



P3VENTI

HANDELINGSPERSPECTIEF

SYSTEEMCONFIGURATIE

M. Loomans, T. van Hooff (TU Eindhoven)

Met ondersteuning vanuit:

TU Eindhoven - L. Kang, P. Qin, E. Mamulova

TNO - R. Bezemer, A. de Lange, K. Kompatscher, R. Traversari

TU Delft - Ph. Bluysen, E. Ding

Universiteit Utrecht - I. Wouters, E. Kritsi

DATUM	11 september 2025
AUTEUR	Marcel Loomans, Twan van Hooff
ORGANISATIE	TU/e; rapportnr. BE2025-2055381 (pp.60)

INHOUD

INLEIDING	3
DEEL A	4
Ventilatie	4
Type ventilatie	6
Ventilatiedebit	7
Ventilatieontwerp	14
Effectiviteit van ventilatie	18
Luchtreinigers	26
Samenvattend	28
DEEL B	29
Doel en reikwijdte van de simulatie	29
Domein30	
Rekenraster	31
Op te lossen variabelen	32
Randvoorwaarden	32
Turbulentiemodellen	33
Wandbehandeling	35
Discretisatieschema's	37
Convergentie	37
Modellering van deeltjes	38
Verificatie en validatie	39
CFD in de context van blootstelling aan pathogenen	40
Snelle CFD methoden	41
Checklist CFD simulaties	42
REFERENTIES	43
Annex A: Infographic	47
Annex B: Voorbeeld effect toevoer/afvoer op concentratieverdeling-case woonkamer langdurige zorg	48
Annex C: Checklist CFD-simulaties	58

INLEIDING

Het Handelingsperspectief Systeemconfiguratie is bedoeld voor ontwerpers van ventilatie systemen en technische adviseurs. Met dit handelingsperspectief willen we geen ontwerpershandleiding geven. De vrijheid om een ventilatiesysteem te ontwerpen voor een ruimte, gegeven de randvoorwaarden zoals die vanuit het programma van eisen gegeven zijn, ligt bij de ontwerpers en adviseurs. We willen enkel de verschillende facetten benadrukken die aan de orde zijn indien een ventilatiesysteem voor een ruimte ontworpen moet worden met in gedachte de werking ervan in geval van een pandemische situatie.

In dit handelingsperspectief zal (Deel A) enerzijds een korte beschrijving gegeven worden van de specifieke aspecten die zijn gerelateerd aan ventilatie in de context van blootstelling aan pathogenen. Anderzijds wordt (Deel B) een handreiking gegeven om zelf te bepalen hoe effectief een ontworpen ventilatieoplossing is in de context van de reductie van blootstelling aan pathogenen.

Voor dit laatste wordt het gebruik van de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek verondersteld. Doordat we gezien de problematiek geïnteresseerd zijn in wat er in een ruimte gebeurt, zijn er op dit moment geen alternatieve methodes die we hiervoor kunnen gebruiken. Experimentele studies in een testkamer zouden in specifieke gevallen een wenselijke aanvulling kunnen zijn. We veronderstellen niet dat alle ontwerpers en adviseurs de CFD-techniek moeten gaan beheersen. Echter, met de hier gegeven informatie willen we ervoor zorgen dat ontwerpers en adviseurs de juiste vragen stellen en informatie geven voor een dergelijk onderzoek, maar ook kunnen interpreteren of CFD-studies voldoende correct zijn uitgevoerd en gebruik kunnen maken van de rijke hoeveelheid aan data die met dergelijke studies beschikbaar komt.

In een infographic (zie Annex A) vatten we enkele belangrijke punten in het kort samen.

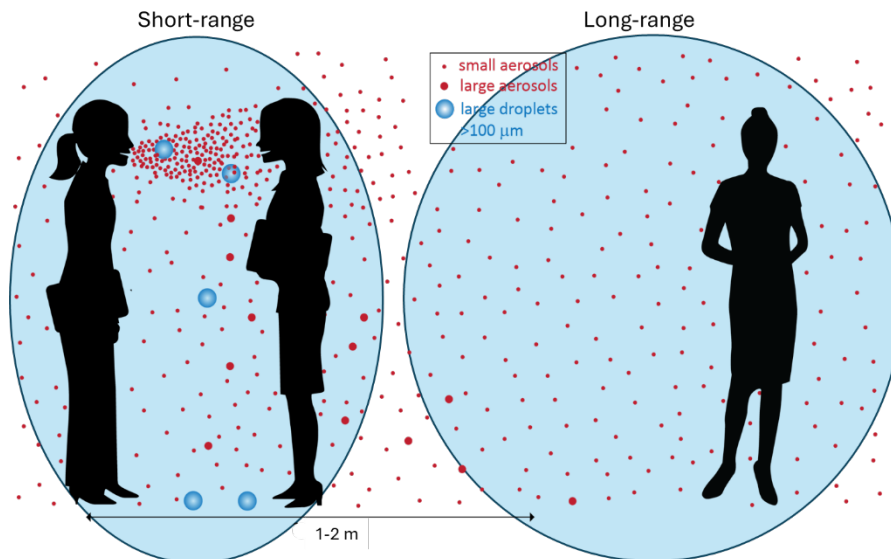
DEEL A

Ventilatie

De **luchtkwaliteit** in een ruimte is een belangrijk onderdeel in het kader van een gezond binnenmilieu. Er worden eisen gesteld aan de concentratie van verontreinigingen in een ruimte. Deze eisen zijn gerelateerd aan een potentiële ziektelast en aan de gepercipieerde kwaliteit van de lucht, i.e. de geur. In geval van infectieziekten kan de lucht in een ruimte bijdragen aan de overdracht van de ziekte, aangeduid als luchtgedragen transmissie of aerogene transmissie of airborne transmissie. Dit gebeurt bijvoorbeeld door de verspreiding van aerosolen¹ die virusdeeltjes bevatten. Door te ventileren kan de concentratie aan aerosolen verlaagd worden en daarmee het risico op infectie. De beste manier om het blootstellingsrisico te verminderen is door de bron, de geïnfecteerde persoon, niet in de ruimte aanwezig te laten zijn.

Bij luchtgedragen (airborne) infectieoverdracht tussen personen is het goed om te beseffen dat er overdracht mogelijk is op kortere afstand (short-range) en langere afstand (long-range) in de ruimte. In de praktijk wordt 1-2 m als afstand aangehouden tussen short-range en long-range (zie Figuur 1). Dit omdat kleine deeltjes, orde grootte 20 µm en kleiner lang in de lucht kunnen blijven zweven wanneer zij worden uitgeademd. Ter illustratie, een deeltje van 100 µm heeft ongeveer 5 seconden nodig om vanaf 1,5 meter hoogte op de grond te belanden. Een deeltje van 20 µm doet er ongeveer 2 min over, en een deeltje van 1 µm meer dan 12 uur. Ook is de concentratie aan aerosolen nabij de bron (persoon) groter dan op enige afstand ervan.

1 In dit document zal de term aerosol worden gebruikt voor hele kleine deeltjes of druppeltjes die virusdeeltjes kunnen bevatten en die een afmeting hebben in de range van ongeveer 0.5-50 µm. Zij kunnen lang in de lucht blijven zweven. Volgens een recente definitie van WHO wordt hiervoor tegenwoordig de term "infectious respiratory particles" (IRPs; infectieuze respiratoire deeltjes) gebruikt. (<https://www.who.int/publications/m/item/global-technical-consultation-report-on-proposed-terminology-for-pathogens-that-transmit-through-the-air>)



Figuur 1. Visualisatie van verspreiding van aerosolen in een ruimte.

Op korte afstand leveren de gangbare manieren om de luchtkwaliteit in een ruimte te beheersen normaal gesproken geen oplossing. Het advies was en is in dat geval nog steeds om zoveel mogelijk afstand te bewaren of tenminste gebruik te maken van persoonlijke beschermingsmaatregelen, zoals bijvoorbeeld een goed, en goed sluitend, mondkapje (bijvoorbeeld FFP2). De concentratie aan aerosolen die virusdeeltjes kunnen bevatten neemt snel af met het toenemen van de afstand tot de bron (de mond). Voor de long-range overdracht is ventilatie juist wel een belangrijke oplossing (Vermeulen, 2025). Eventueel kan de ventilatie worden ondersteund door de toepassing van luchtreiniging.

Ventilatie is het continu toevoeren van lucht in een ruimte met als doel de verontreinigingen in die ruimte af te voeren en daarmee de concentratie aan verontreiniging te verlagen. De toegevoerde lucht is daarbij schoner dan de afgevoerde lucht. De hoeveelheid ventilatie in een ruimte wordt normaal gesproken uitgedrukt in ventilatievoud [h^{-1}] of debiet [m^3/h]. Deze indicatoren geven informatie over de ventilatie op ruimteniveau. Ze doen geen uitspraak over de effectiviteit van de ventilatie wanneer het gaat om de afvoer van verontreinigingen.

Naast ventilatie kan de lucht in een ruimte ook gerecirculeerd worden. Voor de duidelijkheid, dit mag dus niet als ventilatie worden gezien. In principe is **recirculatie** minder wenselijk en wordt vaak toegepast vanuit energetisch oogpunt als de lucht wordt geconditioneerd.

Met warmteterugwin-systemen kan het energetische nadeel van ventileren met meer lucht voor een belangrijk deel worden beperkt en is dan ook een betere keuze. Recirculatie kan op ruimte en op gebouwniveau plaatsvinden. Op gebouwniveau zal de lucht in zo een geval vaak gefilterd worden. Deze oplossing kan een mogelijke aanvulling zijn op de ventilatie in geval van een pandemische situatie. Op ruimteniveau kan dit ook het geval zijn in het geval van luchtreiniging. Echter, een lokale split-unit (air

conditioning) heeft nagenoeg geen effect op de luchtkwaliteit, maar heeft wel invloed op de luchtstroming in de ruimte (Li et al., 2021). In het geval van een pandemie ligt het voor de hand dat recirculatie wordt afgeraden, tenzij de recirculeerde lucht in voldoende mate gefilterd of gedesinfecteerd kan worden zodat deze een vergelijkbare kwaliteit heeft als ventilatielucht. Mocht recirculatie ten tijde van een pandemie niet ingezet kunnen worden, dan moet het installatieontwerp zodanig zijn dat een gebouw/ruimte ook zonder het recirculatie deel op voldoende wijze geconditioneerd kan worden.

Om tijdelijk de hoeveelheid ventilatie te verhogen kan **spuien** een belangrijke rol spelen. Spuien gebeurt voornamelijk via het openen van ramen en deuren. Daarmee wordt op natuurlijke wijze meer lucht naar een ruimte gebracht en kan de concentratie van verontreinigingen in een ruimte snel worden verminderd. Het nadeel van spuien, zeker in de overgangseizoenen en winter, is dat het thermisch comfort in de ruimte normaal gesproken negatief beïnvloed zal worden. Spuien is daarom geen structurele oplossing en in een pandemie ook niet het antwoord voor het continu ondersteunen van het ontworpen ventilatiesysteem in de ruimte. Ook tijdelijk spuien, bijvoorbeeld in de pauzes op school, is niet een voldoende antwoord op onvoldoende ventilatie. De concentratie zal tijdens de les weer snel oplopen als de ramen gesloten zijn en de ventilatie onvoldoende is (Loomans et al., 2022). Een goede en voldoende ventilatie moet het uitgangspunt zijn, bij normaal gebruik, maar ook in het geval van een pandemische situatie.

Tot slot, **infiltratie**, het ongecontroleerd binnendringen van buitenlucht naar binnen wordt niet gerekend als ventilatie. In moderne energiezuinige gebouwen is infiltratie normaal gesproken beperkt. In oudere gebouwen levert infiltratie soms nog een belangrijke bijdrage in de verversing van de binnenlucht, hoewel het niet gecontroleerd is.

Aerogene transmissie van infectueuze aerosolen kan plaatsvinden op kortere afstand (short-range) en langere afstand (long-range). In de praktijk wordt een afstand van 1-2 m aanhouden voor short-range blootstelling. Ventilatie is een wezenlijk onderdeel in het reduceren van de blootstelling aan aerosolen in een ruimte (long-range). Spuien en infiltratie gelden niet als structurele oplossingen om een hoger ventilatiedebiet te genereren. Recirculatie met luchtreiniging (mobiel, of in de installatie) kan wel bijdragen aan het extra verdunnen van de concentratie aerosolen.

Type ventilatie

Er zijn verschillende manieren om ventilatie in gebouwen te realiseren: **mechanisch, natuurlijk, gecombineerd**. Moderne gebouwen en woningen zijn normaal gesproken voorzien van mechanische ventilatie (meestal afvoer of afvoer+toevoer). Hiermee kan veel beter en meer gecontroleerd een gewenst ventilatiedebiet worden gegarandeerd. Ook is het met dergelijke systemen mogelijk om het ventilatiedebiet te verhogen indien gewenst.

Door zowel de toevoer als de afvoer mechanisch uit te voeren bestaat er de mogelijkheid om warmte terug te winnen uit de afgevoerde lucht en die aan de toevoerlucht toe te voeren. Hierdoor kan een groot deel van de energetische (thermische) verliezen die bij ventilatie optreden worden beperkt en kunnen hogere ventilatiedebieten worden ingezet zonder dat dit het energiegebruik evenredig verhoogt. Bij gebruik van een natuurlijke ventilatie oplossing is dit niet het geval, los van het feit dat een goed ontwerp van natuurlijk ventilatie niet eenvoudig is. Natuurlijke ventilatie wordt gerealiseerd door drukverschillen ten gevolge van wind en/of thermische krachten. Het ventilatiedebiet bij een natuurlijk ventilatiesysteem laat zich minder eenvoudig verhogen en vanuit thermisch comfort oogpunt zullen de uitdagingen in dat geval ook groter zijn. Een natuurlijk ventilatiesysteem is niet per definitie onmogelijk, maar lijkt met de huidige eisen, met name energetisch, en de gewenste flexibiliteit en controle op constante debieten een minder goede oplossing. Gecombineerde systemen met natuurlijke toe- en mechanische afvoer, of andersom, zijn potentiële tussenoplossingen die in ieder geval wel de hoeveelheid lucht beter controleren. Het thermische comfort aspect, en met name het energetische aspect blijven dan nog wel om aandacht vragen. Dat geldt, in geval van een mechanisch systeem, bijvoorbeeld ook voor een aspect als installatiegeluid.

Mechanische ventilatie, volledig of gecombineerd met natuurlijk toe- of afvoer, is de meest betrouwbare manier om gecontroleerd een gebouw te ventileren. In alle gevallen moet rekening gehouden worden met andere aspecten die het gebruik van ventilatie kunnen beïnvloeden, bijvoorbeeld thermisch comfort en geluid.

Ventilatiedebiet

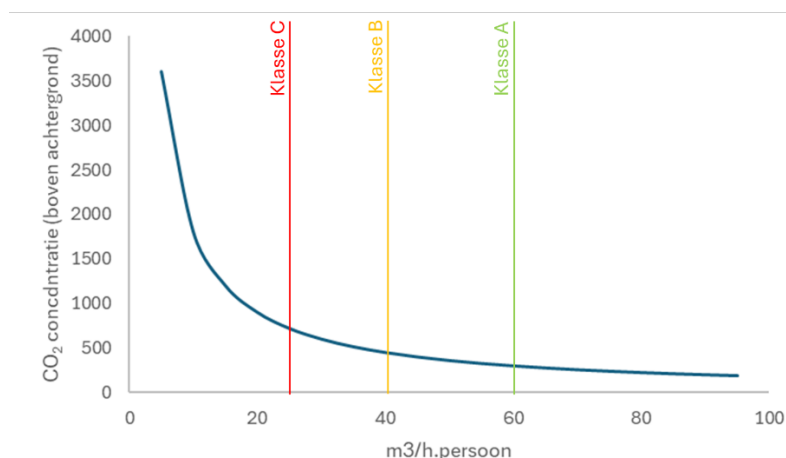
De hoeveelheid ventilatie die gewenst is in een ruimte is vastgelegd in het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl – voorheen Bouwbesluit; (Overheid, 2025)). Hierin staan de minimum eisen opgenomen waaraan ieder gebouw moet voldoen (geïnstalleerde capaciteit). Deze capaciteit is niet gebaseerd op een pandemische situatie maar heeft tot doel een zodanige ventilatiehoeveelheid te garanderen dat het binnenmilieu geen gezondheidsklachten veroorzaakt. Vanuit onderzoek blijkt dat de gehanteerde niveaus als ondergrens moeten worden gezien en dat meer ventilatie een positieve bijdrage levert aan de gezondheid en activiteiten in een gebouw.

In gebouwen die vooral bedoeld zijn voor gebruik door mensen, bijvoorbeeld scholen, kantoren, woningen, wordt de CO₂-concentratie vaak als criterium gebruikt om de hoeveelheid ventilatie te beoordelen. Dit is mogelijk omdat mensen continu CO₂ produceren. Een concentratie van ongeveer 1200 ppm wordt als de maximum aanvaardbare concentratie gezien en geeft aan dat de aanwezige ventilatiehoeveelheid in lijn is met de vereisten uit het bouwbesluit, uitgaande van de ontwerpbezetting voor de betreffende ruimte. In de verschillende Programma's van Eisen (PvE Frisse scholen, Gezonde kantoren, Gezond binnenklimaat langdurige zorg; (Loomans, et al., 2022; Platform Gezond

Binnenklimaat, 2018)) wordt dit als klasse C aangeduid. CO₂ concentraties van 750 ppm (klasse A) en 900 ppm (klasse B) geven aan dat een hoger ventilatiedebiet zou moet worden nagestreefd. Dit komt neer op respectievelijk orde grootte 25 m³/h (klasse C), 40 m³/h (klasse B) en 60 m³/h (klasse A) per persoon. Voor het PvE Frisse Scholen worden iets andere waarden per persoon aangehouden omdat de aannames voor de klassen iets verschillen.

Echter, deze debieten garanderen niet, ook niet die voor klasse A, dat er geen besmetting kan optreden wanneer in de ruimte een geïnfecteerd persoon aanwezig is. Realistisch gezien is altijd een risico op infectie aanwezig, omdat onder normale omstandigheden ventilatie de concentratie aan aerosolen met virusdeeltjes verdunt, maar niet tot nul kan brengen wanneer er een bron in de ruimte is. Daarnaast is, onder andere, het ene virus meer infectueus dan het andere virus. Denk hierbij aan het verschil in besmettelijkheid van de Omicron variant ten opzichte van de eerste 'versie' van het SARS-CoV-2 virus ('wild').

In een pandemische situatie kan het wenselijk zijn om meer capaciteit beschikbaar te hebben, maar de meerwaarde daarvan moet goed afgewogen worden. Bij een voldoende basisniveau van de ventilatie, bijvoorbeeld klasse A of B volgens het programma van eisen Frisse Scholen of Gezonde Kantoren, levert veel meer ventileren relatief minder op (zie Figuur 2 voor het verloop van de CO₂ concentratie als functie van de ventilatiehoeveelheid per persoon). Natuurlijk is relatief een significante verbetering nog steeds mogelijk bij lage waarden van de verontreiniging (bijv. CO₂ concentratie).



Figuur 2. CO₂ concentratieverloop (boven de achtergrondconcentratie) als functie van het ventilatiedebiet per persoon (CO₂ productie 0,005 l/s.persoon). De achtergrondconcentratie kan als 450 ppm worden aangenomen. Aangegeven klassen gelden voor het PvE Gezonde Kantoren.

Een dergelijk verloop is ook terug te vinden als het gaat om de concentratie van aerosolen met virusdeeltjes. Er zal daarom een optimalisatie moeten plaatsvinden vanuit het oogpunt van het acceptabel geachte risico op besmetting en bijvoorbeeld investeringen, praktische ontwerpimplicaties en onderhoud.

Bij onvoldoende ventilatie is er wel duidelijk een meerwaarde om ervoor te zorgen dat het ventilatiedebiet op orde wordt gebracht, minimaal in overeenstemming met het Bbl, maar beter kan een keuze gemaakt worden voor bijvoorbeeld Klasse B van het PvE Gezonde Kantoren. Een dergelijke verbetering is niet alleen goed in relatie tot de besmettingskans.

De keuze voor een bepaald ventilatiedebiet in relatie tot de besmettingskans is niet eenvoudig te bepalen. Hiervoor moet er kennis zijn over de dosis-respons en zijn modellen benodigd (Vermeulen, 2025). Refererend aan een relatief eenvoudig model zoals Wells-Riley (Loomans et al., 2020), wordt de besmettingskans bepaald door de hoeveelheid virusdeeltjes die ingeademd wordt, de dosis. De respons wordt bepaald door de infectiviteit van het virus. Het aantal virusdeeltjes dat wordt ingeademd wordt bepaald door *de concentratie aan ingeademde virusdeeltjes in de lucht, het ademhalingsdebiet en de blootstellingstijd*. Een lagere concentratie, een rustige ademhaling en een korte blootstellingstijd verminderen het risico dat een hoeveelheid virusdeeltjes wordt ingeademd die tot een besmetting kan leiden.

Bijkomende onzekerheid in de bepaling van het ventilatiedebiet in relatie tot de besmettingskans is dat een geïnfecteerd persoon niet een vast aantal virusdeeltjes produceert. Dit kan ordes van grootte verschillen. Daarnaast is de infectiviteit van een nieuw virus normaal gesproken nog niet bekend en kan ook variëren, zoals ook het geval was voor het SARS-CoV-2 virus. Dat zou betekenen dat het ventilatiedebiet dus moet variëren met de infectiviteit van het virus om eenzelfde besmettingskans te houden.

Dit pleit ervoor om niet uit te gaan van zeer hoge ventilatiedebieten met het oog op het vast nastreven van een bepaalde besmettingskans. In onder andere het REHVA Report "Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases" (REHVA, 2023) worden voorbeelden gegeven van debieten die zijn bepaald voor SARS-CoV-2 bij een gegeven waarschijnlijkheid van infectie. Uit de voorbeelden die daar zijn berekend komt naar voren dat met name vergaderruimtes, restaurants en sportruimtes hogere debieten vereisen in geval van een pandemische situatie. Dit is met name te wijten aan het feit dat door de activiteiten (spreken, sporten) in deze ruimtes meer aerosolen door mensen worden geproduceerd, of in ieder geval op basis van de overeenkomstige aannames die hiervoor in de het rapport zijn gedaan. Deze aerosolen kunnen virusdeeltjes bevatten. Omdat het activiteitsniveau voor het produceren van aerosolen niet evenredig is met de CO₂ productie bij een bepaald activiteitsniveau van een persoon, is de CO₂ concentratie ook niet perse een goede marker voor de mate van blootstelling. De CO₂ concentratie blijft vooral een indicator voor de mate van ventilatie in een ruimte die wordt gebruikt door mensen.

ASHRAE kent een speciale standaard 241-2023 (ASHRAE, 2023) die eisen stelt aan de minimaal vereiste (equivalente) schone lucht die de ademzone van een persoon bereikt in geval van een situatie

met infectierisico. Ook hier worden hogere waardes gegeven voor een sportruimte. Maar ook een wachtruimte, onder andere in de gezondheidszorg, vraagt om aandacht.

Tabel 1 geeft een illustratie van debieten (l/s per persoon) die worden gehanteerd in beide publicaties. De gegevens die in het REHVA document zijn afgeleid hebben betrekking op SARS-CoV-2, met de ten tijde van de publicatie geldende gegevens over dit virus. Voor de gegevens uit ASHRAE wordt uitgegaan van een blootstelling van 1 uur. Een probabilistisch model is gebruikt om vele scenario's in de analyse mee te nemen ten aanzien van onder andere de variatie in quanta emissie per persoon. Het is belangrijk om te beseffen dat de genoemde waardes op basis van aannames zijn bepaald.

Tabel 1. Enkele voorbeelden (selectie) van ventilatiedebieten per persoon in het geval van een pandemische situatie volgens (ASHRAE, 2023) en (REHVA, 2023).

ASHRAE		REHVA		
	ECAi [l/(s pers)] ^a		A/H/P/VE ^b	Debiet [l/(s pers)]
Kantoor	15	Kantoor	56.7/2.6/6/0.8	16.5
		Kantoor	173.0/2.6/17/0.6	25.4
		Vergaderruimte	29.2/2.6/10/1.0	34.2
		Vergaderruimte	52.5/3.2/24/0.8	45.8
Klaslokaal	20	Klaslokaal	56.5/2.9/25/0.9	8.9
		Collegezaal	129.5/2.9/50/0.6	13.3
		Sportzaal	173.5/3.5/12/0.6	86.5
		Sprothol school	217.5/6.0/25/0.5	109.1
Behandelruimte (zorg, meerdere personen)	35			
Patientenkamer (zorg)	25			
Wachtruimte (zorg)	45			
Restaurant	30	Restaurant	259.5/2.9/154/0.6	64.3
Kerk	25			
Woning	15			

- a) ECAi = minimum Equivalent Clean Airflow per persoon in de ademzone (0.75 – 1.8m hoogte, 0.6 m van de wanden) in de zogenaamde infection risk modus (IRMM). Merk op dat de effectiviteit van de ventilatie niet hierin is opgenomen. De waarden gaan uit van een blootstelling van 1 uur.
- b) A/H/P/VE = oppervlakte/hoogte/aantal personen/ventilatie effectiviteit (zie paragraaf effectiviteit van ventilatie).

De gehanteerde debieten in beide documenten vereisen waardes tot orde grootte van 150 m³/h per persoon in geval van een situatie met een infectierisico. Hierbij zijn aannames gedaan over het vloeroppervlak en de bezetting. Deze waardes zijn duidelijk hoger dan de eisen volgens bijvoorbeeld het PvE Gezonde Kantoren. Voor beide geldt dat de benodigde ventilatie ook bereikt mag worden met

behulp van bijvoorbeeld luchtreinigers. Minimale eisen aan de ventilatie volgens de geldende normen is echter een vereiste.

In de studie van Bartels et al. (2021) blijkt dat met name aandacht moet worden gegeven aan locaties waar het aantal personen per m^2 hoog is, en men gedurende langere tijd verblijft.

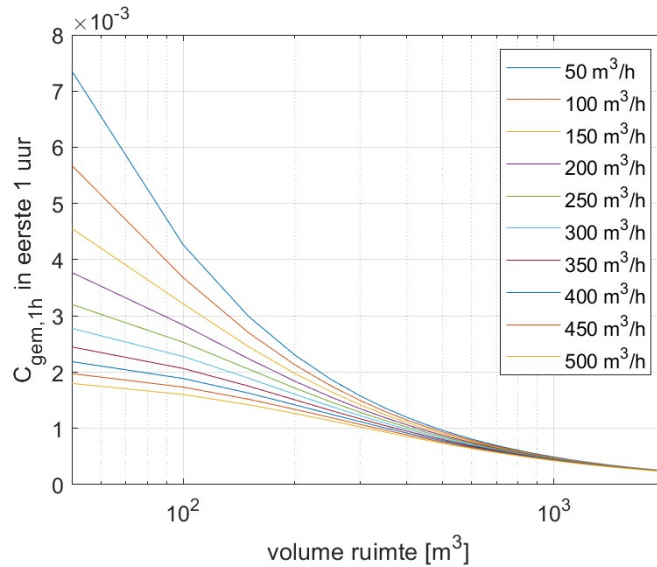
Een alternatief mogelijk advies wordt gegeven in Morawska et al. (2024). Hier wordt uitgegaan van een CO_2 concentratie van 800 ppm als basisventilatie niveau ($50 \text{ m}^3/\text{h}$ per persoon). Ook deze waarde is gebaseerd op verschillende aannames, in dit geval voor een klaslokaal. Deze waarde ligt in de orde van klasse A/B van de in Nederland beschikbare Programma's van Eisen. De achterliggende gedachte bij een voldoende basisventilatie niveau is dat virussen altijd in de lucht aanwezig kunnen zijn, niet alleen wanneer er sprake is van een pandemische situatie.

Het is belangrijk om te beseffen dat in geval van een pandemische situatie het debiet moet worden bepaald op de ontwerpbezetting, dus niet op de werkelijke bezetting. De CO_2 concentratie zal bij een lagere bezetting afnemen, echter het risico op infectie voor de personen in een ruimte wordt niet wezenlijk beïnvloed door een lagere bezettingsgraad, zolang de geïnfecteerde persoon nog aanwezig is in de ruimte (Franchimon & Loomans, 2021). Daarom wordt het gebruik van CO_2 gestuurde ventilatie in een pandemische situatie ontraden. In zo een situatie zou deze uitgeschakeld moeten worden of op een lage waarde moeten worden ingesteld, bijv 550 ppm (REHVA, 2023). Het is ook belangrijk om te beseffen dat in normale omstandigheden, bij CO_2 gestuurde ventilatie, de productie van CO_2 per persoon (leeftijd, man/vrouw) kan verschillen. Met name bij ouderen is de CO_2 productie verlaagd (Persily & de Jonge, 2017). Dit betekent dat voor een zelfde ventilatiedebiet, de CO_2 richtwaarde bij CO_2 gestuurde ventilatie moet worden verlaagd.

Naast het debiet, bepaalt ook het volume van de ruimte hoe de opbouw van de concentratie, in de tijd, in een ruimte is. Dit kan worden weergegeven met het ventilatievoud $[\text{h}^{-1}]$. Dit is het aantal keer per uur dat het gehele volume van een ruimte wordt ververs met schone ventilatielucht. In de vergelijking tussen een kleine en een grote ruimte, gegeven een zelfde ventilatiedebiet, heeft een kleine ruimte in dat geval een hogere ventilatievoud. Gegeven een constante bron, zal de concentratie in een grote ruimte dan langzamer oplopen dan in een kleine ruimte, de hoeveelheid wordt verdeeld over een groter volume. Voor een zelfde dosis aan virusdeeltjes over een gegeven tijdsinterval, nadat een bron in de ruimte treedt, betekent dit dat in een kleinere ruimte een hogere ventilatiedebiet gewenst is.

Dit effect wordt getoond in Figuur 3 (berekening gebaseerd op (Peng et al., 2022)). Hierin is de gemiddelde concentratie ($C_{\text{gem},1\text{h}}$ [unit/ m^3]) weergegeven bij een blootstelling gedurende 1 uur, uitgaande van een bron van 1 unit/uur, wanneer gestart wordt in een ruimte die geen verontreiniging bevat. In de figuur zijn resultaten voor verschillende ventilatiedebieten weergegeven. Op de x-as staat het volume van de ruimte. Uit de figuur kan bijvoorbeeld afgelezen worden dat een ruimte van 100 m^3 ,

een ventilatiedebiet van ongeveer 375 m³/h nodig heeft om $C_{gem,1h} < 2 \times 10^{-3}$ [unit/m³] te houden. Voor een twee keer zo grote ruimte kan het debiet kleiner zijn, 150 m³/h. De dosis wordt bepaald door $C_{gem,1h}$ te vermenigvuldigen met het ademhalingsvolume gedurende deze periode.



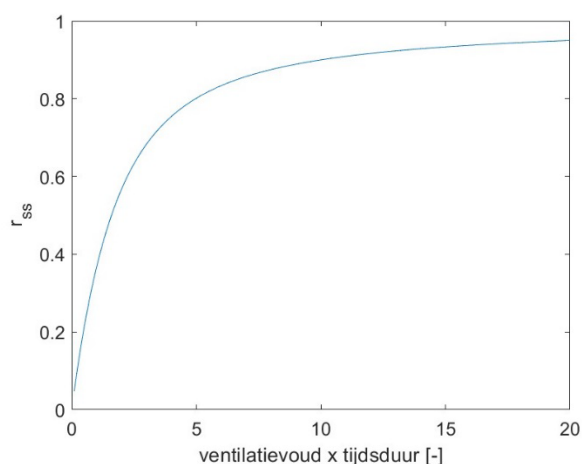
Figuur 3. Gemiddelde concentratie in eerste uur na blootstelling als functie van het volume van de ruimte, bij verschillende ventilatiedebieten (zie tekst voor verdere toelichting).

Meer algemeen kan het effect van het volume en debiet op $C_{gem,xh}$ worden uitgedrukt wanneer het ventilatievoud met de blootstellingstijd wordt vermenigvuldigd (Peng et al., 2022). De waarde van deze correctiefactor (r_{ss}), als functie van het ventilatievoud vermenigvuldigd met de blootstellingstijd, is weergegeven in Figuur 4. De gemiddelde concentratie $C_{gem,xh}$ kan dan worden berekend middels:

$$C_{gem,xh} = r_{ss} \times C_{steady\ state}$$

$$C_{steady\ state} = bron/ventilatiedebiet$$

Waarbij r_{ss} de correctiefactor is en $C_{steady\ state}$ de concentratie in de stationaire situatie. r_{ss} is een functie van het ventilatievoud [h⁻¹] en de tijdsduur [h] van de blootstelling wanneer wordt gestart wordt vanuit een situatie zonder blootstelling en een bron die de ruimte betreedt. $C_{gem,xh}$ geeft een meer reële waarde weer van de blootstelling aan pathogenen in het geval een ruimte kort wordt gebruikt.



Figuur 4 Correctiefactor (r_{ss}) bij opbouw van de concentratie als functie van het ventilatievoud [h^{-1}] x tijdsduur (h) van de blootstelling.

Zoals eerder aangegeven voor de richtlijnen van ASHRAE en REHVA, is het is niet per se nodig om de gewenste debieten in geval van een pandemische situatie alleen te bereiken met ventilatie en dus lucht van buiten. Met luchtreiniging kan ook een deel van de benodigde hoeveelheid schone lucht worden gerealiseerd, zolang tenminste aan de vereiste ventilatiedebieten vanuit het Bbl of, indien van toepassing, een programma van eisen (bijv. (Platform Gezond Binnenklimaat, 2018)) wordt voldaan.

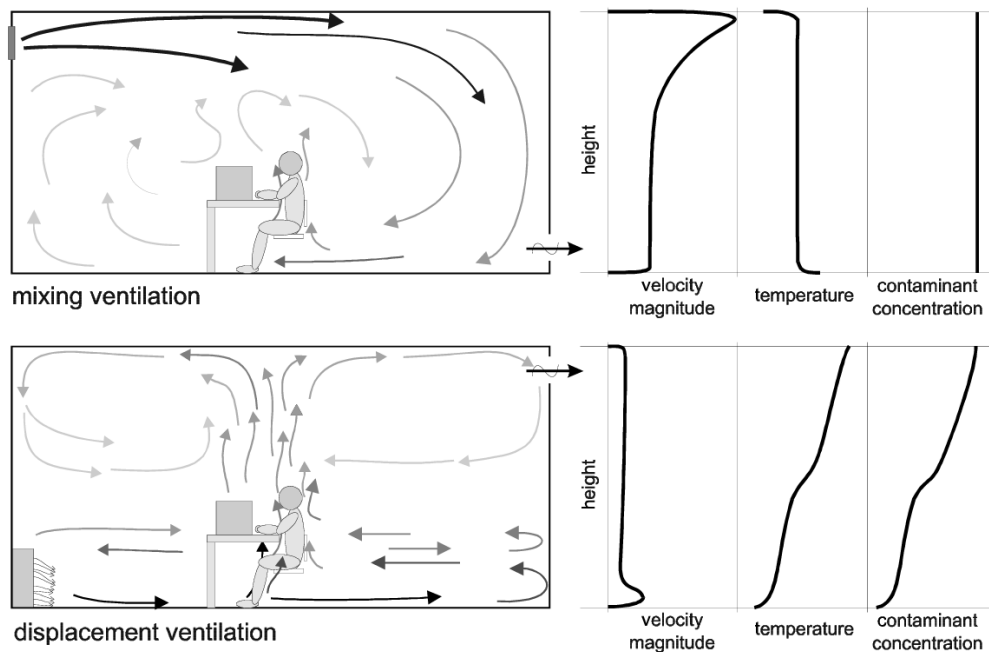
Daarnaast kan de effectiviteit van de ventilatie worden vergroot. In de discussie hierboven wordt steeds uitgegaan van een perfect gemengde situatie². Dat wil zeggen dat de toegevoerde schone lucht instantaan en uniform wordt verdeeld over de ruimte. Hetzelfde geldt voor de bron (i.e. persoon die pathogenen uitstoot). In de realiteit is dat niet het geval en is het mogelijk de effectiviteit van de ventilatie te verhogen door de toegevoerde lucht dichterbij de gebruikers van een ruimte in te brengen of ervoor te zorgen dat een bron dicht bij de afvoer is gelokaliseerd. Anderzijds is het ook mogelijk dat de ventilatie minder effectief is doordat hier geen rekening mee is gehouden. Ook kan het zo zijn dat de temperatuurcondities van de toevoerlucht en de ruimte de effectiviteit van een ventilatie ontwerp teniet doen. Dit betekent dat naast het ventilatiedebiet, ook het ontwerp van de ventilatie van een ruimte aandacht behoeft.

Het benodigde ventilatiedebiet in geval van een pandemie is hoger dan onder normale omstandigheden. Het benodigde effectieve debiet wordt o.a. bepaald door de infectiviteit van het virus, de blootstellingsduur en het risico dat acceptabel wordt geacht. Internationale richtlijnen zijn hiervoor beschikbaar, maar zouden ook in overleg voor Nederland afgeleid kunnen worden. Correcties op het debiet zijn mogelijk wanneer bijvoorbeeld de gebruiksduur in acht wordt genomen, evenals de effectiviteit van de ventilatie. In plaats van enkel ventilatie kan aanvullend ook luchtreiniging ingezet worden om de extra behoefte aan verlaging van de concentratie aan aerosolen te realiseren.

² Bij de voorbeelden uit de REHVA richtlijn in Tabel 1 wordt de ventilatie effectiviteit al verdisconteerd.

Ventilatieontwerp

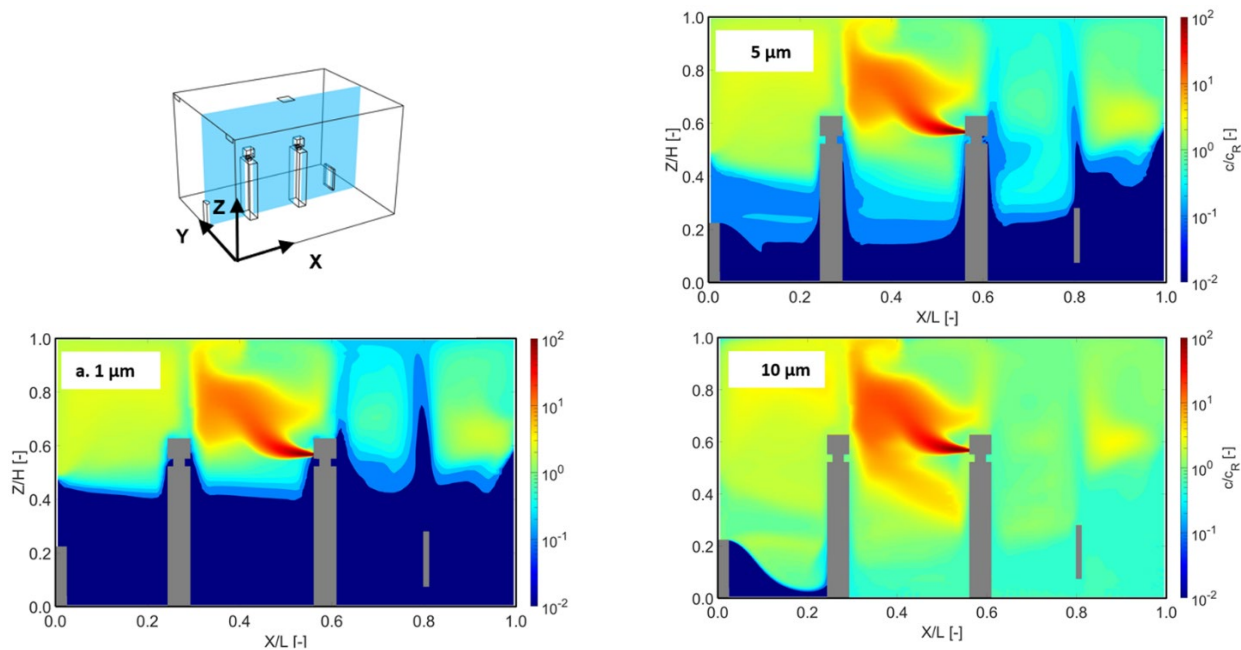
Bij het ontwerp van de ventilatie in een ruimte zal vaak worden verondersteld dat deze goed gemengd is. Het ventilatiesysteem dat hierop is gebaseerd wordt *mengventilatie* genoemd. Voor kleinere ruimtes, tot ongeveer 50 m² (REHVA, 2023), zal deze veronderstelling eerder, maar niet per definitie (!), correct zijn dan voor grotere ruimtes. Er zijn echter enkele ventilatieconcepten waarbij op voorhand al duidelijk is dat er niet sprake zal zijn van een mengsituatie. De meest bekende is *verdringingsventilatie*. Figuur 5 geeft de verschillen in condities weer die bij deze twee verschillende ontwerp oplossingen voor ventilatie optreden. Het is belangrijk om te beseffen dat verdringingsventilatie alleen werkt voor een situatie waarin de ruimte gekoeld moet worden, zodat lucht met een lagere temperatuur de ruimte wordt ingeblazen.



Figuur 5. Vergelijk van de karakteristieke verticale profielen voor luchtsnelheid, temperatuur en de contaminatieconcentratie voor een typische mengventilatie en verdringingsventilatie systeem (Loomans, 1998).

Doordat bij verdringingsventilatie de meest verontreinigde lucht uit de ruimte wordt afgevoerd zal de gemiddelde concentratie aan verontreinigingen in de ruimte, met name de leefzone, lager zijn in vergelijking met een mengventilatie oplossing. Verdringingsventilatie kan daarmee in principe effectiever verontreinigingen afvoeren die door een persoon in die ruimte worden geproduceerd. Echter, in geval van een besmet persoon die bijvoorbeeld spreekt of hoest, hoeft dit niet perse het geval te zijn. Aerosolen kunnen in dat geval door de grenslaag rondom een persoon gaan en in de ruimte komen (Bjørn & Nielsen, 2002). Door de stratificatie die bij een verdringingsventilatie normaal gesproken optreedt kunnen aerosolen langer in de ruimte blijven 'hangen'. Grotere deeltjes kunnen ook in de schone laag terecht komen zoals Figuur 6 laat zien. Daarom kan niet worden gezegd dat, in het geval

van een risico op besmetting, verdringingsventilatie in alle gevallen een beter ventilatieconcept is dan mengventilatie. Beide concepten moeten op deze specifieke effectiviteit worden getoetst.



Figuur 6. Voorbeeld van een CFD-simulatie van de deeltjesconcentratie voor verschillende afmetingen van een deeltje bij een verdringingsventilatie systeem. CR is de deeltjes concentratie aan de afvoer. In alle gevallen blijft een gradiënt herkenbaar.

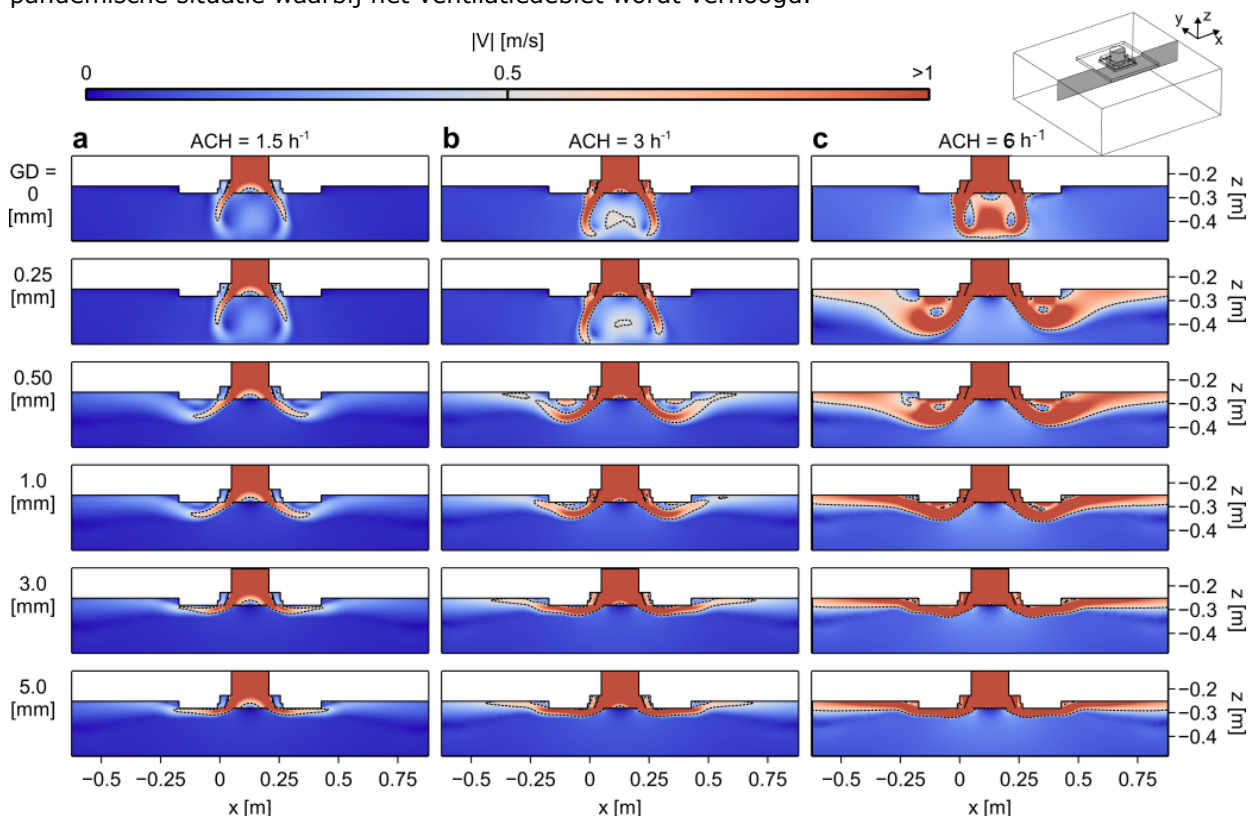
Naast mengventilatie en verdringingsventilatie is er ook de mogelijkheid om lucht lokaal in de ruimte toe te voeren, *lokale ventilatie*, bijvoorbeeld nabij de ademzone van een persoon. Deze oplossing maakt het mogelijk om heel effectief te ventileren (Melikov, 2004). In de praktijk worden zulke oplossingen op dit moment nauwelijks nog gebruikt. Het toepassen van dergelijke oplossingen enkel vanuit het oogpunt van besmettingskans lijkt vooralsnog niet realistisch. Echter, voor specifieke situaties waar mensen op vaste posities en relatief dicht bij elkaar verblijven zou het toepassen van lokale ventilatie wel een interessante oplossing kunnen zijn die bij een nieuw ontwerp overwogen zou kunnen worden. Gedacht kan worden aan bijvoorbeeld bioscopen en openbaar vervoer.

Tot slot zijn er nog ventilatieconcepten die enkel in speciale ruimtes worden gebruikt, zoals een operatiekamer of cleanroom. Hier is vaak sprake van grote hoeveelheden lucht die over een relatief groot oppervlak de ruimte in wordt geblazen. Daarmee kan er voor gezorgd worden dat er zeer schone gebieden in de ruimte ontstaan, die een vergelijkbare kwaliteit hebben als de toegevoerde lucht. Dergelijke oplossingen zijn echter niet geschikt (gewenst) voor bijvoorbeeld kantoor situaties of een woonkamer in de langdurige zorg.

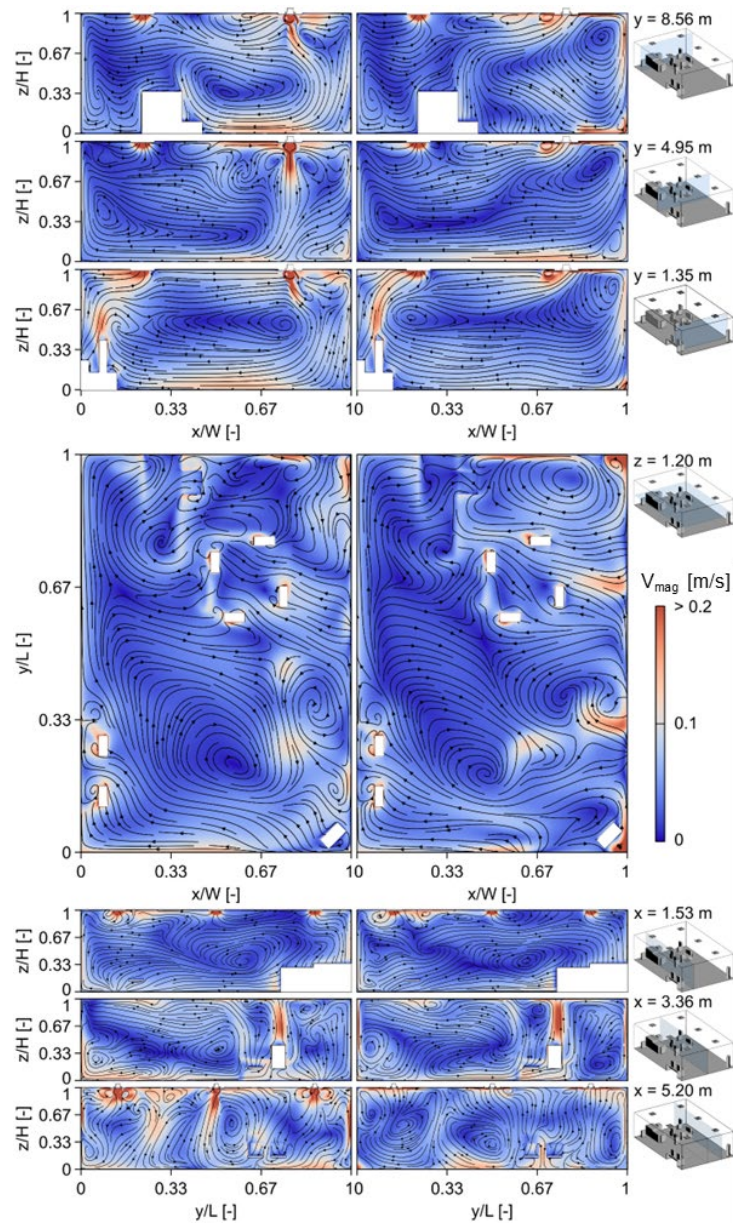
Een overzicht van waarden voor de effectiviteit van een ventilatieontwerp wordt bijvoorbeeld gegeven in (ASHRAE, 2019). Het ventilatiedebiet zou voor deze effectiviteit, zeker in geval van een gereduceerde effectiviteit, moeten worden gecorrigeerd.

Een belangrijk aspect bij het ontwerp van de ventilatie voor een ruimte is de keuze van het toevoerrooster, met name voor mengventilatie oplossingen. De keuze van het afvoerrooster is normaal gesproken minder van belang. Echter, het toevoerrooster bepaalt hoe de toevoerlucht de ruimte wordt ingebracht, dit wordt ook de worp genoemd. Normaal gesproken wordt bij een mengend systeem met een relatief hoge snelheid de lucht toegevoerd. Het doel is dat de luchtstroming in de leefzone (tot ongeveer 2 meter hoogte) niet tot tochtklachten leidt (Fanger et al., 1988). In bijvoorbeeld een woonkamer in de langdurige zorg is dit een meer kritisch punt en vraagt om extra aandacht (Zhou et al., 2025).

Wordt in een geval van een pandemische situatie ervoor gekozen om het ventilatiedebiet te verhogen, dan kan dit de worp van de toevoerlucht beïnvloeden en daarmee de effectiviteit van de ventilatie (zie Figuur 7. In overleg met de leveranciers van roosters zal moeten worden beoordeeld in hoeverre het rooster geschikt is, ofwel in hoeverre de worp verandert en niet leidt tot tochtklachten, in geval van een pandemische situatie waarbij het ventilatiedebiet wordt verhoogd.



Figuur 7. CFD-studie naar het effect van debiet (ACH: ventilatievoud) en spleetgrootte (gap distance (GD): 0-5 mm) voor een in de praktijk veel toegepast rooster. De spleetgrootte kan worden beïnvloed door de installatie van het rooster. De uitvoering speelt daarmee ook een belangrijke rol bij het realiseren van de gewenste luchtstroming nabij de toevoer.



Figuur 8. Effect van een andere worp van de toevoer op het stromingspatroon in de ruimte, bij een ventilatievoud van 2 ACH: (links) rooster met een spleethoogte van 0 mm [worp verticaal omlaag], (rechts) rooster met een spleethoogte van 5 mm [worp horizontaal]. De ruimte, een vereenvoudigde weergave van een huiskamer in de langdurige zorg, is gemodelleerd naar de experimenten van (de Lange & Kompatscher, 2025).

De ventilatie in ruimtes groter dan 50 m² mag per definitie niet perfect gemengd worden verondersteld. Voor kleinere ruimtes kan dit ook nog steeds gelden. Verschillende ventilatieconcepten kunnen worden ingezet, die afhankelijk van de toevoercondities een bepaalde effectiviteit hebben. Verdringingsventilatie is niet perse de beste oplossing in het kader van afvoer van aerosolen door ademen. Lokale ventilatie is interessant voor situaties waarbij mensen een vaste positie in de ruimte hebben. In het ontwerp en uitvoering is aandacht nodig voor de worp van een toevoer wanneer, in geval van een pandemische situatie, hiermee een ander debiet wordt geleverd.

Effectiviteit van ventilatie

Ondanks de beschikbare (theoretische) concepten en de kennis daarover, zal in alle gevallen in principe de effectiviteit van de ventilatie in de context van verspreiding van pathogenen moeten worden aangetoond. Dit omdat in de praktijk er altijd gradiënten in een ruimte ontstaan als het gaat om de concentratie aan aerosolen (pathogenen). Er bestaat op dit moment geen beste oplossing waar het gaat om het toepassen van een ventilatieconcept. Dit is onder andere afhankelijk van het type ruimte, het ruimtegebruik, mogelijke bronposities en overige eisen die aan het binnenklimaat en gebruik van een ruimte gesteld moeten worden. Wat het binnenklimaat betreft kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het thermisch comfort. Zo is bijvoorbeeld tocht in de context van de langdurige zorg een belangrijke parameter (Zhou et al. 2025). Voor wat betreft de blootstelling aan pathogenen, enkel in een theoretisch geval zal een risico op besmetting van 0% kunnen worden gerealiseerd.

Effectiviteit van ventilatie kan op meerdere manieren worden aangetoond. In de context van de afvoer van pathogenen is de zogenaamde contaminant removal effectiveness (CRE: ε_i^c ; in EN16798-3 (Nederlands Normalisatie Instituut, 2022) ook aangeduid als ε_v , ventilation effectiveness) de meest voor de hand liggende indicator. Deze (lokale) indicator is gedefinieerd als de steady-state concentratie van de verontreiniging in de afvoer (c_e) gedeeld door de steady-state concentratie van de verontreiniging op een punt in de ruimte (c_i), meest relevant de ademzone, eventueel gecorrigeerd voor de concentratie in de toevoer (c_o).

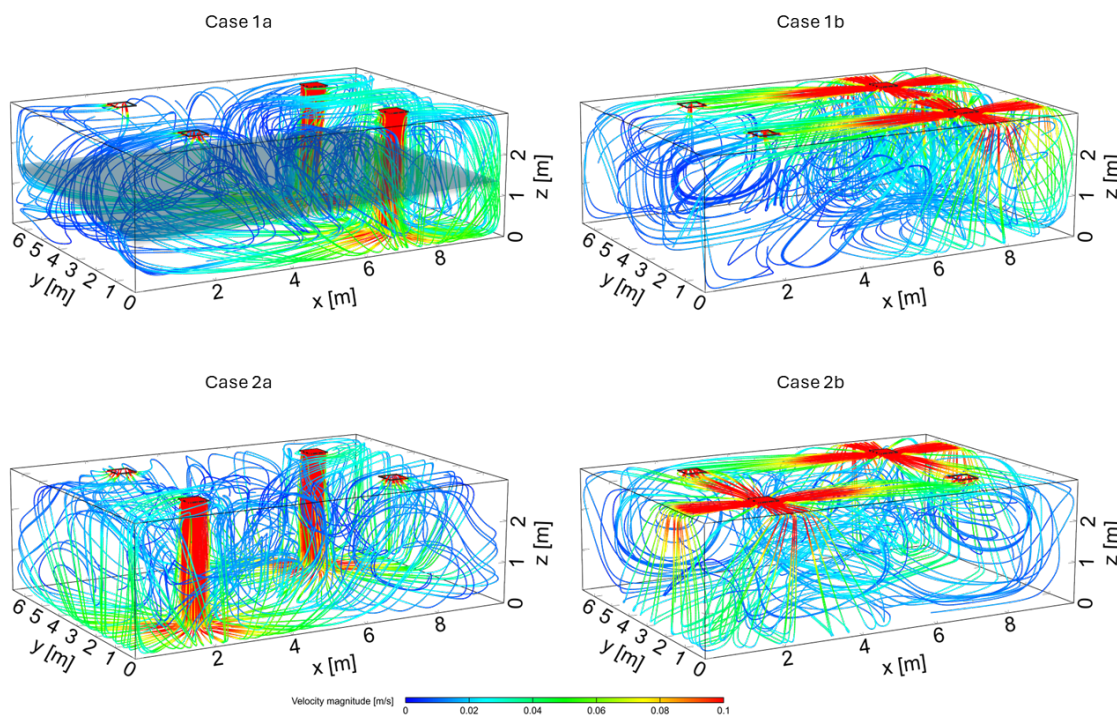
$$\varepsilon_i^c = \frac{c_e - c_o}{c_i - c_o}$$

De CRE voor de ruimte als geheel (ε^c) kan worden bepaald door uit te gaan van de gemiddelde concentratie in de ruimte. In geval van perfecte mengventilatie zal ε_i^c in de hele ruimte gelijk aan 1 zijn en ε^c dus ook. In geval van een effectievere ventilatie zal ε^c groter dan 1 zijn en levert een bepaald ventilatiedebiet dus een lagere gemiddelde concentratie in de ruimte op dan wanneer uitgegaan wordt van perfecte menging, of kan met een kleiner ventilatiedebiet dezelfde luchtkwaliteit worden bereikt. Andersom, indien ε^c kleiner is dan 1, is de effectiviteit van de ventilatie minder. Een dergelijke situatie kan ontstaan wanneer er kortsluiting kan optreden tussen toegevoerde en afgevoerde lucht. Dit moet in het ontwerp te allen tijde voorkomen worden. Lokaal kan ε_i^c sterk variëren en wanneer schone lucht dichtbij de ingeademde lucht wordt ingebracht kan de lokale CRE waarden bereiken $\gg 1$, ofwel zeer efficiënte ventilatie.

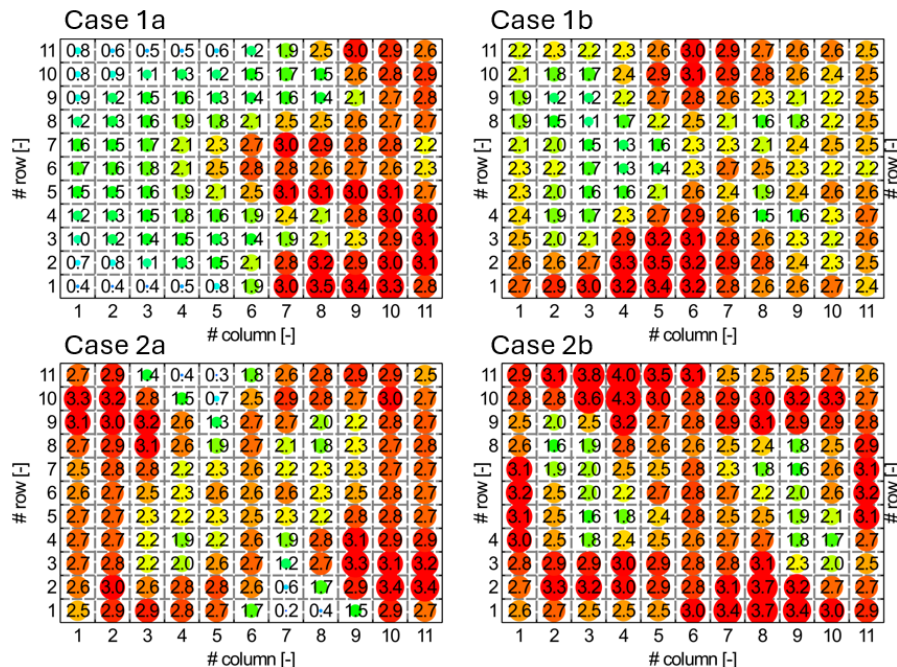
De CRE wordt afgeleid voor een bepaalde positie van een verontreinigingsbron in de ruimte, bijvoorbeeld de mond van een geïnfecteerd persoon. Dit betekent dat bij een andere positie van de bron andere waarden voor de CRE afgeleid zullen worden. Als niet duidelijk is waar de bron zich zal bevinden in een ruimte dan moet hier dus rekening mee worden gehouden. Een voorbeeld van een werkwijze in dat geval is om een regelmatig grid te veronderstellen in de ruimte. Voor iedere gridcel kan dan een bron worden verondersteld waarvoor afzonderlijk de resulterende CRE kan worden

afgeleid. Om het aantal mogelijke bronnen en evaluatieposities te beperken kan uitgegaan worden van een vlak op ademhoogte, zowel voor de bronposities als voor de evaluatie. Deze aanpak is eenvoudiger toe te passen bij een numerieke simulatie met behulp van CFD dan in een experimentele opstelling. In het laatste geval zullen de meest relevante bronlocaties moeten worden bepaald.

Een belangrijk criterium in de evaluaties is hoe de bron wordt aangenomen. In geval van een rustig ademend persoon kan worden aangenomen dat de bron geen impuls (en dus richting) heeft (Paauw & Hornstra, 2024). Om de problematiek niet te complex te maken, lijkt dit een goed uitgangspunt, ook omdat we geïnteresseerd zijn in de effecten op enige afstand van de bron. Ook zouden in dat geval de thermische effecten nog verwaarloosd kunnen worden. Figuur 8 geeft een voorbeeld van een evaluatie van een viertal zeer eenvoudige ventilatieontwerpen voor een grote ruimte volgens bovengenoemde principe (Loomans et al., 2025). Het bovenste deel van de figuur geeft het verloop van de luchtstroming in de ruimte weer, inclusief de snelheid. Het onderste deel toont het resultaat voor een grid met bronlocaties op ademhoogte (1.2 m) over de ruimte (in Case 1a [Figuur 8] is dit vlak aangegeven). Bij de betreffende positie van de bron in het grid is de gemiddelde verontreinigingsconcentratie over dit vlak op 1.2 m hoogte bepaald en weergegeven in een getal en kleur. In totaal is dit per case voor alle 121 mogelijke bronposities bepaald.



Figuur 9. Voorbeeld van vier cases met een bepaalde luchtstroming in de ruimte en de effectiviteit waarmee een verontreiniging op een bepaalde locatie in de ruimte wordt afgevoerd. Bij Case 1# is de toe- en afvoer aan afzonderlijke zijdes van de ruimte aangenomen, bij Case2# zijn ze diagonaal geplaatst. Bij Case#a wordt een eenvoudige opening (rooster) als toevoer verondersteld, bij Case#b is een horizontale plaat op korte afstand van de opening geplaatst zodat de lucht horizontaal langs het plafond gaat. Voor case 1a (bovenste deel figuur) is het vlak aangegeven waarover de bronlocaties zijn onderzocht en de resultaten over gemiddeld.

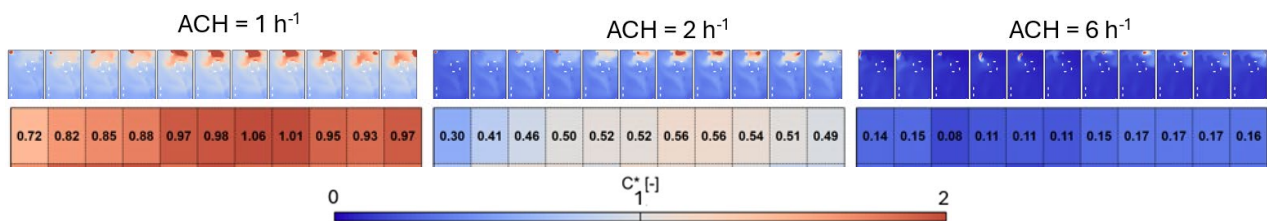


Figuur 9. (vervolg)

Het voorbeeld voor deze zeer eenvoudige case laat zien dat het positioneren van toe- en afvoer aan afzonderlijke zijden in de ruimte in dit geval gemiddeld genomen effectiever is dan een diagonale verdeling ervan. Het toepassen van een ander roosterontwerp (vergelijk Case #a en #b) beïnvloedt de effectiviteit ook duidelijk. Ook laten Case 1a en 1b zien dat verontreinigingsbronnen effectiever worden afgevoerd als deze, bij dit ontwerp, dichter bij de afvoer worden geplaatst. Dit is echter geen algemene conclusie, want normaal gesproken zal de luchtstroming in de ruimte door velerlei zaken worden beïnvloedt, zoals verstoringen in de ruimte, thermische effecten en het ontwerp van de toevoer. Ook moet worden opgemerkt dat de gemiddelde waarde niet weergeeft hoe de verdeling in de ruimte is voor die bronpositie, bijvoorbeeld in de vorm van de standaard deviatie. Een uitgebreid voorbeeld van simulatieresultaten van een meer complexe ruimte, een woonkamer in de langdurige zorg (zie ook Figuur 8), is weergegeven in Annex B. In het voorbeeld wordt ook de concentratieverdeling getoond en is gevarieerd met het ventilatievoud, het aantal toe- en afvoerroosters, en het effect van een verschillende worp van de toevoer op de concentratieverdeling. Deze varianten maken duidelijk dat er veel variatie mogelijk is wanneer het gaat om de ventilatie van een ruimte en het effect van randvoorwaarden op de verspreiding van verontreinigingen. Naast deze numerieke (CFD-) studies zijn er ook verschillende metingen uitgevoerd in een test faciliteit die een huiskamer van een langdurige zorg representeert (de Lange & Kompatscher, 2025).

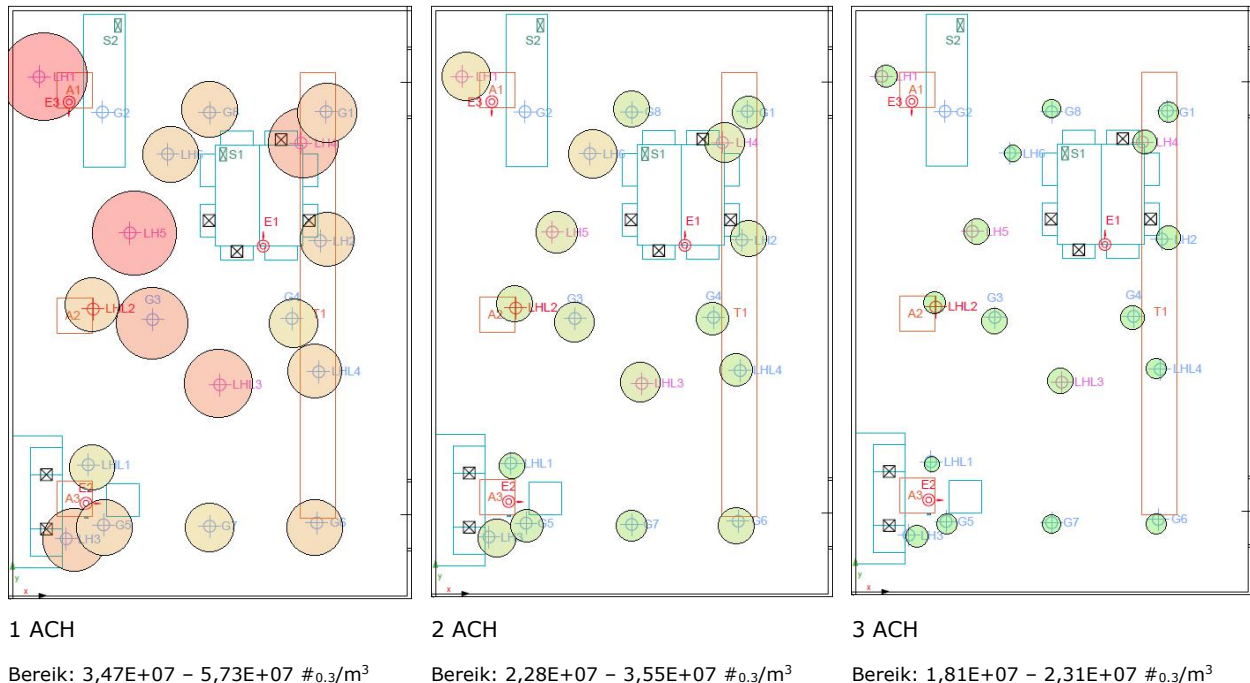
Figuur 10 laat een deelresultaat (numerieke simulatie) zien van het effect van een verhoogd ventilatievoud op de verspreiding van de contaminatie en de absolute concentratie. Dit is voor de configuratie met drie toevoer- en drie afvoerpunten. Meer voorbeelden, voor verschillende toe- en afvoerconfiguraties, en voor 121 bronposities per situatie, zijn in de Annex B te vinden. Uit het

voorbeeld van Figuur 10 wordt duidelijk dat er concentratiegradiënten in de ruimte optreden. Die zijn het meest duidelijk voor de case $ACH = 1 \text{ h}^{-1}$ en zijn kleiner voor hogere debieten. Deels wordt dit verklaard door de extra menging vanwege de grotere luchthoeveelheden die in de ruimte circuleren. Daarnaast leidt een hoger ventilatievoud ook tot een duidelijk lagere gemiddelde concentratie in de ruimte. Deze resultaten zijn in overeenstemming met eerdere studies (bijv. Qin et al. 2024). In het voorbeeld in Figuur 10 is ook af te leiden dat de luchtstroming in de ruimte enigszins verandert wanneer het debiet wordt verhoogd. Dit betekent dat men niet zondermeer mag extrapoleren bij een hoger ventilatievoud, hoewel het gemiddelde effect van een duidelijk hogere ventilatievoud normaal gesproken zwaarder zal wegen.



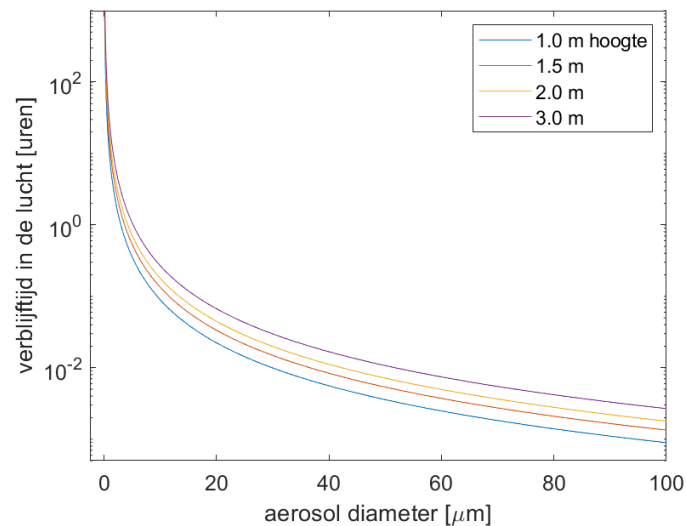
Figuur 10. Voorbeeld van de genormaliseerde concentratieverdeling (C^*) van verontreiniging in een ruimte, in een vlak op ademhoogte, voor drie verschillende ventilatievouden en voor 11 verschillende posities van de bron langs één zijde van de wand. In totaal zijn resultaten van 33 berekeningen getoond. De bovenstaande rij resultaten geeft de concentratieverdeling in de ruimte weer, de onderste rij geeft de gemiddelde concentratie in de ruimte op ademhoogte weer. De onderzochte ruimte is dezelfde als die is getoond in Figuur 8. Normalisatie van C^* heeft plaatsgevonden naar de theoretisch gemiddelde concentratie voor $ACH = 1 \text{ h}^{-1}$ en de weergave is geclept bij een waarde van 2.

Vergelijkbare resultaten zijn ook uit metingen afgeleid (de Lange & Kompatscher, 2025). Figuur 11 toont een voorbeeld van de meetresultaten bij verschillende ventilatievouden. In dit voorbeeld is gewerkt met een luchtverdeelslang (air sock) voor de toevoer van de ventilatielucht. Andere meetresultaten laten, vergelijkbaar aan de simulatieresultaten, zien dat de bronpositie effect heeft op de effectiviteit van de ventilatie, de afvoer van de verontreiniging.



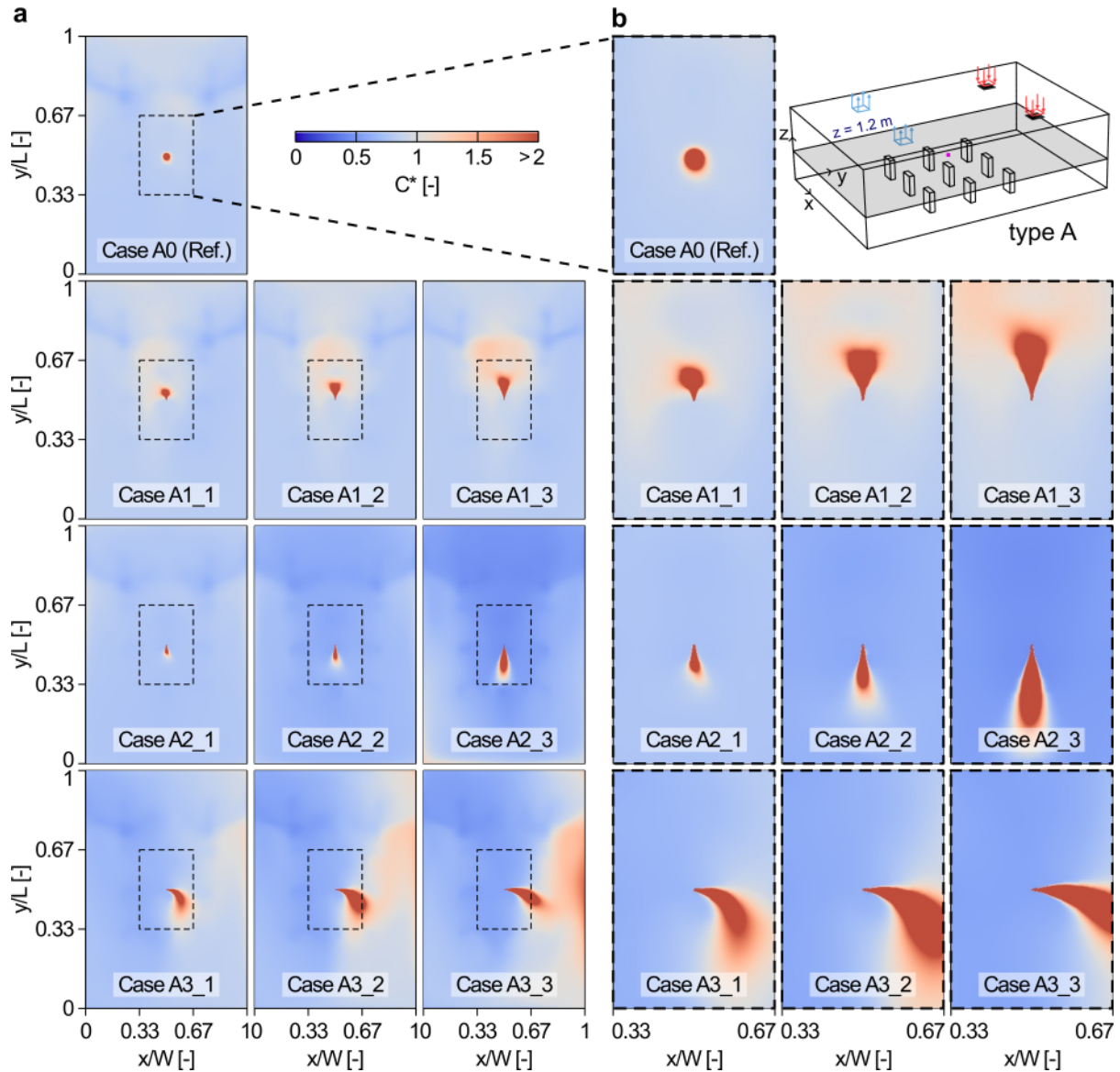
Figuur 11. Voorbeeld van de deeltjesconcentratie gemeten op ademhoogte (1,2 m) bij drie verschillende ventilatiedebieten. In deze configuratie is gebruik gemaakt van een luchtverdeelslang voor de toevoer en drie afvoerpunten.

Bij de numerieke simulaties is als bron een tracergas gebruikt. Dit wijkt af van een aerosol, zoals bij de metingen, omdat wordt verondersteld dat het tracergas een gelijke dichtheid heeft als de lucht. Het is mogelijk om op dezelfde manier de verdeling van aerosolen te simuleren en analyseren. Voor de kleinste afmetingen van aerosolen, orde grootte kleiner dan 2.5-5 μm , zullen de verschillen met een tracergas echter relatief beperkt blijven. Voor grotere deeltjes zal het effect van de zwaartekracht wel een belangrijkere rol spelen bij de verdeling van de verontreiniging en de effectiviteit van de ventilatie. De door een mens geproduceerde aerosolen bevinden zich normaal gesproken in een range van 0.5 μm tot ongeveer 10-20 μm , met een veel groter aantal deeltjes met een kleinere diameter. Figuur 9 laat zien dat de verblijftijd in de lucht zeer lang wordt wanneer de afmetingen van de deeltjes kleiner dan 5 μm zijn.

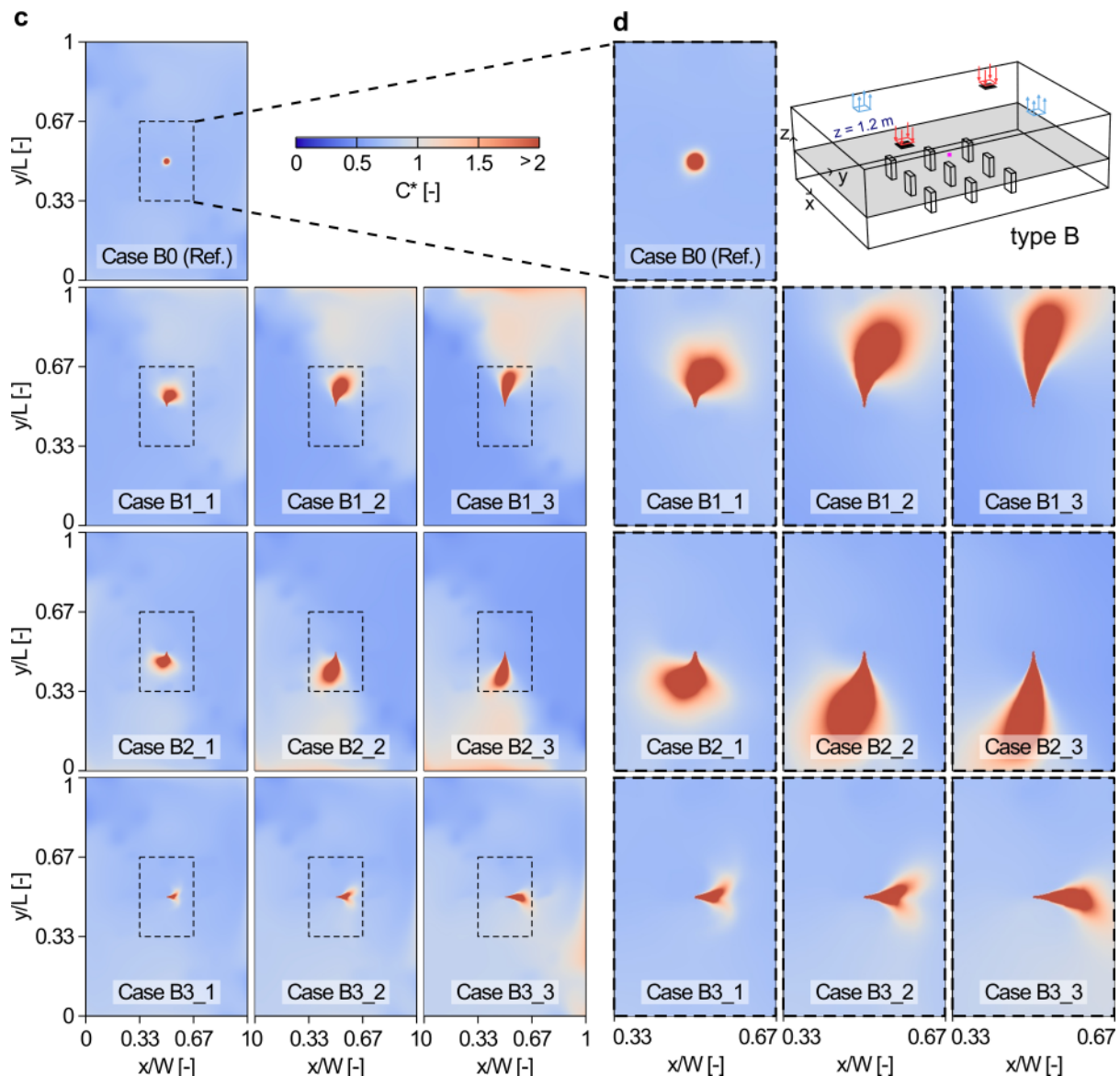


Figuur 12. Verblijftijd in de lucht als functie van de aerosol diameter en de hoogte waarop het aerosol wordt 'losgelaten'.

Omdat de bron, een pratend persoon, soms ook een impuls en daarmee ook een richting heeft zou dit in principe ook in de analyse van de effectiviteit van de ventilatie moeten worden meegenomen. In de metingen is hier bijvoorbeeld rekening mee gehouden, doordat de deeltjesbron een bepaalde richting en impuls heeft. In de numerieke simulaties zou dit ook geïmplementeerd kunnen worden. Hierdoor worden extra variabelen aan het probleem toegevoegd en het aantal varianten zal verder toenemen. Beter lijkt het om op basis van het ontwerp en het veronderstelde gebruik van de ruimte enkele locaties aan te wijzen waar mensen voornamelijk zullen verblijven in de ruimte. Deze locaties kunnen dan gebruikt worden om de effectiviteit van het ventilatieontwerp te onderzoeken. [Figuur 13](#) laat via resultaten van CFD-berekeningen zien wat het effect is van een impuls en richting van een bron op de concentratie verdeling in een ruimte bij de twee ventilatieconfiguraties die hierboven ook zijn gebruikt (Qin et al., 2025). In dit geval zijn aanvullend een aantal warmtebronnen in de ruimte verondersteld. Er wordt opnieuw een resultaat gegeven op ademhoogte waarbij de concentratieverdelingen links de hele ruimte laten zien en rechts een ingezoomd deel van de ruimte, nabij de bron.



Figuur 13. Verdeling van de genormaliseerde concentratie (C^*) contouren voor een deeltjesgrootte van $0.3 \mu\text{m}$ in een horizontaal vlak op $z = 1.2 \text{ m}$ voor (a b) Case A0, bron met geen impuls, en Case A1_1-3, Case A2_1-3, and Case A3_1-3, bron met verschillende impulsen (uitademsnelheid: 2.33, 4.65, 9.30 m/s) en richting, en (c,d) Case B0, bron met geen impuls, en Case B1_1-3, Case B2_1-3, and Case B3_1-3, bron met verschillende impulsen en richting. (b) en (d) zijn lokale uitvergrotingen van respectievelijk (a) en (c), met x/W and y/L in de range van 0.33 van 0.67.



Figuur 13. (vervolg)

In de analyse van de effectiviteit van de ventilatie wordt normaal gesproken uitgegaan van een stationaire situatie. Dit houdt in dat de luchtstroming in de tijd gelijk blijft. In de realiteit zal dit niet het geval zijn en zal er met enige regelmaat sprake zijn van bewegingen. Deze bewegingen zullen normaal gesproken voor extra menging zorgen. De variatie in situaties is in dit geval oneindig en bepaling van de effectiviteit van de ventilatie wordt in dat geval erg complex. Een pragmatische veronderstelling is dat beweging normaal gesproken kortdurend is en er niet voor zal zorgen dat het stromingsveld in de hele ruimte wordt verstoord. Herstel van het stromingsveld zal na het stoppen van de beweging binnen enkele minuten plaatsvinden. De contaminatieconcentratie zal zich via een exponentieel verloop herstellen (Loomans, 1998). Daarmee wordt verondersteld dat de variatie in de blootstelling, de extra of minder ontvangen dosis aan aerosolen met virusdeeltjes, ten gevolge van beweging beperkt zal

blijven. Voor bijvoorbeeld een fitnessruimte zal zo een aanname niet gelden en zal door de beweging van de mensen extra menging verondersteld mogen worden. Hier zal dan in de effectiviteit van de ventilatie (CRE) rekening mee moeten worden gehouden.

In het geval dat de positie van de bron onbekend is, moet de effectiviteit van de ventilatie worden beoordeeld voor verschillende bronposities in de ruimte. De contaminant removal effectiveness is een goede indicator daarvoor. Op basis van een dergelijke analyse kan dan onderzocht worden, voor de betreffende situatie, in hoeverre het positioneren van toevoerroosters aan een zijde van de ruimte leidt tot een effectievere ventilatie dan wanneer toe- en afvoerroosters worden gemengd. Het effect van spreekrichting kan in de analyse mee worden genomen. Bewegingen worden in principe verwaarloosd wanneer deze niet continu zijn. De stroming herstelt zich relatief snel.

Op basis van de uitgevoerde simulaties en metingen zijn enkele algemene conclusies te trekken voor de huiskamer in de langdurige zorg. (1) In een ruimte ontstaan concentratieverschillen wanneer een bron zich in de ruimte bevindt. (2) Een hoger ventilatievoud zorgt gemiddeld genomen voor een verlaging van de concentratie aan aerosolen, terwijl de concentratiegradiënten kleiner worden. Dit is de meest effectieve aanpak om de blootstelling te verlagen. (3) Het ontwerp van de toe- en afvoer in een ruimte hebben invloed op de effectiviteit van de ventilatie. Gemiddeld genomen zijn de verschillen beperkt, maar afhankelijk van de bronpositie kan, op basis van de simulatieresultaten, de gemiddelde concentratie in de ruimte, op ademhoogte, in orde grootte 10-25% verschillen. Lokaal kunnen deze verschillen veel groter zijn. (4) Vanuit de metingen wordt geconcludeerd dat een luchtverdeelslang tot een meer homogene verdeling van aerosolen in de ademzone leidt in vergelijking tot een situatie met toevoerroosters.

Luchtreinigers

In het kader van het verlagen van het risico op infectie is het niet per se nodig om de benodigde lucht enkel via ventilatie, i.e. lucht van buiten, te verzorgen. In specifieke situaties kan het gaan om een grote hoeveelheid schone lucht die extra gewenst is, waarin het ventilatiesysteem, eventueel aangevuld met (centrale) recirculatie met gereinigde lucht, niet kan voorzien. Dan kan de inzet van mobiele luchtreinigers overwogen worden. Deze luchtreinigers, afhankelijk van het type en de uitvoering, kunnen de lucht reinigen van verschillende typen verontreinigingen. In het geval van pathogenen, zijn we met name geïnteresseerd in de afname van de concentratie bio-aerosolen van de gereinigde lucht.

De prestatie van een luchtreiniger wordt normaal gesproken uitgedrukt in de Clean Air Delivery Rate (CADR [m^3/h]). Dit is de hoeveelheid [m^3/h] gereinigde lucht die een luchtreiniger kan leveren. Een luchtreiniger vervangt niet de ventilatie omdat een luchtreiniger niet alle verontreinigingen uit de lucht kan verwijderen. Ventilatie met buitenlucht blijft in alle gevallen een vereiste. Daarnaast mogen luchtreinigers geen ongewenste concentraties aan secundaire verontreinigingen produceren zoals Ozon

en ultrafijne deeltjes. Naast deze luchtkwaliteit gerelateerde aspecten zijn ook de geluidproductie en mogelijke tochtproblemen belangrijke criteria voor een effectieve inzet van een mobiele luchtreiniger.

De CADR van een luchtreiniger moet met metingen worden bepaald. Hiervoor zijn standaarden beschikbaar (ANSI/AHAM en DIN; (ANSI/AHAM, 2020; DIN, 2022)). Deze verschillen enigszins in werkwijze maar leveren binnen een bepaalde marge vergelijkbare resultaten op (Loomans et al., 2025). De CADR van een luchtreiniger die in de ruimte geplaatst is mag bij het beschikbare ventilatiedebiet worden opgeteld. Merk op dat onder andere de positie van de luchtreiniger, de werp en het ventilatiesysteem in de ruimte de CADR in de praktijk zullen beïnvloeden. In principe zou de CADR per situatie moeten worden bepaald. Belangrijke aandachtspunten zijn de positie van de toevoer naar de luchtreiniger ten opzichte van de toevoer van ventilatie in de ruimte en de plek waar de lucht van de luchtreiniger in de ruimte wordt gebracht ten opzichte van de afvoer in de ruimte. Er moet worden voorkomen dat er kortsluiting kan optreden. Deze aanpak geldt voor luchtreinigers die aerosolen afvangen.

Sommige technieken kunnen het virus inactiveren zonder dat het geïnactiveerde virusdeeltje uit de lucht wordt verwijderd. Het meest bekende voorbeeld hiervan is UV-C (Franchimon, 2020). De gebruikte golflengte bepaalt het veilige ontwerp en gebruik ervan. UV-C met 254 nm golflengte is het meest bekend maar stelt eisen aan de bescherming tegen ogen en huid. De zogenaamde verre UV-C (222 nm) heeft nog maar een zeer beperkt veiligheidsrisico. Deze technieken worden in luchtbehandelingssystemen ingezet omdat deze in vergelijking tot filtersystemen veel minder weerstand hebben. Echter, ook in een ruimte kan deze worden toegepast, normaal gesproken middels het plaatsen van armaturen die een gebied buiten de leefzone (i.e. hoger dan ~2.1 meter) bestrijkt. Voor een goede effectiviteit is dan een goede menging van de lucht in de ruimte gewenst zodat het virus aan de UV-C straling kan worden blootgesteld. Een combinatie met een verdringingsventilatie oplossing zou in zo een geval dus duidelijk minder effectief zijn. De stralingsdosis die een virus moet ontvangen om geïnactiveerd te worden, uitgedrukt in een percentage van het aantal kiemen dat geïnactiveerd wordt, is afhankelijk van het virus. Deze informatie is voor virussen beschikbaar.

Omdat een verhoogd ventilatievoud in principe enkel gewenst is ten tijde van een pandemie, levert een mobiele luchtreiniger een interessant alternatief die voorkomt dat de ventilatievoorziening hierop moet worden aangepast, ontworpen. De Clean Air Delivery Rate (CADR) geeft de bijdrage van een luchtreiniger aan bij het reinigen van de lucht. Bij de plaatsing van de reiniger moet kortsluiting met de ventilatielucht voorkomen worden. Daarnaast moet bij de keuze van een luchtreiniger aandacht worden besteed aan zaken als geluidproductie, tocht en onderhoud. De aanwezige ventilatie moet tenminste voldoen aan de wettelijke eisen.

Samenvattend

In Deel A zijn verschillende onderdelen aangestipt die van belang zijn bij het ontwerpen van ventilatie in relatie tot blootstelling aan pathogenen, voor een ruimte in het algemeen. Belangrijk aandachtspunt is dat enkel uitgaan van een ventilatievoud niet voldoende is. De hoeveel schone lucht die benodigd is is afhankelijk van de infectiviteit van een virus. Vanuit SARS-CoV-2 is veel informatie en ervaring opgedaan, en vooralsnog kan dat virus (voorlopig) als referentie worden genomen. Er zijn verschillende publicaties die uitspraken doen over de hoeveelheid schone lucht die in een pandemische situatie nodig is. In alle gevallen zijn hiervoor aannames gedaan. Voor de Nederlands situatie kunnen met modellen van bijvoorbeeld het RIVM aangepaste ventilatiedebieten worden afgeleid (Bartels et al. 2021).

Om te beoordelen of een bepaalde ventilatieoplossing voldoet in relatie tot de vereisten in geval van een pandemische situatie zal moeten worden getoetst of dit het geval is. Toetsing kan via metingen en via simulaties. Voor een nog niet bestaande situatie zal in geval van metingen een opstelling moeten worden gebouwd om onderzoek te kunnen doen. Aanvullend, of als alternatief, kan gebruik worden gemaakt van de Computational Fluid Dynamics (CFD) techniek om het ventilatieontwerp te simuleren. In dat geval wordt de luchtstroming in de ruimte zoals gegeneerd door het ventilatieconcept berekend en kan vervolgens de verspreiding van aerosolen bij verschillende bronposities worden geanalyseerd. Binnen P3Venti zijn beide technieken ingezet, waarbij de metingen ook bedoeld zijn geweest voor het ontwikkelen van een geschikte aanpak voor dit type simulatieprobleem, en ook voor validatiedoeleinden. Hoewel metingen nog steeds als de gouden standaard worden gezien, zit de beperking in het aantal varianten dat langs meettechnische weg onderzocht kan worden, alsmede in de beperkte hoeveel data die kan worden verkregen (ruimtelijke resolutie). Toepassing van CFD wordt daarom noodzakelijk geacht om de blootstelling aan pathogenen in een specifieke ruimte, maar ook meer algemeen, te onderzoeken.

Het uitvoeren van een CFD-berekening is specialistisch werk. Er wordt niet verwacht dat iedere ontwerper bekend is met deze techniek en toegang heeft tot software om dergelijke berekeningen uit te voeren. Er zijn wel gespecialiseerde bedrijven die dit soort berekeningen uitvoeren. Er wordt verwacht dat de toegankelijkheid tot de CFD-techniek naar de toekomst toe enkel zal toenemen, zeker ook gezien het gebrek aan alternatieven voor de problematiek van blootstelling aan pathogenen. In Deel B zal daarom verder worden ingegaan op de inzet van CFD voor het beoordelen van een ventilatieconcept in de context van een pandemische situatie.

DEEL B

Computational Fluid Dynamics (CFD) is een krachtig hulpmiddel voor het analyseren en optimaliseren van ventilatiestromingen in ruimtes. Het stelt ontwerpers in staat om luchtstromen, temperatuurverdeling en massatransport (inclusief verontreinigingen in gas- of deeltjesvorm) te simuleren, wat essentieel is voor het creëren van comfortabele, energie-efficiënte en gezonde binnenomgevingen. Alhoewel CFD een krachtig hulpmiddel is dient het zorgvuldig gebruikt te worden om nauwkeurige en betrouwbare resultaten te verkrijgen. In de onderstaande richtlijnen wordt een overzicht gegeven van een reeks algemene aspecten die essentieel zijn voor het verkrijgen van betrouwbare en reproduceerbare resultaten uit CFD-simulaties. Het doel van dit deel van het handelingsperspectief is niet dat men zelf berekeningen kan uitvoeren, maar dat wel een oordeel gegeven kan worden over uitgevoerde berekeningen en dat men de juiste informatie kan geven en vragen stellen bij het voorbereiden en uitvoeren van de berekeningen.

Tot slot worden, specifiek voor het gebruik van CFD in de context van blootstelling aan pathogenen, enkele adviezen gegeven en wordt kort ingegaan op de mogelijkheid om snellere simulatiemethodes (fast-CFD) in te zetten.

Doel en reikwijdte van de simulatie

Elke CFD-analyse begint met een duidelijke definitie van doel en reikwijdte. CFD kan worden gebruikt voor allerlei doeleinden, zoals optimaliseren van thermisch comfort, voorspelling van concentraties (gas/deeltjes) ten gevolge van een verontreinigingsbron in de ruimte, verspreiding van warmte ten gevolge van een bepaald verwarmingssysteem, en voorspellingen van lichtsnelheden en debieten.

Hiernaast dient te worden bepaald welke ruimte(s) er moeten worden meegenomen; volstaat één ruimte, of dienen aangelegene ruimtes ook te worden gemodelleerd? Dit zal afhankelijk zijn van de mate waarin er luchtstromingen optreden van de ene ruimte naar de andere, en de mogelijkheid om deze luchtstromingen mee te nemen door het opleggen van een randvoorwaarde.

Het al dan niet rekenen met stationaire of tijdsafhankelijke omstandigheden is eveneens een keuze die moet worden gemaakt. Over het algemeen worden vaak stationaire simulaties uitgevoerd (steady state), tenzij er tijdsafhankelijke randvoorwaarden zijn die ook als zodanig dienen te worden meegenomen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de ademhaling, lopende mensen, of andere veranderende omstandigheden gedurende een uur of dag. Bovendien vereisen bepaalde methoden voor de voorspelling van de stroming tijdsafhankelijke simulaties, zoals bijvoorbeeld in het geval van large-eddy simulaties (LES).

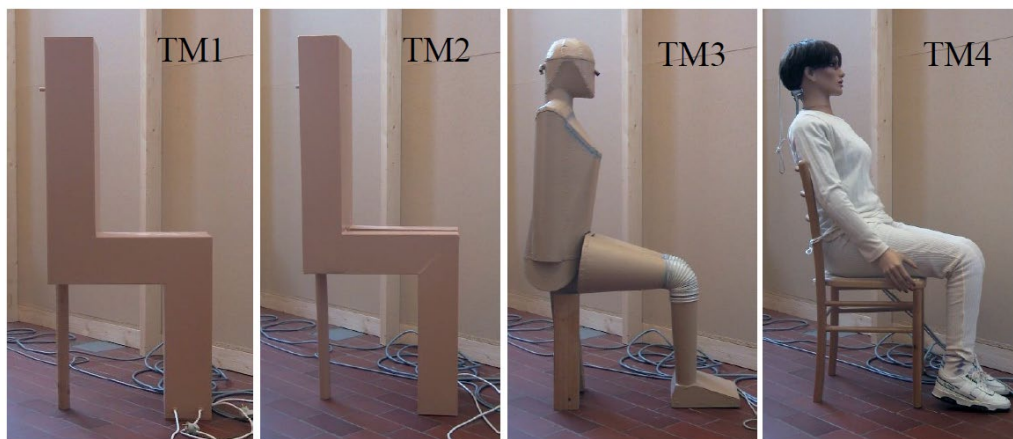
Bepaal het doel van de simulaties en de reikwijdte. Deze keuzes bepalen de modelleringstechnieken, randvoorwaarden, de noodzaak voor een tijdsafhankelijke simulatie, etc.

Domein

De simulatie wordt uitgevoerd in een rekendomein, ook wel kortweg domein genoemd. De nauwkeurigheid van een CFD-analyse begint met een realistische representatie van de ruimte in het gebouw en zijn directe omgeving. Het is niet realistisch om elk klein detail mee te nemen en een afweging dient te worden gemaakt welke objecten worden geïnccludeerd, en in welke mate deze exact worden meegenomen of versimpeld qua geometrie. Over het algemeen worden de volgende richtlijnen gebruikt (Brohus & Nielsen, 1996; Q. Chen & Srebric, 2001; Li & Nielsen, 2011; P. V. Nielsen, 2009, 2004; T. Zhang et al., 2009).

- Vermijd onnodige details zoals kleine objecten (bepaalde meubelstukken of andere ornamenten, losstaand of onderdeel van de gevel/vloer/plafond) die geen significante invloed hebben op de stroming, om de complexiteit en dus de rekentijd te beperken. Een kleine plafondlamp zal relatief weinig invloed hebben, terwijl een grote tafel meer effect zal hebben op de luchtstroming en distributie van warmte en gassen/deeltjes in de ruimte.
- Inlaat- en uitlaatopeningen: Modelleer roosters, ramen, ventilatie-units nauwkeurig; een onjuiste representatie leidt tot significante fouten. Vaak is dit een onderschat punt en wordt de inlaat versimpeld tot een bepaald oppervlak met een bepaald toevoerdebiet. Dit is niet per definitie fout, maar men moet zich er wel degelijk van bewust zijn dat een onjuiste representatie een sterke invloed kan hebben op de verkregen resultaten. De geometrie van de uitlaatopening kan vaak wel versimpeld worden meegenomen, de invloed hiervan op de luchtstroming is zeer beperkt. De locatie is uiteraard wel van belang aangezien deze mede de CRE (contaminant removal effectiveness) bepaalt.
- Personen/meubilair: afhankelijk van het doel van de studie dienen personen in meer of mindere mate nauwkeurig te worden meegenomen (zie Figuur 11). Als de personen enkel dienen als obstakel voor de stroming en warmtebron in de ruimte dan kan worden volstaan met sterk versimpelde geometrieën. Als men bijvoorbeeld wil weten hoe de stroming- en warmte-uitwisseling plaatsvindt tussen twee personen in een ruimte dan dient de geometrie in meer detail te worden meegenomen. Dit laatste kan bijvoorbeeld door gebruik te maken van 3D modellen die beschikbaar zijn op internet of door scans uit te voeren van personen en deze als input voor het CFD model te gebruiken.

Vereenvoudigen zijn inherent aan CFD-simulaties. Gebaseerd op het doel en de benodigde nauwkeurigheid (lokaal, ruimteniveau, etc.) kunnen personen, meubilair en andere objecten in de ruimte worden vereenvoudigd om de rekentijd te beperken. Bij het modelleren van de toevoer moet goed afgewogen worden tot hoever de vereenvoudiging kan worden doorgevoerd. De karakteristiek van de toevoer kan de luchtstroming in een ruimte in belangrijke mate bepalen.



Figuur 14. Studie van (Topp et al., 2003), waarin metingen en CFD-simulaties zijn uitgevoerd voor een manikin met verschillende mate van detail.

Rekenraster

Om de stromingsvergelijkingen op te lossen is een rekenraster ('grid') vereist. Een rekenraster is een opdeling van het rekendomein in kleinere volumes, ook wel rekencellen of cellen genoemd, waarin de vergelijkingen worden opgelost. Dit proces wordt aangeduid met discretisatie. Hoe meer cellen worden gebruikt voor een bepaald domein hoe potentieel nauwkeuriger de resultaten kunnen zijn. Afhankelijk van de wijze van turbulentiemodellering dient het raster een bepaalde resolutie te hebben. Over het algemeen zijn de rasters niet-uniform; i.e. de afmetingen van de cellen variëren door het domein, waarbij kleinere cellen dienen te worden geplaatst in regionen met verwachte grote gradiënten (snelheid, temperatuur, concentratie) en in regionen die het meest relevant zijn (de "area of interest").

Een goed rekenraster is essentieel voor betrouwbare CFD-resultaten. Het maken van een goed raster kost tijd waardoor dit onderdeel het meest arbeidsintensief is voor de gebruiker, maar dient met zorg te gebeuren. Voor elke studie dient een rastergevoeligheidsanalyse te worden uitgevoerd om te bepalen in welke mate de resolutie van het rekenraster van invloed is op de verkregen resultaten. Een rastergevoeligheidsanalyse wordt in principe uitgevoerd met minstens 3 verschillende rekenrasters, waarbij het middelste rekenraster met een factor 1.4 ($\sqrt{2}$) in alle drie de richtingen wordt verfijnd en grover gemaakt. Dezelfde simulatie (alle instellingen zijn gelijk) wordt uitgevoerd op alle drie de rekenrasters waarna de resultaten worden vergeleken. Indien de resultaten niet of nauwelijks veranderen als het raster wordt verfijnd is er sprake van een (nagenoeg) rasteronafhankelijke

oplossing. Discretisatiefouten worden op deze manier beperkt, wat een belangrijk onderdeel is van het verificatieproces ("Verificatie en Validatie"). Kwantificatie is mogelijk door bijvoorbeeld de grid-convergence index (GCI) van (Roache, 1997) te gebruiken.

Bij de wanden gelden speciale eisen voor het rekenraster, afhankelijk van het soort wandbehandeling dat wordt gebruikt. Maatgevend is hier de zogenaamde dimensieloze wandafstand, y^+ of y^* . De dimensieloze wandafstand dient groter dan 30 te zijn voor het gebruik van wandfuncties, en kleiner dan 5 (en bij voorkeur ongeveer 1) voor het gebruik van "low-Reynolds number modeling". Meer informatie over wandbehandeling is te vinden in de sectie "Wandbehandeling".

Voor het rekenraster is het aanbevolen om zoveel mogelijk hexaëder cellen te gebruiken om convergentieproblemen te beperken. Tetraëder cellen dienen waar mogelijk te worden voorkomen gezien de problemen die op kunnen treden bij de daadwerkelijke simulatie van het stromingsprobleem. In alle gevallen dient de verhouding tussen de breedte van twee naast elkaar gelegen cellen klein te worden gehouden, bij voorkeur < 1.2 . Recent is het gebruik van rasters bestaande uit polyhedrale cellen in opkomst, welke meer flexibiliteit biedt voor complexe geometrieën en tot minder problemen en numerieke diffusie leidt dan tetraëder cellen (H. Chen et al., 2022).

De kwaliteit van het rekenraster is van essentieel belang voor de algehele kwaliteit en nauwkeurigheid van een CFD-simulatie. De richtlijnen dienen gevolgd te worden en elke studie dient een rastersensitiviteitsstudie te bevatten om discretisatiefouten (fouten door een te grof rekenraster) te minimaliseren. Specifieke aandacht voor het raster nabij de wand is daarbij gewenst. De daarvoor geldende eisen zijn afhankelijk van de gekozen methode om de luchtstroming nabij de wand te modelleren.

Op te lossen variabelen

Alvorens een CFD-simulatie te starten dient men te bepalen welke variabelen er opgelost dienen te worden. De snelheidscomponenten in drie richtingen en de turbulentieniveaus zijn standaard voor luchtstromingen in gebouwen, en normaliter wordt ook de temperatuur meegenomen om een realistische simulatie uit te kunnen voeren. Hiernaast is er de keuze of men de verspreiding van gassen (CO_2) wil meenemen of bijvoorbeeld expliciet deeltjes wil modeleren (bijvoorbeeld aerosolen).

Randvoorwaarden

Correcte randvoorwaarden zijn cruciaal voor een realistische voorspelling van luchtstromingen en warmte- en massatransport met CFD. Onrealistische of incorrecte randwaarden leiden tot foutieve stromingspatronen. Enkele aanbevelingen:

- **Inlaatcondities:** Gebruik snelheidsprofielen en temperatuurwaarden gebaseerd op metingen of vanuit de literatuur. Als het gaat om een simulatie van natuurlijke ventilatie waarbij de

stroming rondom het gebouw ook wordt meegenomen, dan dienen realistische windprofielen met hoogte-afhankelijke snelheden (logaritmisch of power-law profiel) te worden opgelegd aan de inlaat van het domein.

- *Uitlaatcondities*: Gebruik een outflow of pressure outlet en zorg dat deze ver genoeg van verstoringen ligt.
- *Wandcondities*: Specificeer of de wand adiabatisch (geen warmteuitwisseling) is of warmte afgeeft/opneemt. Dit laatste kan door het opleggen van een warmtestroom (W of W/m^2), of een oppervlaktetemperatuur. Hierbij dient vervolgens de afweging te worden gemaakt of stralingsuitwisseling moet worden meegenomen of niet (wat is de verwachte warmtestroom door straling ten opzichte van convectieve warmtestroom). Een reeks stralingsmodellen is beschikbaar voor dit doeleinde (bijv. DO, P1). Indien stralingsuitwisseling niet in de berekeningen wordt meegenomen dan dienen de warmtestroom randvoorwaarden hierop te worden aangepast.
- *Interne warmtebronnen*: Interne warmtebronnen kunnen bestaan uit personen die in de ruimte aanwezig zijn, maar ook apparatuur en verlichting. De juiste warmteafgifte moet worden opgelegd, ofwel door een warmtestroom (per volume of oppervlakte), ofwel door een temperatuur op te leggen aan deze bron. Ook hier geldt dat er rekening mee moet worden gehouden of stralingsuitwisseling wel of niet in de berekeningen wordt meegenomen. De emissiviteit van een oppervlak is een parameter die daar ook bij van belang is.

De randvoorwaarden dienen zo gekozen te worden dat ze het best overeenkomen met de werkelijkheid. Voor de simulatie van de luchtstroming in een ruimte zijn met name het correct modelleren van de inlaatcondities en de condities van aanwezige warmtebronnen essentieel en bepalen voor een groot deel het resultaat van een simulatie.

Turbulentiemodellen

Bij het simuleren van turbulente stromingen in CFD zijn er drie gangbare benaderingen, elk met hun eigen toepassingsgebied en nauwkeurigheid (zie Figuur 12):

Directe numerieke simulatie (DNS)

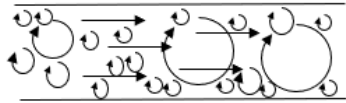
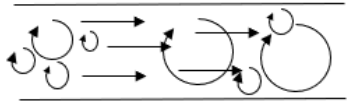
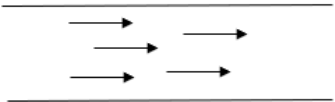
DNS biedt de meest gedetailleerde benadering doordat zowel grote als kleine turbulente structuren (wervels of 'eddies') expliciet worden berekend. Dit vereist echter extreem fijne rekenrasters en daarmee een zeer hoge rekencapaciteit. Om die reden wordt DNS voornamelijk toegepast in fundamenteel onderzoek en productontwikkeling, en zelden in praktische simulaties van luchtstromingen in of rond gebouwen.

Large eddy simulation (LES)

LES is een compromis tussen nauwkeurigheid en rekentijd. Hierbij worden de grotere turbulente structuren opgelost, terwijl de kleinere (sub-grid) wervels worden gemodelleerd met behulp van een turbulentiemodel (i.e. een subgrid-schaalmodel). De grootte van de rekencellen bepaalt welke schaal van wervels wordt opgelost. LES levert tijdsafhankelijke stromingsvelden op en wordt voornamelijk toegepast voor specifieke cases in de academische wereld als het gaat over luchtstromingen in gebouwen. De benodigde rekencapaciteit is lager dan die van DNS, maar nog altijd aanzienlijk (50-400x) (van Hooff et al., 2017; Z. Zhang et al., 2007) hoger dan voor RANS.

Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)

RANS-modellen benaderen turbulentie door middel van tijdgemiddelde vergelijkingen. Zowel grote als kleine wervels worden niet afzonderlijk gesimuleerd, maar hun gemiddelde effect op de stroming wordt gemodelleerd. Dit resulteert in een tijdonafhankelijke oplossing, wat RANS geschikt maakt voor veel praktische toepassingen waar rekentijd en middelen beperkter zijn.

DNS: <u>d</u>irect <u>n</u>umerical <u>s</u>imulation - Volledig oplossen van de exacte Navier-Stokes-vgl. - Alle wervels worden “opgelost”, geen “modellering” - Exact - Zeer tijds- en rekenintensief. Enkel voor eenvoudige geometrieën en lage Reynoldstallen.	
LES: <u>l</u>arge <u>e</u>ddy <u>s</u>imulation - Oplossen van de gefilterde Navier-Stokes-vgl. - Enkel de grote wervels worden “opgelost”, de kleine wervels worden “gemodelleerd”. - Niet exact, maar minder tijds- en rekenintensief.	
RANS: <u>R</u>eynolds-<u>a</u>veraged <u>N</u>avier-<u>S</u>tokes - Oplossen van de “gemiddelde” Navier-Stokes-vgl. - Enkel de gemiddelde stroming wordt “opgelost”, alle wervels worden “gemodelleerd”. - Niet exact, minder nauwkeurig, maar algemeen toepasbaar. In de RANS-benadering wordt het “effect” van de turbulentie op de gemiddelde stroming gemodelleerd.	

Figuur 15. Overzicht van DNS, LES en RANS en de verschillen tussen deze 3 methoden.

Er bestaan tientallen zo niet honderden verschillende turbulentiemodellen voor RANS. Een hoofdonderscheid kan worden gemaakt tussen eerste-orde sluitingsmodellen en tweede-orde sluitingsmodellen.

- De eerste-orde sluitingsmodellen gebruiken de Boussinesq hypothese om de turbulente Reynoldsspanningen te berekenen aan de hand van een eddy viscositeit. Hiervoor worden twee transportvergelijkingen (turbulente kinetische energie (k), en vaak ofwel turbulente dissipatiesnelheid (ϵ) of specifieke dissipatiesnelheid (ω)) opgelost om de vergelijkingen sluitend te maken. Aangezien de eddy viscositeit een scalair is heeft deze modeleringstechniek zijn tekortkomingen in stromingen waarbij de Reynoldsspanningen niet in alle richtingen gelijk zijn. Desalniettemin zijn de eerste-orde sluitingsmodellen de meest gebruikte turbulentiemodellen, zowel in de praktijk als in de wetenschappelijke wereld. Voorbeelden van deze turbulentiemodellen zijn de legio k - ϵ modellen (e.g. standaard, RNG, realizable) en k - ω modellen (standard, SST, etc.) die zijn ontwikkeld sinds de jaren 70.
- Tweede-orde sluitingsmodellen bevatten de zogenaamde Reynolds Stress Modellen. Deze modellen gebruiken niet de Boussinesq hypothese maar lossen een extra transportvergelijking op voor elk van de zes individuele Reynoldsspanningen, en een transportvergelijking voor de turbulente dissipatiesnelheid. Hierdoor vragen tweede-orde sluitingsmodellen meer reken capaciteit/-tijd. Tweede-orde sluitingsmodellen zouden in theorie superieur moeten zijn ten opzichte van eerste-orde sluitingsmodellen. De praktijk en de literatuur laten echter zien dat de verschillen in prestaties klein of zelfs afwezig zijn. De meerwaarde en het gebruik van tweede-orde sluitingsmodellen is daardoor beperkt.

Er is geen universeel turbulentiemodel in RANS dat kan worden gebruikt voor alle toepassingen en cases. Per geval zal moeten worden bekeken wat het best presterende turbulentiemodel is. Gebaseerd op de literatuur kan wel worden gesteld dat het RNG k - ϵ model en het SST k - ω model voor ventilatiestromingen vaak tot de beste resultaten leidt (vergeleken met metingen).

DNS is vooralsnog niet haalbaar in simulaties van ventilatie en luchtstromingen in ruimtes in gebouwen en voertuigen. LES is wel mogelijk, maar de rekentijd is dermate lang dat het zowel in de praktijk als in de wetenschap slechts zelden wordt gebruikt. RANS met een eerste-orde turbulentiemodel (sluitingsmodel) kan goede resultaten geven, maar validatie is gewenst (vergelijking van CFD-resultaten met metingen). Er is géén turbulentiemodel dat universeel het beste presteert, RNG k - ϵ en SST k - ω zijn veelvuldig gebruikte turbulentiemodellen voor de voorspelling van luchtstromingen in een ruimte.

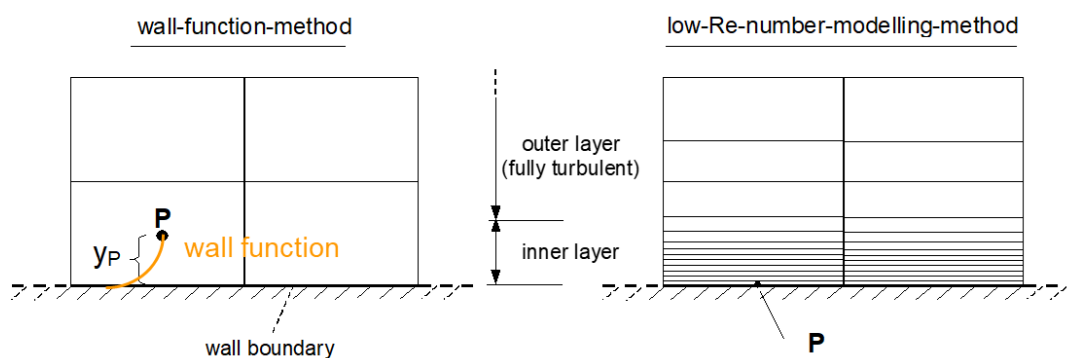
Wandbehandeling

Omdat, in geval van een turbulente stroming, nabij de wand er per definitie een overgang plaats vindt van een turbulente naar een laminaire stroming, gelden turbulentiemodellen hier niet. Hiervoor worden benaderingen gebruikt die de stromingsovergang representeren. Bij CFD-simulaties van turbulente stromingen dicht bij wanden zijn er twee gangbare benaderingen: het gebruik van wandfuncties of de toepassing van zogenaamde "low-Reynolds number (low-Re) modeling" (zie Figuur 13).

Wandfuncties zijn semi-empirisch afgeleide relaties die het gedrag van de grenslaag (boundary layer) nabij een wand modelleren zonder dat deze fijnmazig hoeft te worden opgelost. Hierdoor kunnen grovere rekencellen worden toegepast, zolang het middelpunt van de eerste cel zich in de zogenaamde log-law regio van de grenslaag bevindt (typisch $y^+ > 30$). Deze aanpak bespaart aanzienlijk op rekenkosten en wordt vaak toegepast in de simulatie van windstromingen rondom gebouwen, waar het volledig oplossen van de visceuze sublaag niet noodzakelijk is.

Low-Reynolds modeling daarentegen vereist een zeer fijn rekenraster aan de wand ($y^+ \approx 1$) om de volledige visceuze sublaag numeriek op te lossen. Hierdoor is het mogelijk om nauwkeuriger de stroming (inclusief separatiepunten), warmteoverdracht en deeltjesdepositie nabij wanden te simuleren. Deze aanpak is echter veel rekenintensiever en vereist zorgvuldig gevalideerde modellen, zoals low-Re versies van de k - ϵ of k - ω modellen.

De keuze tussen beide methoden hangt af van de gewenste nauwkeurigheid, beschikbare reken capaciteit en het belang van wandinteracties. Voor nagenoeg isotherme situaties zonder massatransport volstaan wandfuncties, maar voor het modelleren van contaminantdepositie of convectieve warmteoverdracht vanaf een oppervlak is low-Re modeling sterk aan te bevelen, of zelfs vereist (Li & Nielsen, 2011; Sørensen & Nielsen, 2003; van Hooff et al., 2018)



Figuur 16. Schematische weergave van de hoofdmogelijkheden qua wandbehandeling: Wandfuncties (links); low-Reynolds number modeling (rechts).

Een correcte wandbehandeling is noodzakelijk om de luchtstroming en warmte- en massatransport in de grenslaag aan de wand goed te kunnen voorspellen. Low-Reynolds number modeling is nodig voor een meer accurate voorspelling en normaal gesproken nodig in geval van luchtstromingen in een ruimte. Hier moet rekening mee worden gehouden bij het creëren van het rekenraster nabij wanden en obstructies.

Discretisatieschema's

Discretisatieschema's vormen de numerieke basis waarmee de differentiaalvergelijkingen in CFD worden opgelost. Ze bepalen hoe grootheden zoals snelheid, temperatuur of concentratie worden berekend tussen rekencellen. De keuze van het schema beïnvloedt sterk de nauwkeurigheid, stabiliteit en convergentie van de simulatie (Li & Nielsen, 2011; Sørensen & Nielsen, 2003; van Hooff et al., 2018; van Hooff & Blocken, 2017).

De meest gebruikte schema's zijn:

- *Upwind First Order*: dit schema gebruikt waarden van stroomopwaartse rekencellen. Het is robuust en stabiel, maar introduceert veel numerieke diffusie, waardoor scherpe gradiënten vervagen. Het wordt vooral gebruikt in het begin van een simulatie, waarna men overstapt op hogere orde discretisatieschema's.
- *Upwind Second Order*: verhoogt de nauwkeurigheid door gebruik te maken van een gewogen gemiddelde van twee rekencellen stroomopwaarts. Het biedt een betere balans tussen stabiliteit en nauwkeurigheid en beperkt de numerieke diffusie. Het wordt vaak aanbevolen voor stationaire simulaties.
- *QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)*: gebruikt drie cellen (twee stroomopwaarts, een stroomafwaarts) voor een hogere nauwkeurigheid. Het is effectief bij laminaire of zwak turbulente stromingen, maar kan oscillaties geven bij sterke gradiënten.
- *Central Differencing*: zeer accuraat, vooral in LES-toepassingen, maar gevoelig voor instabiliteit bij hoge Péclet-nummers.

Voor druk-snelheidskoppeling worden schema's zoals SIMPLE, SIMPLEC en PISO gebruikt. Bij transiënte simulaties is ook de tijddiscretisatie van belang: impliciete schema's zijn stabiel, terwijl expliciete schema's eenvoudiger zijn maar kleinere tijdstappen vereisen.

In de praktijk wordt aanbevolen altijd een tweede-orde schema te gebruiken voor eindresultaten, gecombineerd met een gedegen rekenraster- en, in geval van een tijdsafhankelijk simulatie, tijdstapanalyse voor validiteit en stabiliteit van de oplossing.

Discretisatieschema's zijn er in vele soorten. Het wordt sterk afgeraden om te rekenen met eerste-orde schema's, aangezien deze numerieke (valse) diffusie introduceren in de ruimte, waardoor gradiënten van snelheid, temperatuur en concentraties worden uitgesmeerd. Ze kunnen wel worden gebruikt in het oplosproces om een stromingsveld te genereren waardoor hogere orde discretisatieschema's beter tot een stabiele oplossing kunnen komen.

Convergentie

Convergentiecriteria zijn essentieel om te bepalen wanneer een CFD-simulatie als 'klaar' of stabiel kan worden beschouwd (Li & Nielsen, 2011; Sørensen & Nielsen, 2003; van Hooff et al., 2018). Ze geven

aan of de oplossing numeriek voldoende is benaderd en of verdere iteraties nog in significante veranderingen resulteren.

Het meest gebruikte criterium is het monitoren van de residuen van de opgeloste vergelijkingen (zoals massa, momentum, energie, en scalaire variabelen). Een residu is het (genormaliseerde) verschil tussen de linker- en rechterzijde van een vergelijking na discretisatie. Bij convergentie dalen deze residuen tot onder een vooraf bepaalde grens, bijvoorbeeld 10^{-4} of 10^{-6} . Hoe lager het residu, hoe nauwkeuriger de oplossing, hoewel lage residuen niet per definitie fysische juistheid garanderen (in vergelijking met metingen).

Naast residuen moeten ook fysieke grootheden worden geëvalueerd: temperatuur, snelheidsvelden, drukverdeling of deeltjesconcentraties moeten stabiel zijn in de tijd of consistent tussen iteraties. In transiënte simulaties is het belangrijk dat deze grootheden geen onverklaarbare fluctuaties vertonen.

Bij sterk gekoppelde processen (zoals ventilatie met warmtetransport of deeltjesmodellen) kunnen sommige grootheden trager convergeren. In die gevallen is het aan te raden de convergentie van sleutelparameters, zoals luchtdebieten, stralingsfluxen of aerosolconcentraties, actief te monitoren.

De meest betrouwbare manier om de convergentie te beoordelen is het combineren van numerieke convergentiecriteria met fysische controle op de belangrijkste parameters.

Het niet volledig laten convergeren van een simulatie levert een oplossing die niet als eindoplossing kan worden beschouwd; i.e. verdere iteraties zullen leiden tot andere resultaten. Convergentiecriteria moeten goed worden ingesteld en bij voorkeur beoordeeld door zowel te kijken naar de residuen als het verloop van de waardes van enkele fysieke grootheden (e.g. snelheid, concentraties) op enkele representatieve punten in de ruimte.

Modellering van deeltjes

CFD kan de verspreiding van deeltjes zoals virussen, fijnstof of allergenen modelleren. Om dit te doen zijn twee hoofdmethoden beschikbaar, de Lagrangiaanse methode en de Euleriaanse methode.

Lagrangiaanse methode: hierbij worden individuele deeltjes gevolgd door hun traject in de stroming te berekenen. Deze aanpak is geschikt voor grotere deeltjes ($>1-2.5\ \mu\text{m}$) waarbij de massa-inertie relevant is. Deeltjes worden beïnvloed door krachten zoals zwaartekracht, luchtweerstand en eventueel Brownse beweging. Het voordeel is dat je het gedrag van elke deeltje apart kunt analyseren, maar het is rekenintensief bij hoge deeltjesconcentraties.

Euleriaanse methode: hierbij wordt de deeltjesconcentratie als een continu scalair veld behandeld, vergelijkbaar met temperatuur of gasconcentraties. Dit is geschikt voor kleine aerosolen ($<1-2.5\ \mu\text{m}$)

die zich bijna als gassen gedragen. De methode is efficiënt voor hoge concentraties en geschikt voor het berekenen van de verspreiding van deeltjes in een ruimte, maar mist individuele deeltjesinformatie (traject). Een methode om de nauwkeurigheid voor grotere deeltjes te vergroten is de Drift-flux methode (F. Chen et al., 2006; Lai & Chen, 2007; Zhao et al., 2008) Deze methode staat het toe om de effecten van zwaartekracht op de deeltjes mee te nemen, waardoor de voorspelling realistischer wordt en de verdeling van deeltjes afhankelijk wordt van de grootte van de deeltjes, zoals in de werkelijkheid.

Er zijn verschillende methoden om deeltjes te simuleren. Voor kleine deeltjes (grootte $<1-2.5\ \mu\text{m}$) kan worden volstaan met een Euleriaanse methode. Voor grotere deeltjes dient ofwel de Drift-flux methode te worden gebruikt, ofwel een Lagrangiaanse methode, om de effecten van zwaartekracht op een deeltje mee te kunnen nemen.

Verificatie en validatie

Verificatie en validatie zijn fundamentele stappen die dienen te worden uitgevoerd om de kwaliteit van CFD-simulaties te kunnen waarborgen. Ze zorgen ervoor dat de berekeningen zowel numeriek correct (verificatie) als fysisch representatief (validatie) zijn (Li & Nielsen, 2011; Sørensen & Nielsen, 2003; van Hooff et al., 2018).

Verificatie betreft het controleren of het model juist is geïmplementeerd en of de numerieke oplossingen correct zijn. Dit omvat onder andere:

- Controle op discretisatiefouten via rastergevoeligheidsanalyses (zie sectie Rekenraster)
- Evaluatie van residuen (convergentie)
- Inschatting van foutgroottes
- Etc.

Het doel is om er zeker van te zijn dat de CFD-code en de gekozen instellingen de wiskundige vergelijkingen en modellen correct oplossen.

Validatie richt zich op het vergelijken van CFD-resultaten met experimentele data. Dit is cruciaal om te beoordelen of het model de fysische werkelijkheid goed beschrijft. Belangrijke aspecten zijn:

- Gebruik van betrouwbare meetdata onder goed gedocumenteerde condities.
- Vergelijking van grootheden zoals lichtsnelheden, temperaturen of concentraties.
- Beoordeling van onzekerheden in zowel meetdata als simulatie-invoer.

Een succesvolle validatie verhoogt het vertrouwen in de uitgevoerde simulaties. In toepassingen met aerosolen en ventilatie is validatie bijzonder belangrijk, aangezien kleine afwijkingen in het stromingsveld grote effecten kunnen hebben op de concentraties in de ruimte.

Onderdeel van verificatie en validatiestudies zijn ook het documenteren van alle aannames, randvoorwaarden, rastereigenschappen en onzekerheden. Transparantie in deze processen is essentieel voor reproduceerbaarheid en geloofwaardigheid van de CFD-resultaten.

Verificatie en validatie zijn noodzakelijk om de kwaliteit en betrouwbaarheid van CFD-resultaten te kunnen inschatten en bewijzen. Belangrijke onderdelen van de verificatie zijn de rastergevoeligheidsanalyses en een evaluatie van de residuen (convergentie). Validatie behelst het vergelijken van data uit de CFD-simulaties met gemeten data (of DNS data).

CFD in de context van blootstelling aan pathogenen

Het met behulp van CFD modelleren van de blootstelling aan pathogenen is goed mogelijk. Maar naast de eisen die aan een goede CFD simulatie gesteld moeten worden en die hierboven zijn samengevat, zijn er ook enkele specifieke overwegingen en keuzes die gemaakt moeten worden. Net zoals dit voor het gebruik van CFD in het algemeen geldt, betreft het afwegingen bij het vereenvoudigen van het probleem.

- *Deeltjesmodellering (Kang et al., 2023)*: Bij een vergelijk van drie verschillende manieren van deeltjesmodellering (Lagrangiaans, Euleriaans (scalair), Euleriaans (drift-flux)) blijkt dat het drift-flux model goed in staat is om concentratievelden van aerosolen te berekenen, terwijl het rekening houdt met de depositiesnelheid van deeltjes. Deze depositiesnelheid speelt een rol wanneer wordt gerekend aan deeltjes $>1\text{-}2,5\text{ }\mu\text{m}$ (ten minste $>5\text{ }\mu\text{m}$).
- *Modellering van ademhaling (Kang et al., 2023; Loomans et al., 2024)*: Uit een vergelijk van constante ademhalings- en inhalatiesnelheden met een sinusoidale ademhalingsconditie, voor een situatie met twee elkaar aankijkende personen, blijkt dat het goed mogelijk is uit te gaan van constante randvoorwaardes.
- *Beweging van mensen (Kang et al., 2023)*: Er zijn verschillende manieren om de beweging van personen te modelleren in een CFD-model. Het expliciet modelleren van beweging in CFD is complex en wordt afgeraden. Een alternatieve aanpak door het implementeren van een impulsbron kan het effect van beweging induceren (mengen). Wanneer beweging echter beperkt blijft tot kortdurende verstoringen, is de aanname dat het totale effect op de blootstelling (dosis) beperkt is. Daarom wordt niet geadviseerd om beweging expliciet of impliciet (via een impulsbron) te modelleren
- *Verblijftijd van aerosolen (virus) (Loomans et al., 2024)*: De verblijftijd van een virus in een ruimte is van belang omdat de infectiviteit van een virus afneemt met de tijd. Als voor een virus dat in de lucht vrijkomt het tijdsinterval bekend is, kan het blootstellingsrisico beter worden beoordeeld. Een procedure op basis van de radioactieve tracermethode maakt het mogelijk deze informatie ook bij een Euleriaanse benadering van deeltjestransport beschikbaar te krijgen. De methode is gebaseerd op twee passieve tracers die tegelijkertijd worden

geproduceerd door dezelfde verontreinigingsbron, en met een zelfde productie van verontreiniging. Een van de tracers is inert, terwijl de andere als 'radioactief' wordt beschouwd met een vervalconstante γ [s^{-1}].

- *Bronmodellering (Qin et al., 2025)*: Voor de modellering van de verontreiniging (aërosolen) van een ademend persoon is het effect van impuls en richting van belang, in ieder geval in geval van (langdurig) praten en zingen. Is de potentiële bronlocatie van tevoren bekend, dan moeten impuls en richting worden meegenomen in de simulatie om het ventilatieontwerp beter te analyseren. Is de bronlocatie niet bekend en moeten meerdere potentiële bronlocaties worden onderzocht, dan kan ter vereenvoudiging worden volstaan met de aanname dat er geen impuls en richting is.
- *Modellering van de toevoer*: De modellering van de toevoer is een zeer belangrijke parameter bij het gebruik van CFD voor het simuleren van een stroming in een ruimte. Hoewel een zeer gedetailleerde expliciete simulatie niet altijd nodig is, is de betrouwbaarheid van de simulatie groter wanneer meetgegevens van de toevoer (worp) beschikbaar zijn om het CFD-model van de toevoer mee te valideren/kalibreren.
- *Ventilatie effectiviteit (Loomans et al., 2025)*: voor blootstelling aan pathogenen zijn we geïnteresseerd in de prestatie van de ventilatie ten aanzien van wat in de ruimte gebeurt, de relatie tussen bron en ontvanger. Met CFD kan dit op meerder manieren worden uitgevoerd. Een procedure die is ontwikkeld gaat uit van een grid met bronlocaties op ademhoogte en een evaluatie van de concentratie en concentratieverdeling, ook op ademhoogte. Wanneer de concentratie relatief wordt gemaakt met de concentratie bij een perfect gemengde situatie, dan wordt de zogenaamde contaminant removal effectiveness vergeleken.

Snelle CFD methoden

Computational fluid dynamics (CFD) is momenteel de methode die wordt gebruikt om de luchtstroming in een ruimte te simuleren. De tijdsgemiddelde benadering zoals toegepast binnen de RANS-methode beperkt de rekentijd in vergelijking tot alternatieven zoals LES, terwijl de voorspellingen die ermee gedaan kunnen worden normaal gesproken voldoende nauwkeurig zijn. Maar desondanks vraagt een CFD berekening met RANS nog heel wat rekentijd, en uit het bovenstaande overzicht is ook duidelijk dat er veel onderdelen zijn bij het opstellen van een CFD model waarin de gebruiker de nauwkeurigheid van het verkregen resultaat (ongewild) kan beïnvloeden. Hierdoor zal het gebruik van RANS CFD, en zeker LES of DNS, in de ingenieurspraktijk vooralsnog beperkt blijven tot specialisten op dit onderwerp.

Een parallelle ontwikkeling is echter zichtbaar, waarbij met eenvoudigere of alternatieve technieken de luchtstroming in een ruimte sneller en/of eenvoudiger kan worden berekend, zonder al te veel in te boeten op de nauwkeurigheid. Uit het onderzoek binnen p3Venti blijkt dat de ontwikkelingen van deze technieken snel gaan.

Het toepassen van vereenvoudigde turbulentiemodellen (zero equation, one-equation modellen) om de simulatietijd te verkorten wordt echter niet aangeraden. De tijdwinst die wordt verkregen weegt niet op tegen de reductie in de kwaliteit van de resultaten. Het gebruik van een grover rekenraster (coarse grid CFD), en het toepassen van modellen die GPUs gebruiken (GPU-based CFD) leveren wel een potentieel interessante meerwaarde. Deze modellen leveren met name een significante tijdwinst op bij het berekenen van het stromingsprobleem, terwijl beperkt wordt ingeboet op de kwaliteit van het resultaat. Voor de onderzochte software levert ook de eenvoudigere gebruikersinterface en gridgeneratie een meerwaarde op. Dit gaat echter deels ten koste van het volledige inzicht in en controle over het gecreëerde CFD-model. Om het effect daarvan in te kunnen schatten blijft enige expertise vereist.

Op dit moment wordt aangeraden om dit soort snellere CFD methodes (coarse grid en GPU-based CFD) enkel in te zetten in de ontwerpfase om sneller ontwerpbeslissingen te kunnen nemen. Voor een definitieve beoordeling wordt echter nog steeds het gebruik van conventionele RANS-modellen met een voldoende fijn rekenraster aangeraden. In de controle over het CFD-model en de analyse van de resultaten biedt deze aanpak op dit moment nog steeds de meeste en meest betrouwbare mogelijkheden.

Alhoewel snelle CFD methodes de potentie hebben om een stap te zetten in de ingenieurspraktijk, zijn er ook nog de nodige beperkingen en vragen de simulaties nog altijd om vrij veel expertise. Gezien de beperkingen wordt daarom vooralsnog aanbevolen om uit te gaan van de standaard (conventionele) RANS CFD-methodiek.

Checklist CFD simulaties

Zoals uit dit overzicht blijkt zijn er vele onderdelen waar men bij een CFD studie op moet letten en waarvoor keuzes gemaakt moeten worden. Om er voor te zorgen dat niks wordt vergeten is in Annex C een checklist toegevoegd die een opdrachtgever voor een CFD-studie handvatten geeft om ervoor te zorgen dat duidelijk is welke keuzes zijn gemaakt voor de opzet van het model en de simulatie.

REFERENTIES

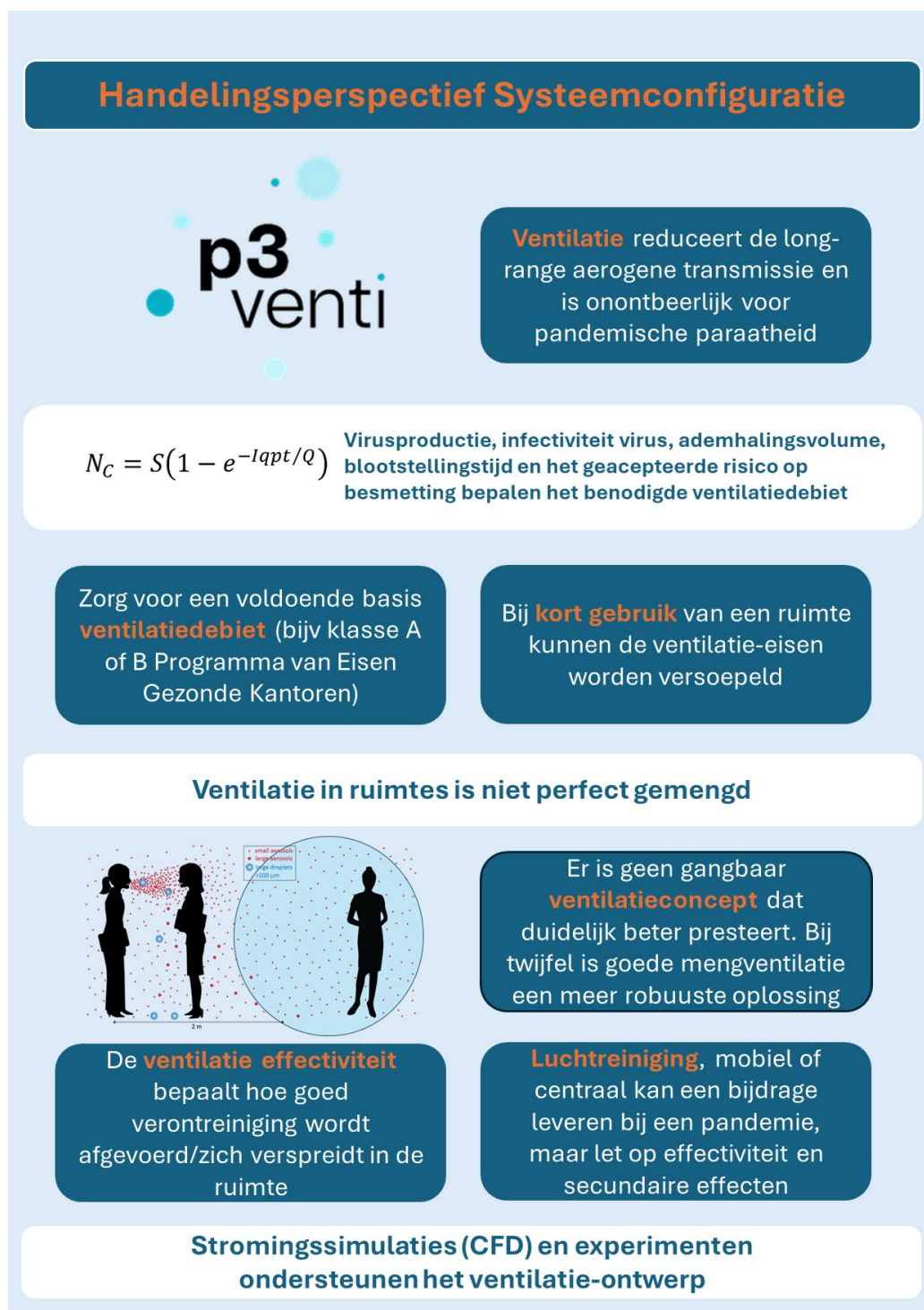
- ANSI/AHAM. (2020). *ANSI/AHAM AC-1-2020 Method for Measuring Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners*.
- ASHRAE. (2019). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
- ASHRAE. (2023). *ASHRAE Standard 241-2023 Control of Infectious Aerosols*.
- Bartels, A.A., Schijven, J.F., Delmaar, J.E. & Duizer, E. 2021. Effect van verschillende ventilatiehoeveelheden op aerogene transmissie van SARS-CoV-2 Risicoschatting op basis van het AirCoV2-model. RIVM-briefrapport 2021-020, RIVM. Bilthoven. Nederland.
- Björn, E., & Nielsen, P. V. (2002). Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air*, 12(3), 147–164. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.08126.x>
- Brohus, H., & Nielsen, P. V. (1996). CFD Models of Persons Evaluated by Full-Scale Wind Channel Experiments. *Indoor Environmental Technology*; No. 60, Vol. R9652, 1–8.
- Chen, F., Yu, S. C. M., & Lai, A. C. K. (2006). Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. *Atmospheric Environment*, 40(2), 357–367. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2005.09.044>
- Chen, H., Zhou, X., Feng, Z., & Cao, S. J. (2022). Application of polyhedral meshing strategy in indoor environment simulation: Model accuracy and computing time. *Indoor and Built Environment*, 31(3), 719–731. https://doi.org/10.1177/1420326X211027620/ASSET/C56342DF-568E-4E19-8F35-FA4627B3DF73/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1420326X211027620-FIG13.JPG
- Chen, Q., & Srebric, J. (2001). *RD-1009 Simplified Diffuser Boundary Conditions for Numerical Room Airflow Models*.
- DIN. (2022). *DIN/TS 67506:2022-02 Disinfection of indoor air using UV-C secondary air units*.
- Fanger, P. O., Melikov, A. K., Hanzawa, H., & Ring, J. (1988). Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12(1), 21–39. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90053-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90053-9)
- Franchimon, F. (2020). UV-C straling in ruimten. *TVVL Magazine*, 2020(5), 48–51.
- Franchimon, F., & Loomans, M. G. L. C. (2021). CO2 als indicator voor ventilatiekwaliteit versus CO2 als ontwerpcriterium. *TVVL Magazine*, 2021(6), 42–46. <https://research.tue.nl/en/publications/co2-als-indicator-voor-ventilatiekwaliteit-versus-co2-als-ontwerp>
- Kang, L., Loomans, M., & van Hooff, T. (2023). *PROJECT P3VENTI - PROGRAM LINE 2 (project phase 2022) - BE2023/1972728*.
- Lai, A. C. K., & Chen, F. Z. (2007). Comparison of a new Eulerian model with a modified Lagrangian approach for particle distribution and deposition indoors. *Atmospheric Environment*, 41(25), 5249–5256. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2006.05.088>
- Lange, de A. & Kompatscher, K. 2025. Resultaten Experimenteel onderzoek testfaciliteit Programmaliijn III (concept). P3Venti project. TNO. Delft. Nederland.
- Li, Y., & Nielsen, P. V. (2011). CFD and ventilation research. *Indoor Air*, 21(6), 442–453. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2011.00723.X>

- Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Cheng, P., Ling, H., Wang, S., Liang, P., Li, J., Xiao, S., Wei, J., Liu, L., Cowling, B. J., & Kang, M. (2021). Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment*, 196, 107788. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107788>
- Loomans, M. G. L. C. (1998). *The Measurement and Simulation of Indoor Air Flow* [Thesis, Eindhoven University of Technology]. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/1362860/9803293.pdf>
- Loomans, M. G. L. C., Boerstra, A. C., Franchimon, F., & Wisse, C. J. (2020). Rekenen aan het risico op infecties. *TVVL Magazine*, 43–47. <https://research.tue.nl/en/publications/rekenen-aan-het-risico-op-infecties>
- 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/>
- Loomans, M. G. L. C., Staassen, M. M., & Loonen, R. C. G. M. (2022). Scholen, Ventilatie, Energie en Besmettingskans; En de zin en onzin van spuien. . *TVVL Magazine*, 4, 17–23.
- Loomans, M., van Hooff, T., Qin, P., Kang, L., & Momulova, E. (2024). *PROJECT P3VENTI - PROGRAM LINE 2 (D2.1-2.3) (project phase 2023) - BE2024/1979451*.
- Loomans, M., Xia, L., Peng, Q., & van Hooff, T. (2025). Ventilation and air cleaning in the context of infection risk – results from two large Dutch research projects. *Paper Presented at Healthy Buildings Europe 2025*.
- Melikov, A. K. (2004). Personalized ventilation. *Indoor Air, Supplement*, 14(SUPPL. 7), 157–167. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2004.00284.X;SUBPAGE:STRING:FULL>
- Morawska, L., Allen, J., Bahnfleth, W., Bennett, B., Bluysen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S. J., Floto, A., Franchimon, F., Greenhalgh, T., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J. L., Kennedy, A., Kumar, P., Kurnitski, J., ... Yao, M. (2024). Mandating indoor air quality for public buildings: If some countries lead by example, standards may increasingly become normalized. *Science*, 383(6690), 1418–1420. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ADL0677>
- Nederlands Normalisatie Instituut. (2022). *Ontwerp NEN-EN 16798-3 Energieprestatie van gebouwen - Ventilatie van gebouwen - Deel 3*.
- Nielsen, P. V. (2009). *CFD in Ventilation Design: a new REHVA Guide Book* (REHVA Guidebook). Aalborg University: Department of Civil Engineering.
- Nielsen, P. V. (2004). Computational fluid dynamics and room air movement. *Indoor Air*, 14(SUPPL. 7), 134–143. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2004.00282.X>
- Overheid. (2025). *Besluit bouwwerken leefomgeving*. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0041297/2025-01-01>
- Paauw, A., & Hornstra, L. M. (2024). *Eigenschappen van Uitgeademde Aerosol Deeltjes met SARS-CoV-2 en de Effecten van de Omgeving daarop*.
- Peng, Z., Rojas, A. L. P., Kropff, E., Bahnfleth, W., Buonanno, G., Dancer, S. J., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M. G. L. C., Marr, L. C., Morawska, L., Nazaroff, W., Noakes, C., Querol, X., Sekhar, C., Tellier, R., Greenhalgh, T., Bourouiba, L., Boerstra, A., ... Jimenez, J. L. (2022). Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks. *Environmental Science and Technology*, 56(2), 1125–1137. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.1C06531/ASSET/IMAGES/LARGE/ES1C06531_0003.JPEG

- Qin, P., van Hooff, T., Loomans, M. G. L. C., & Traversari, A. A. L. (2024). Contaminant exposure in a pharmacy cleanroom with mixing ventilation: Impact of air-change rates. 1-8. Paper presented at RoomVent 2024 conference, Stockholm, Sweden.
- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/INA.12383>
- Platform Gezond Binnenklimaat. (2018). *Programma van Eisen Gezonde Kantoren 2018 (EN: Program of Requirements Healthy Offices 2018)*.
- Qin, P., de Lange, A., van Hooff, T., Traversari, R., & Loomans, M. (2025). Experimental and CFD analysis of particle distribution in a controlled test facility: Impact of exhalation flow velocity and direction. *Building and Environment*, 113328. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.113328>
- REHVA. (2023). *Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases*.
- Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 29(Volume 29, 1997), 123–160. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.FLUID.29.1.123/CITE/REFWORKS>
- Sørensen, D. N., & Nielsen, P. V. (2003). Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor Air*, 13(1), 2–17. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2003.00170.X>
- Topp, C., Hesselholt, P., Trier, M., & Nielsen, P. V. (2003). . Influence of Geometry of Thermal Manikins on Concentration Distribution and Personal Exposure. *Proceedings of the 7th International Conference on Healthy Buildings 2003 (Vol.2)*, 357–263.
- van Hooff, T., & Blocken, B. (2017). Low-Reynolds number mixing ventilation flows: Impact of physical and numerical diffusion on flow and dispersion. *Building Simulation*, 10(4), 589–606. <https://doi.org/10.1007/S12273-017-0354-3/METRICS>
- van Hooff, T., Blocken, B., & Tominaga, Y. (2017). On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. *Building and Environment*, 114, 148–165. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.12.019>
- van Hooff, T., Nielsen, P. V., & Li, Y. (2018). Computational fluid dynamics predictions of non-isothermal ventilation flow—How can the user factor be minimized? *Indoor Air*, 28(6), 866–880. <https://doi.org/10.1111/INA.12492;SUBPAGE:STRING:FULL>
- Vermeulen, L. 2025. Inzichten resultaten literatuurstudies RIVM Projectnummer 060.51323. Eindrapportage P3Venti. RIVM, Nederland.
- Zhang, T., Lee, K., & Chen, Q. (2009). A simplified approach to describe complex diffusers in displacement ventilation for CFD simulations. *Indoor Air*, 19(3), 255–267. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2009.00590.X;WGROUPE:STRING:PUBLICATION>
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhai, Z. J., & Chen, Q. Y. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2—comparison with experimental data from literature. *HVAC and R Research*, 13(6), 871–886. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391460;CSUBTYPE:STRING:SPECIAL;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Zhao, B., Yang, C., Yang, X., & Liu, S. (2008). Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models. *Building and Environment*, 43(4), 388–397. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2007.01.005>
- Zhou, H., Yu, W., Kort, H. S. M., Loomans, M. G. L. C., Wei, S., Zhou, S., Guo, M., Zheng, H., Chen, M., Tran, T. H., Zhang, Y., Wang, C., & Zhang, P. (2025). Air speed needs and local sensitivity of

non-frail and pre-frail older adults: A lab study in China. *Building and Environment*, 280, 113118.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2025.113118>

ANNEX A: INFOGRAPHIC

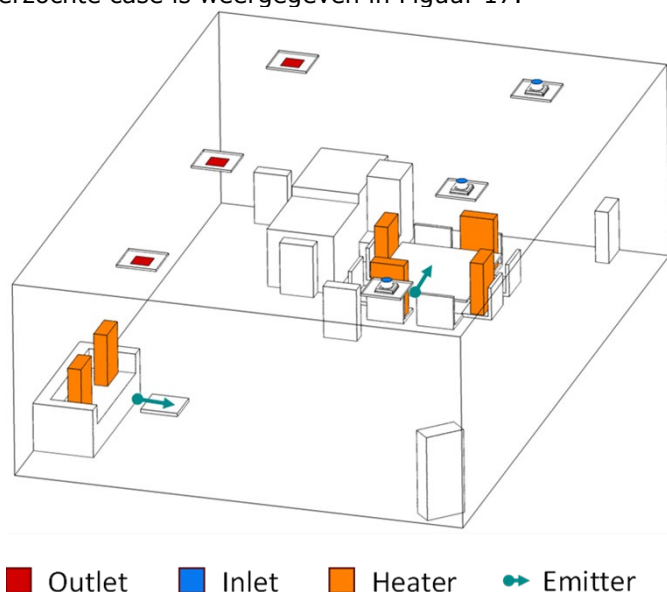


ANNEX B: VOORBEELD EFFECT TOEVOER/AFVOER OP CONCENTRATIEVERDELING-CASE WOONKAMER LANGDURIGE ZORG

Een voorbeeld van een case voor een woonkamer in de langdurige zorg laat in detail zien wat het effect is op de aerosol concentratieverdeling als het debiet, het aantal toe- en afvoerpunten en/of de worp van de toevoer varieert.

Voor dit resultaat is een CFD model gemaakt dat is gevalideerd met meetdata. Vervolgens is een studie gedaan waarbij in een grid op ademhoogte verontreinigingen zijn gemodelleerd, de concentratieverdeling berekend, en vervolgens zijn deze gegevens geanalyseerd.

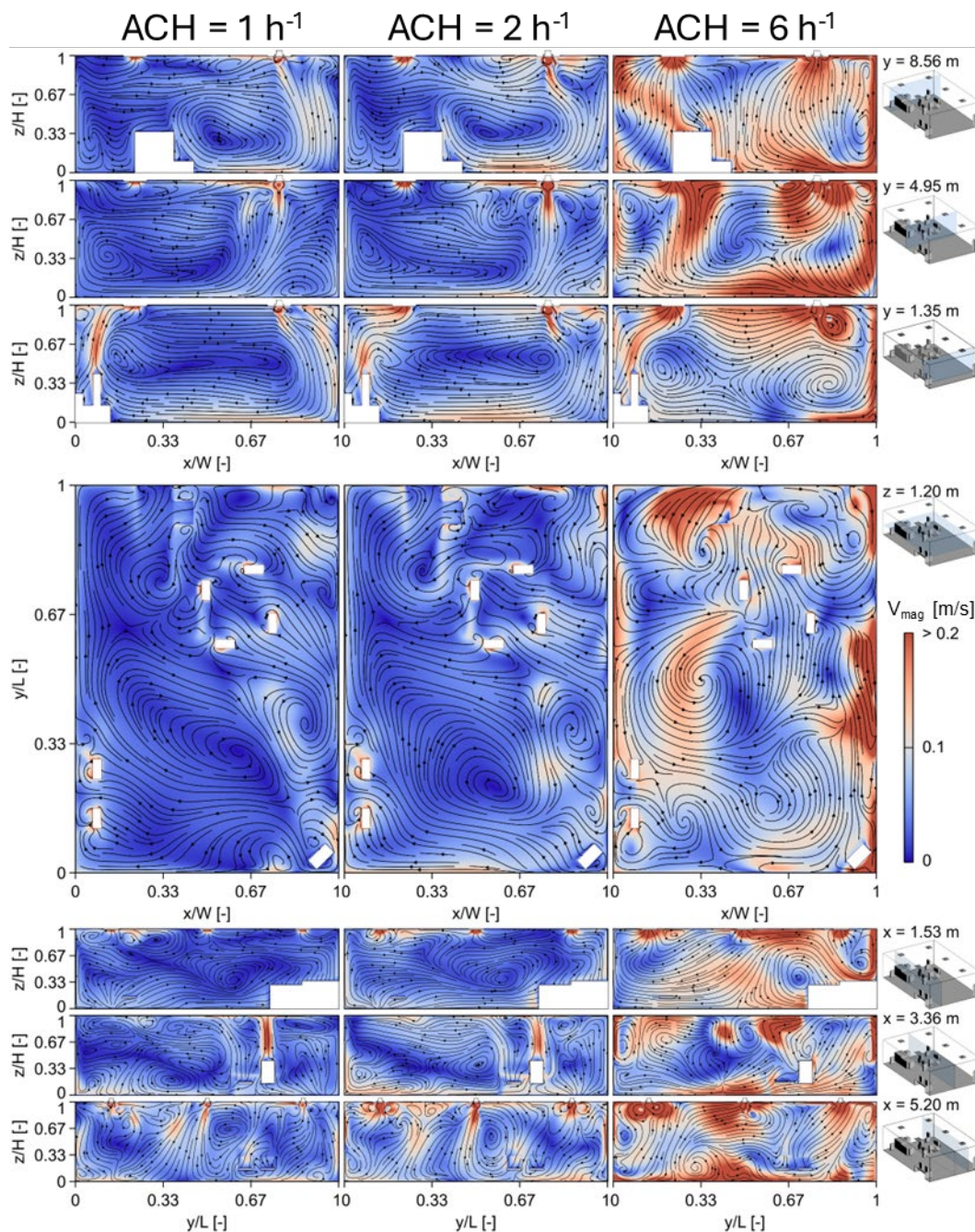
De onderzochte case is weergegeven in Figuur 17.



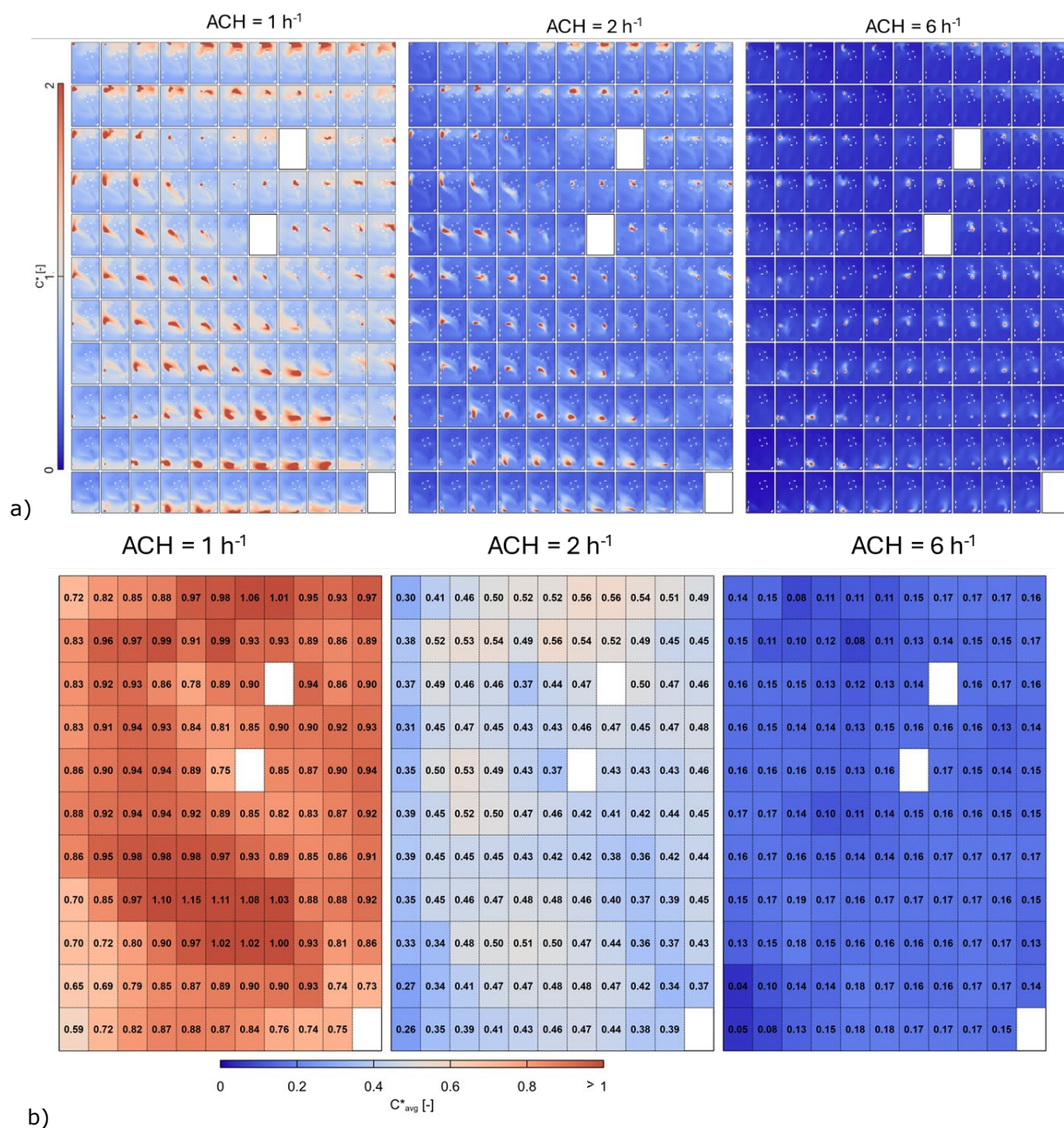
Figuur 17. 3D schematische weergave van de onderzocht ruimte (woonkamer langdurige zorg). De witte blokken zijn obstructies in de ruimte. De oranje blokjes representeren, in zeer vereenvoudigde vorm, mensen. In de analyse is de emitter positie vervangen door een grid van bronlocaties (zonder impuls).

Figuur 18 toont het snelheidsveld op verschillende vlakken in de ruimte voor drie verschillende waarden voor het ventilatievoud ($ACH = \text{Air Change Rate}$). Dit is voor de case met 3 toevoerroosters en drie afvoerroosters (3I3O). Duidelijk is dat een hoger ventilatievoud tot gemiddeld hogere luchtsnelheden in de ruimte leidt en dat het stromingspatroon wordt beïnvloed. Figuur 19a toont de concentratieverdeling van de verontreiniging voor de verschillende locaties van een bron in het ademhalingsvlak. De figuur toont, per ACH variant, 121 verschillende locaties van de bron en hoe dit de concentratieverdeling in het ademhalingsvlak beïnvloedt. Afgezien van de verdeling, als de normalisatie wordt gedaan naar de

verontreinigingsconcentratie in de afvoer voor $ACH = 1 \text{ h}^{-1}$, verlaagt een hogere ACH de totale concentratie. Dit resultaat wordt ook getoond in Figuur 19b. In deze figuur wordt de gemiddelde concentratie over het ademhalingsvlak weergegeven voor de verschillende bronposities die zijn onderzocht. Net als in Figuur 19a geeft de positie in de grafiek de locatie van de bron in de ruimte aan.



Figuur 18. Snelheidscontouren op verschillende vlakken in de x,y en z-richting voor de case 3I30 (3 toevoeropeningen en 3 afvoeropeningen) voor $ACH = 1, 2$ of 6 h^{-1} .

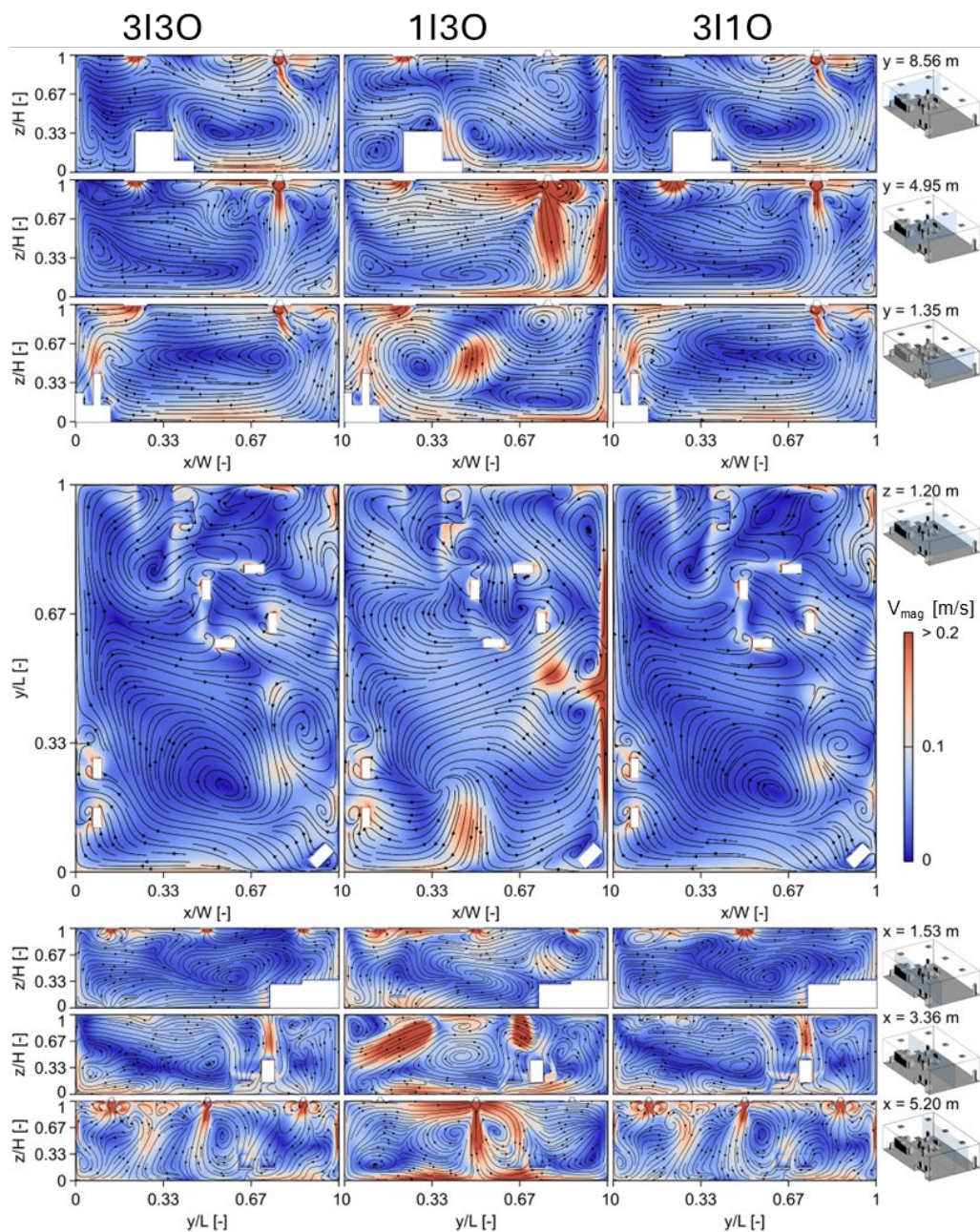


Figuur 19. Genormaliseerde concentratieverdeling in het ademhalingsvlak (1,2 m hoogte) (a) en de gemiddelde concentratie in dit vlak (b) als functie van de bronpositie. De figuren tonen resultaten, per ventilatievoud, van 11x11 berekeningen, waarbij de bronpositie in de rechthoekige ruimte overeenkomt met de positie van het betreffende resultaat in de figuur. Bijvoorbeeld, het resultaat linksboven voor ACH = 1 h⁻¹ (gemiddelde concentratie 0.72) betreft het resultaat wanneer de bron zich in dat gebied in de ruimte bevindt. Merk op dat de resultaten zijn genormaliseerd naar de theoretisch gemiddelde concentratie voor ACH=1 h⁻¹. De resultaten worden gepresenteerd voor de case met drie toevoeropeningen en drie afvoeropeningen (3I3O).

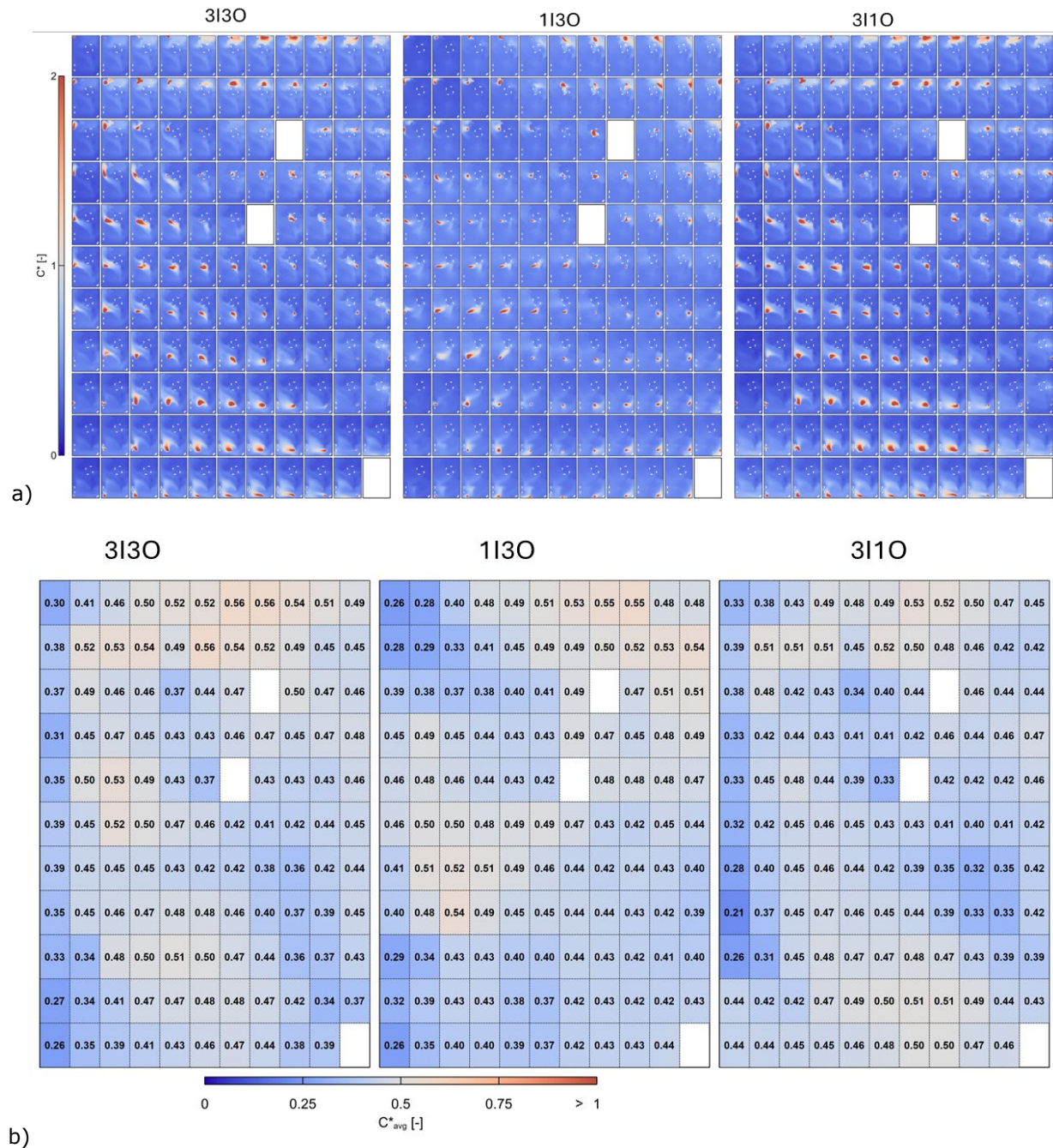
Het effect van het ventilatievoud uit zich in de gemiddelde concentratie in de ademzone, en in een verschuiving van de gradiënten doordat het stromingspatroon verandert. Voor de onderzochte varianten is het effect op de gemiddelde concentratie het grootst. Merk echter op, dat in de huidige

bouw een ventilatievoud van 6 h^{-1} , normaal gesproken niet voorkomt, met uitzondering van de zorghuisvesting.

Het effect van verschillende ventilatieconfiguraties, bij een ventilatievoud van 2 h^{-1} , wordt getoond in Figuur 20 en Figuur 21.



Figuur 20. Snelheidscontouren voor de drie cases met een verschillende configuratie van toe- en afvoer (x_I toevoeropeningen en y_O afvoeropeningen; $x, y = 1$ of 3) voor $\text{ACH} = 2 \text{ h}^{-1}$.



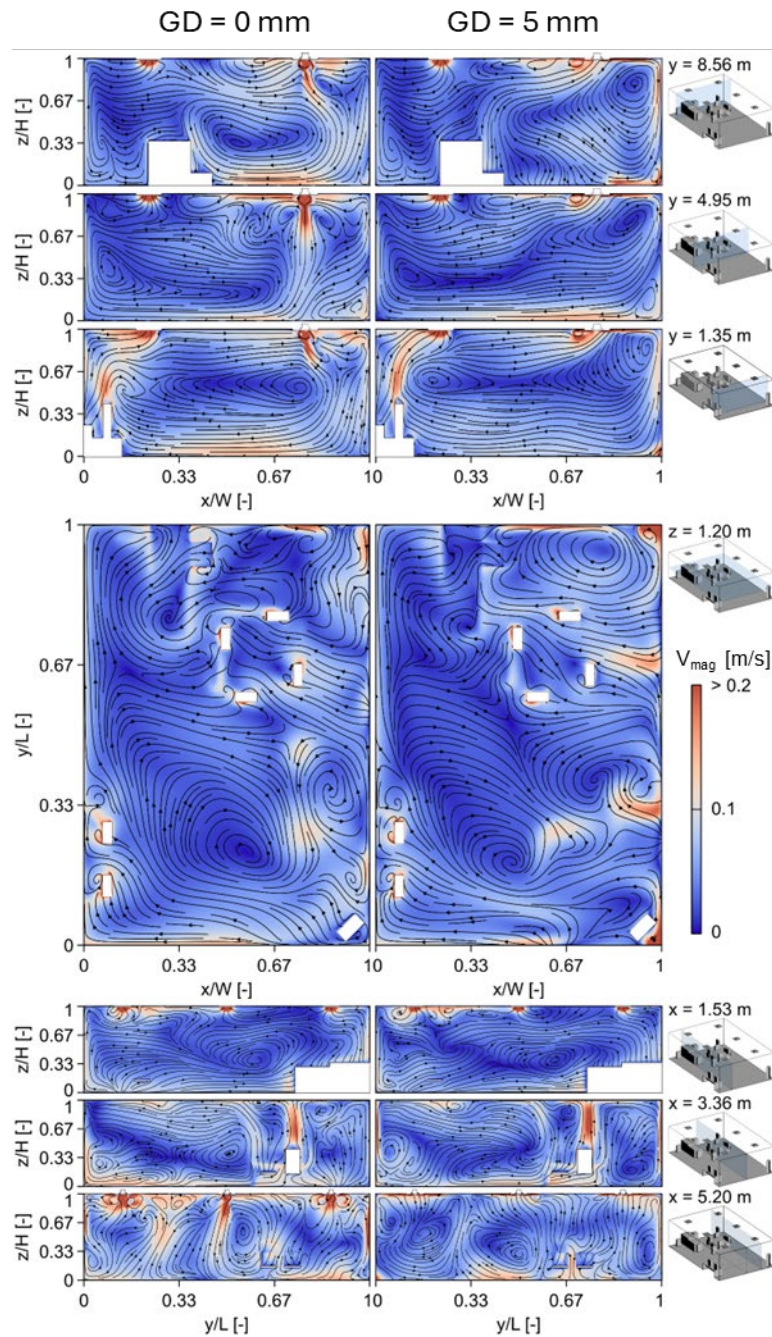
Figuur 21. Genormaliseerde concentratieverdeling in het ademhalingsvlak (1,2 m hoogte) (a) en de gemiddelde concentratie in dit vlak (b) als functie van de bronpositie. De figuren tonen resultaten voor drie ventilatieconfiguraties, voor een ventilatievoud van 2 h^{-1} voor 11×11 berekeningen, waarbij de bronpositie in de rechthoekige ruimte overeenkomt met de positie van het betreffende resultaat in de figuur. Bijvoorbeeld, het resultaat rechtsboven voor case 3I3O (gemiddelde concentratie 0.49) betreft het resultaat wanneer de bron zich in dat gebied in de ruimte bevindt. Merk op dat de resultaten zijn genormaliseerd naar de theoretisch gemiddelde concentratie voor $ACH=1 \text{ h}^{-1}$.

De resultaten in Figuur 20 en Figuur 21 laten zien dat een aangepaste ventilatieconfiguratie het stromingspatroon in de ruimte beïnvloedt en daarmee ook de blootstellingsconcentratie als functie van de positie van de bron in de ruimte. De wijze van verspreiding van de contaminatie kan voor individuele

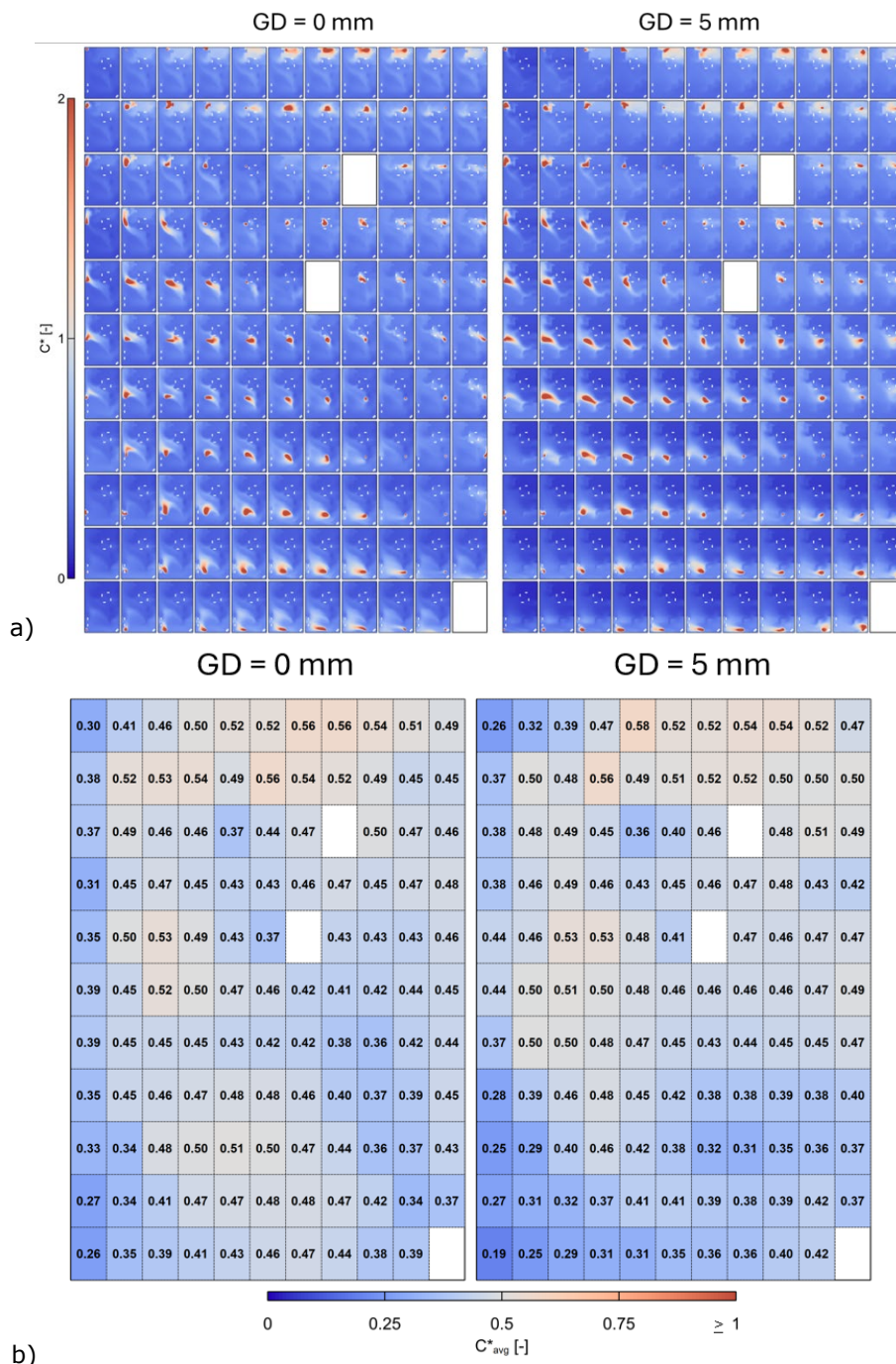
bronposities aanzienlijk verschillen (zie Figuur 21a) en dit zet zich ook door als naar de gemiddelde concentratie wordt gekeken (zie Figuur 21b). Afhankelijk van de locatie zijn gemiddelde verschillen tot 25% mogelijk. Lokaal in de ruimte zijn de verschillen veel groter.

Waar bij een verhoogd ventilatievoud en een andere toe- en afvoerconfiguratie een ander stromingspatroon zal ontstaan, is zoets ook mogelijk als een ander type rooster wordt gebruikt om de lucht aan de ruimte toe te voeren. Dit kan ook gebeuren wanneer in de uitvoering een rooster niet optimaal is geïnstalleerd, of wanneer de worp anders wordt bij een aangepast ventilatievoud. In het voorbeeld in Figuur 22 worden simulatieresultaten vergeleken voor een case met $ACH = 2 \text{ h}^{-1}$ en een configuratie met 3 toevoeropeningen en 3 afvoeropeningen. De variatie zit in de uitvoering van het rooster, waarvan de worp zeer gevoelig blijkt voor de spleetgrootte aan de plafondzijde van het rooster (zie ook Figuur 7). Er is een vergelijking gemaakt tussen een ontwerp met een spleetgrootte (gap distance; GD) van 0 mm en van 5 mm. Daardoor zal de worp veranderen van verticaal omlaag naar horizontaal.

Het effect van verschillende roosterconfiguraties, bij een ventilatievoud van 2 h^{-1} , wordt getoond in Figuur 22 (gelijk aan Figuur 8) en Figuur 23.



Figuur 22. Snelheidscontouren op verschillende vlakken in de x,y en z -richting voor de case 3I30 (3 toevoeropeningen en 3 afvoeropeningen) met een spleetgrootte (GD) van 0 mm en van 5 mm, voor $\text{ACH} = 2 \text{ h}^{-1}$.



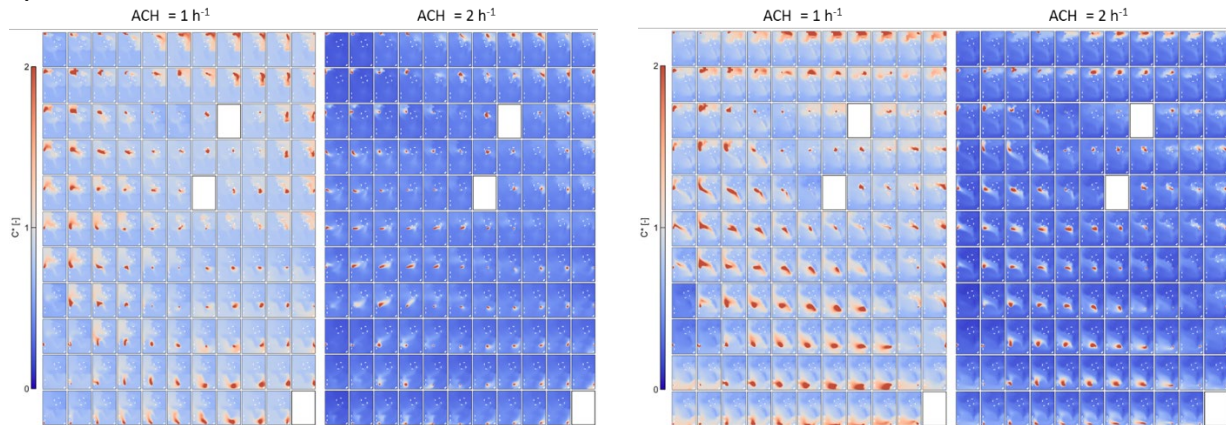
Figuur 23. Genormaliseerde concentratieverdeling in het ademhalingsvlak (1,2 m hoogte) (a) en de gemiddelde concentratie in dit vlak (b) als functie van de bronpositie. De figuren tonen resultaten voor een verschil in spleetgrootte dat deel uitmaakt van het roosterontwerp. De resultaten zijn weergegeven voor een ventilatievoud van 2 h^{-1} voor 11x11 berekeningen, waarbij de bronpositie in de rechthoekige ruimte overeenkomt met de positie van het betreffende resultaat in de figuur. Bijvoorbeeld, het resultaat rechtsboven voor case 3I30 (gemiddelde concentratie 0.49) betreft het resultaat wanneer de bron zich in dat gebied in de ruimte bevindt. Merk op dat de resultaten zijn genormaliseerd naar de theoretisch gemiddelde concentratie voor $\text{ACH}=1 \text{ h}^{-1}$.

Figuur 22 laat zien dat door de andere worp, het stromingspatroon in de ruimte verandert. De lokale verdeling van de verontreiniging wordt daar ook door beïnvloed, maar dit is vooral lokaal, aan de zijde

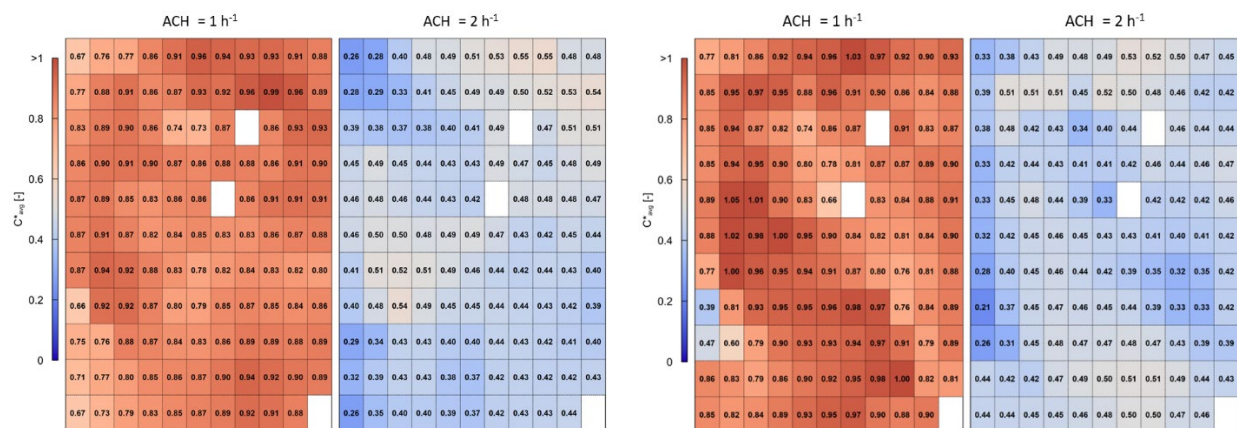
van de toevoer (rechterzijde ruimte). Hier zien we in Figuur 23a dat bij $GD = 5$ mm, verontreiniging op ademhoogte in de ruimte komt, waar dat niet het geval is bij $GD = 0$ mm. Aan de afvoerszijde zijn de verschillen meer beperkt. Hierdoor blijven de verschillen in de gemiddelde waarden (Figuur 23b) in het algemeen beperkt, hoewel variatie tot 25% mogelijk is.

Tot slot toont Figuur 24, voor de volledigheid, vergelijkbare resultaten als Figuur 16, maar nu voor een verlaagd ventilatievoud voor de ventilatieconfiguraties 1I3O en 3I1O. Uit de vergelijking blijkt dat met name bij het lagere ventilatievoud de verdeling van de verontreiniging op ademhoogte kan afwijken. Voor de gemiddelde concentratie (Figuur 24b) zien we dat case 1I3O iets beter presteert dan case 3I1O. De lokale verschillen in de ruimte van een zelfde case zijn echter groter.

a)



b)

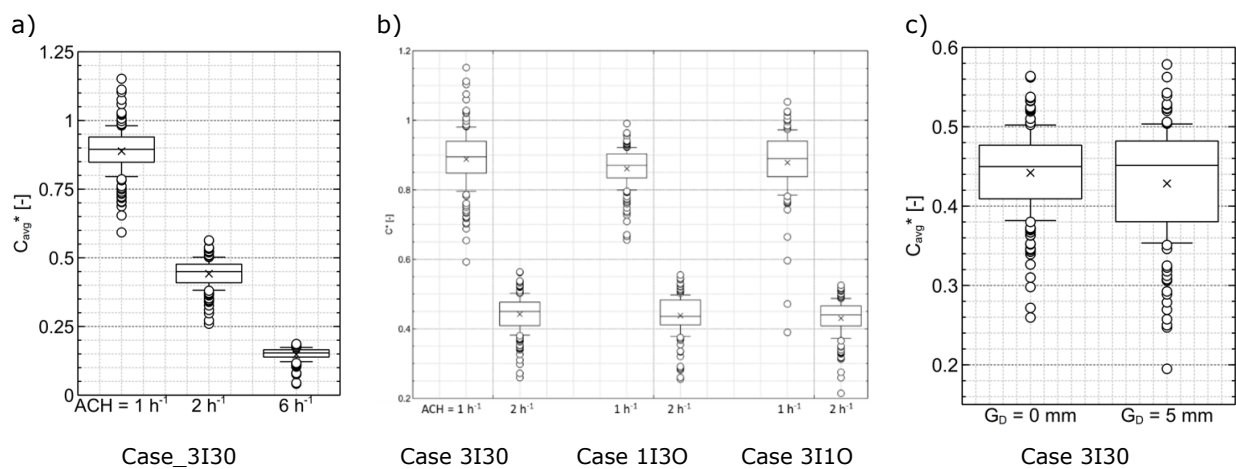


Case_1I3O

Case_3I1O

Figuur 24. Genormaliseerde concentratieverdeling in het ademhalingsvlak (1,2 m hoogte) (a) en de gemiddelde concentratie in dit vlak (b) als functie van de bronpositie. De figuren tonen resultaten voor een tweetal ventilatieconfiguraties (1 toevoer-, 3 afvoerpunten: 1I3O; 3 toevoer-, 1 afvoerpunten: 3I1O) voor een ventilatievoud van 1 en 2 h^{-1} voor 11×11 berekeningen, waarbij de bronpositie in de rechthoekige ruimte overeenkomt met de positie van het betreffende resultaat in de figuur. Bijvoorbeeld, het resultaat linksboven voor case 1I3O, $ACH = 1 \text{ h}^{-1}$ (gemiddelde concentratie 0.67), betreft het resultaat wanneer de bron zich in dat gebied in de ruimte bevindt. Merk op dat de resultaten zijn genormaliseerd naar de theoretisch gemiddelde concentratie voor $ACH = 1 \text{ h}^{-1}$.

Tot slot presenteert Figuur 25 een samenvatting van alle simulaties die zijn besproken in de Annex (ongeveer 1000 simulaties in totaal), in de vorm van boxplots van de resultaten voor de gemiddelde verontreinigingsconcentratie voor de onderzochte varianten bij de verschillende bronposities in de ruimte. Uit de figuur zijn twee duidelijke conclusies af te leiden. Een hoger ventilatievoud is gemiddeld genomen de meest effectieve maatregel om de blootstelling aan aerosolen te verlagen. Echter, voor de onderzochte varianten met een verschillend ventilatievoud blijkt dat er bronposities zijn die het effect van een verhoogd ventilatievoud (deels) teniet kunnen doen.



Figuur 25. Boxplots van de gemiddeld concentratie voor de onderzochte bronposities, voor de verschillende onderzochte cases: a) variatie in ventilatievoud, b) variatie in ventilatieconfiguratie en ventilatievoud, c) variatie in roosterontwerp (bij ACH = 2 h⁻¹)

ANNEX C: CHECKLIST CFD-SIMULATIES

Project	
Projectnaam	
Opdrachtgever	
Projectleider	
Datum	
Model	
Domeinafmetingen	
Modellering toevoeropening	☐ Impliciet ☐ Expliciet
Interne obstructies (bijv. meubilair)	☐ Ja, te weten: ☐ Nee
Raster	
Rastergrootte (aantal cellen)	
Celtype(s)	
Rastersensitiviteitsstudie	☐ Ja ☐ Nee
y+ of y* waarden	Min: Max:
Instellingen	
CFD code	
Stationaire of tijdsafhankelijke simulatie	☐ Stationair ☐ Tijdsafhankelijk (dT = S)
Turbulentiemodellering	☐ RANS ☐ LES
Turbulentiemodel/Subgrid-scale model (e.g. <i>Standaard k-ε</i> , <i>SST k-ω</i> voor RANS, e.g. <i>Smagorinsky</i> , <i>WALE</i> voor LES)	
Wandbehandeling	☐ Standaard wandfuncties ($y^+ > 30$) ☐ Low-Reynolds number modeling ($y^+ < 5$) ☐ Anders:
Discretisatieschema's (e.g. <i>first-order upwind</i> , <i>second-order upwind</i> , <i>second-order central</i> , etc.)	Snelheid: Turbulentie: Temperatuur: Scalaire variabelen:
Druk-snelheidskoppeling (e.g. <i>SIMPLE</i> , <i>SIMPLEC</i> , <i>PISO</i>)	
Modellering deeltjes	☐ Lagrangiaans

	☐ Euleriaans (passieve tracer) ☐ Drift Flux
Convergentie	Residuen: Fysieke grootheden geëvalueerd: ☐ Ja ☐ Nee
Buoyancy (bijv. Boussinesq, ideal gas law)	☐ Ja, te weten: ☐ Nee
Stralingsmodel (bijv. P1, Surface-to-surface (S2S), Discrete Transfer Radiation Model (DTRM))	☐ Ja, te weten: ☐ Nee
Randvoorwaarden	
Inlaat	Snelheid: Turbulentie-eigenschappen: Luchttemperatuur: Concentraties:
Uitlaat	
Wanden	☐ Temperatuur: K ☐ Warmtestroomdichtheid: W/m ² ☐ Adiabatisch (geen warmteuitwisseling door wanden)
Vloer	☐ Temperatuur: K ☐ Warmtestroomdichtheid: W/m ² ☐ Adiabatisch (geen warmteuitwisseling door vloer)
Plafond	☐ Temperatuur: K ☐ Warmtestroomdichtheid: W/m ² ☐ Adiabatisch (geen warmteuitwisseling door plafond)
Deeltjesbron	Snelheid/debiet: Turbulentie-eigenschappen: Luchttemperatuur: Concentratie:
Interne warmtebronnen	☐ Ja (geef aantal + randvoorwaarde (W/m ² of W/m ³)) ☐ Nee
Validatie	
Directe validatie	☐ Ja (bespreek resultaat) ☐ Nee
Subconfiguratievalidatie (validatie van soortgelijk stromingsprobleem)	☐ Ja (bespreek resultaat) ☐ Nee

