson, J. F., Cogan, T., Alexander, R., Mann, J. F. S., Hill, D., Finn, A., Davidson, A. D., & Reid, J. P. (2024). Ambient carbon dioxide concentration correlates with SARS-CoV-2 aerostability and infection risk. *Nature Communications*, 15(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47777-5>
- Lange, A. De, & Traversari, R. (2024). *TNO 2024 R10059: RESULTS Experiments in-situ, WP2, experiments phase 1*.
- Lange, A. de, Traversari, R., Kompatscher, K., & Egter van Wissekerke, N. (2024). *Literatuurstudie effect van CO2 op cognitieve prestaties , fysiologische parameters , comfort en beleving en absentie* (Issue september).
- Loomans, M. G. L. C., Hensen Centnerova, L., Jacobs, P., Beuker, T., & Atmar, W. (2022). *Programma van Eisen Gezonde Woningen 2022*. <https://www.binnenklimaattechniek.nl/document/publicatie-programma-van-eisen-gezonde-woningen-2022/>
- Mahyuddin, N., & Awbi, H. (2010). The spatial distribution of carbon dioxide in an environmental test chamber. *Building and Environment*, 45(9), 1993–2001. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.001>
- Masterplan Ventilatie. (2021). *Ventilatie in relatie tot COVID-19 en een goede binnenluchtkwaliteit - Aanbevelingen voor praktische implementatie en bewaking*. https://www.binnenklimaattechniek.nl/document/rapport-covid-19-in-relatie-tot-ventilatie-en-binnenluchtkwaliteit_binnenklimaattechniek-pdf/
- Penman, J. M. (1980). An experimental determination of ventilation rate in occupied rooms using atmospheric carbon dioxide concentration. *Building and Environment*, 15(1), 45–47. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(80\)90028-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(80)90028-1)
- Persily, A., & Jonge, L. De. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- Persily, A. K. (1997). Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. *ASHRAE Transactions*, 103(Transactions (1997) 103(pt 2)), 193–204.
- Platform Gezond Binnenklimaat. (2018). *Programma van eisen Gezonde Kantoren 2018*.
- Pontzer, H., Yamada, Y., Sagayama, H., Ainslie, P. N., Andersen, L. F., Anderson, L. J., Arab, L., Baddou, I., Bedu-Addo, K., Blaak, E. E., Blanc, S., Bonomi, A. G., Bouten, C. V. C., Bovet, P., Buchowski, M. S., Butte, N. F., Camps, S. G., Close, G. L., Cooper, J. A., ... Speakman, J. R. (2021). Daily energy expenditure through the human life course. *Science*, 373(6556), 808–812. <https://doi.org/10.1126/science.abe5017>
- RVO. (2021). *Program van Eisen frisse scholen 2021*. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/06/PvE-Frisse-Scholen-2021.pdf>
- Smith, P. N. (1988). Determination of ventilation rates in occupied buildings from metabolic CO2 concentrations and production rates. *Building and Environment*, 23(2), 95–102. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(88\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(88)90023-6)
- Weersink, A. M. S., Salemink, G. A. M., & Struck, C. (2024). *Technische en gebruiksinventarisatie ventilatiesystemen in bestaande gebouwen voor langdurige zorg , op basis van een taxonomie*

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

en vragenlijst (Issue april).

https://p3venti.nl/assets/rapportages/p3venti_rapportage_saxion_inventarisatie-gezondheidszorggebouwen.pdf

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

Bijlage 1. Voorbeeld registratiesheet aantal aanwezigen.

Locatie:		
Datum:		
Ruimte:		
Tijdstip (hh:mm)	Aantal aanwezige mensen	Geschatte gemiddelde leeftijd en activiteitsniveau
xx:00		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx:10		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx:20		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx:30		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx:40		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx:50		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx:60		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
Gemiddelde uur xx		☐ Jonger dan 12 jaar

^e Onder fysieke arbeid wordt in dit kader verstaan: lopen door ruimte, bukken/tillen, binnensporten.

Eenvoudige methodiek om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen

		☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx+1:00		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
xx+1:10		☐ Jonger dan 12 jaar ☐ Vanaf 12 jaar tot 21 jaar ☐ Ouder dan 21 jaar ☐ Rustig zittend/kantoorwerk ☐ Fysieke arbeid ^e
Etc.		