

Eindrapport

# Aanbevelingen voor fysische parameters in het Vlaams Binnenmilieubesluit

Borislav Lazarov, Marianne Stranger

November, 2017



---

**VITO NV**

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE  
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99  
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)  
Bank 375-1117354-90 ING  
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB



**VERSPREIDINGSLIJST**

Sara Benoy, Sofie Vandenbroeck, Agentschap Zorg en Gezondheid

**INHOUD**

<b>VERSPREIDINGSLIJST</b>	<b>I</b>
<b>INHOUD</b>	<b>II</b>
<b>LIJST VAN AFKORTINGEN</b>	<b>IV</b>
<b>Verklarende lijst</b>	<b>V</b>
<b>Lijst van tabellen</b>	<b>VI</b>
<b>Lijst van figuren</b>	<b>VII</b>
<b>CHAPTER 1 INLEIDING</b>	<b>9</b>
1.1. <i>Situering</i>	9
1.2. <i>Doelstelling</i>	10
<b>CHAPTER 2 Parameters en Waarden</b>	<b>12</b>
2.1. <i>Parameters</i>	12
2.2. <i>Waarden</i>	13
<b>CHAPTER 3 Thermisch comfort</b>	<b>15</b>
3.1. <i>Temperatuur</i>	15
3.1.1. <i>Literatuur</i>	16
3.1.2. <i>Voorstel voor het Vlaams Binnenmilieubesluit</i>	21
3.1.3. <i>Aftoetsing van deze comforttemperaturen ten opzichte van bestaande richtlijnen en standaarden</i>	22
3.2. <i>Relatieve vochtigheid</i>	26
3.2.1. <i>Literatuur</i>	26
3.2.2. <i>Voorstel voor het Vlaams Binnenmilieubesluit</i>	29
3.2.3. <i>Aftoetsing van dit voorstel voor relatieve vochtigheid ten opzichte van bestaande richtlijnen en standaarden</i>	30
3.3. <i>Tocht</i>	31
3.3.1. <i>Literatuur</i>	31
3.3.2. <i>Voorstel voor het Vlaams Binnenmilieubesluit</i>	33
3.3.3. <i>Aftoetsing van deze grenswaarden voor tocht ten opzichte van bestaande richtlijnen en standaarden</i>	34
<b>CHAPTER 4 Koolstofdioxide</b>	<b>37</b>
4.1. <i>Literatuur</i>	37
4.2. <i>Voorstel voor het Vlaams Binnenmilieubesluit</i>	38
4.3. <i>Aftoetsing van deze grenswaarden voor tocht ten opzichte van bestaande richtlijnen en standaarden</i>	39
<b>CHAPTER 5 Conclusie</b>	<b>41</b>

---

<b>CHAPTER 6</b>	<b>References</b>	<b>42</b>
<b>ANNEX A</b>	<b>Comfort temperatuur berekeningen</b>	<b>47</b>
<b>ANNEX B</b>	<b>MEETMETHODES</b>	<b>49</b>

**LIJST VAN AFKORTINGEN**

AMV	Actual Mean Vote
AV	Absolute Vochtigheid
BiMi	BinnenMilieu
clo	Clothing Insulation – kledij-isolatie
DR	Draught Rate
ET	Effective Temperature
ET	Effectieve Temperatuur
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IAQ	Indoor Air Quality
OT	Operatieve Temperatuur
PMV	Predictive Mean Vote - Voorspelde Gemiddelde Waardering
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied – Voorspelde Percentage Ontevredenen
RV	Relatieve Vochtigheid
T <sub>c</sub>	Comforttemperatuur
TR	Tocht Risico
T <sub>RM</sub>	Running mean outdoor temperature - lopend gemiddelde van de buitentemperatuur
BG	Bulgarije
CZ	Tsjechië
FI	Finland
FR	Frankrijk
DE	Duitsland
GR	Griekenland
HU	Hongarije
IT	Italië
LT	Litouwen
NO	Noorwegen
PL	Polen
PT	Portugal
RO	Roemenië
SI	Slovenië
UK	Verenigd Koninkrijk

---

**VERKLARENDE LIJST**

Free-running mode	Natuurlijk geklimatiseerde gebouwen, dit zijn gebouwen waarbij geen energieverbruik is voor verwarming of koeling
Mixed-mode	Dit zijn gebouwen waarbij verwarming aanwezig is bij koude weerscondities, en koeling bij warm weer, maar waar ook periodes zijn waarbij comfortabele binnen condities bereikt worden zonder gebruik van energie voor verwarming of koeling
Metabolische snelheid	Menselijke lichaamswarmte, wordt uitgedrukt in 'met' eenheden. De metabolische snelheid van een ontspannen, zittend persoon is 1 met, of 58 W/m <sup>2</sup> .
Gemiddelde stralingstemperatuur	Het gemiddelde stralingstemperatuur is de temperatuur van een uniforme ruimte waarmee een zwarte bol (een object dat alles absorbeert) elektromagnetische straling die erop valt) dezelfde stralingsuitwisseling zou hebben als met de echte omgeving.
clo	Clothing Insulation – kledij-isolatie, wordt uitgedrukt in clo eenheden. 1 clo heft de dimensie van R, de waarde die gebruikt wordt voor het uitdrukken van isolatie in gebouwen. 1 clo = 0.155 K m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup>
Draught Rate	Het voorspelde percentage van mensen dat discomfort ervaart ten gevolge van tocht
Mechanische koeling	Koeling van het binnenmilieu met mechanische middelen die worden gebruikt voor koeling van toevoerlucht, ventilatorconvectoren, gekoelde oppervlakken, enz. (EN 15251, 2007)
Koude jaarhelft (verwarmingsseizoen)	Delen van het jaar waarin (sommige delen van de dag en een deel van het gebouw, meestal in de winter) verwarmingstoestellen nodig zijn om de binnentemperatuur op het gewenste niveau te houden (EN 15251, 2007)
Warme jaarhelft (koelingsseizoen)	Deel van het jaar waarin (sommige delen van de dag en een deel van het gebouw, meestal in de zomer) koelapparatuur nodig is om de binnentemperatuur op het gewenste niveau te houden (EN 15251, 2007)

## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1 Besluit van de Vlaamse Regering houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico's door verontreiniging van het binnenmilieu (11 JUNI 2004) .....	12
Tabel 2 Categorieën van thermische omgeving, volgens ISO 7730.....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 3 Voorbeelden van aanbevolen categorieën voor het ontwerp van verwarmde en mechanisch gekoelde gebouwen, EN 15251 .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 4 Beschrijving van de toepasbaarheid van de categorieën zoals gedefinieerd in EN 15251 .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 5 Acceptabele thermische omgeving voor algemeen comfort, ASHRAE Standard 55 .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 6 Voorgestelde comforttemperaturen en aanvaardbaar bereik.....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 7 Voorbeeld ontwerpcriteria voor ruimten in verschillende soorten gebouwen (ISO 7730: 2005).....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 8 Aanbevolen ontwerpwaarden van de binnentemperaturen voor het ontwerp van gebouwen en HVAC-systemen. ....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 9 Operative temperature limits for buildings without mechanical cooling according the requirements of EN 15251:2007 using maandelijkse gemiddelde buitentemperatuur van de voorbije jaren (periode 2009-2016), gemeten in Antwerpen. ....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 10 Voorgestelde bereik van RH .....	30
Tabel 11 Aanbevolen ontwerpcriteria voor de vochtigheid in bezette ruimten wanneer er een bevochtigings/ ontvochtigingsapparaat geïnstalleerd is (EN 15251: 2007).....	30
Tabel 12 Subjectieve reactie op luchtbeweging (Bradshaw, 2006) .....	31
Tabel 13 Categorieën van thermisch comfort volgens ISO 7730: 2005 (ISO, 2015) .....	32
Tabel 14 Maximaal aanvaardbare luchtsnelheid voor de aanvaardbare comforttemperaturen voorgesteld in paragraaf 3.1.2, de luchttemperaturen, turbulentie-intensiteit (40%) en DR (10%).....	33
Tabel 15 Voorgestelde grenswaarde voor luchtsnelheid.....	34
Tabel 16 Voorbeeld ontwerpcriteria voor ruimten in verschillende soorten gebouwen (ISO 7730: 2005).....	34
Tabel 17 Criteria voor maximale luchtsnelheid voor de drie categorieën voor het ontwerp van gebouwen en HVAC.....	35
Tabel 18 Voorgestelde grenswaarde voor CO <sub>2</sub> concentratie .....	39
Tabel 19 Aanbevolen CO <sub>2</sub> -concentraties boven de buitenconcentratie voor verschillende categorieën en verwacht percentage ontevreden personen.....	39
Tabel 20 Maandelijkse gemiddelde buitentemperatuur in Antwerpen, België voor de periode 2009 - 2016 (bron: <a href="https://www.worldweatheronline.com/antwerp-weather/be.aspx">https://www.worldweatheronline.com/antwerp-weather/be.aspx</a> ) .....	47
Tabel 21 Resulted monthly running mean outdoor temperatures ( $T_{RM}$ ) and the calculated comfort temperatures ( $T_c$ ) using the regression models of field studies performed in Europe, uitgedrukt in °C.....	48



---

**LIJST VAN FIGUREN**

Figuur 1 Factoren die de menselijke perceptie van de binnenomgeving beïnvloeden (Bluyssen, 2009) .....	9
Figuur 2 Bereik van de optimale comforttemperatuur voor natuurlijk geventileerde gebouwen, die overeenstemt met 90 en 80% thermische aanvaardbaarheid (aangepast van de Dear, 2002) .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Figuur 3 Ontwerpwaarden van de bedrijfstemperatuur in gebouwen zonder mechanische koelsystemen (EN 15251: 2007) .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Figuur 4 Grafische weergave van het aanvaardbare bereik van de operationele temperatuur en vochtigheid voor werkruimten (ASHRAE, 2017). .....	26
Figuur 5 Binnenhuistemperatuur-grenswaarden van uit een selectie van EU landen (Brelah, 2011) .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Figuur 6 Computer gesimuleerde dispersie van grote uitgedemde druppels (initiële grootte 100 µm diameter) door normale ademhaling in een geventileerde kamer met een lage RV (35%) en een hoge (95%) RV, uit Lui et al (2016) .....	28
Figuur 7 Optimale relatieve luchtvochtigheid voor het minimaliseren van nadelige gezondheidseffecten (aangepast van Arundel et al., 1986) .....	29
Figuur 8 Maximaal toelaatbare gemiddelde luchtsnelheid in functie van lokale luchttemperatuur en turbulentie-intensiteit, ISO 7730: 2005 .....	33
Figuur 9 Relatieve vereisten voor luchtsnelheid in EU-landen (Brelah, 2011) .....	36
Figuur 10 Impact of CO <sub>2</sub> on human decision-making performance (Satish, 2012).....	38
Figuur 11 Binnenlucht CO <sub>2</sub> concentratie richtwaarden van geselecteerde EU landen (Brelah, 2011).....	40



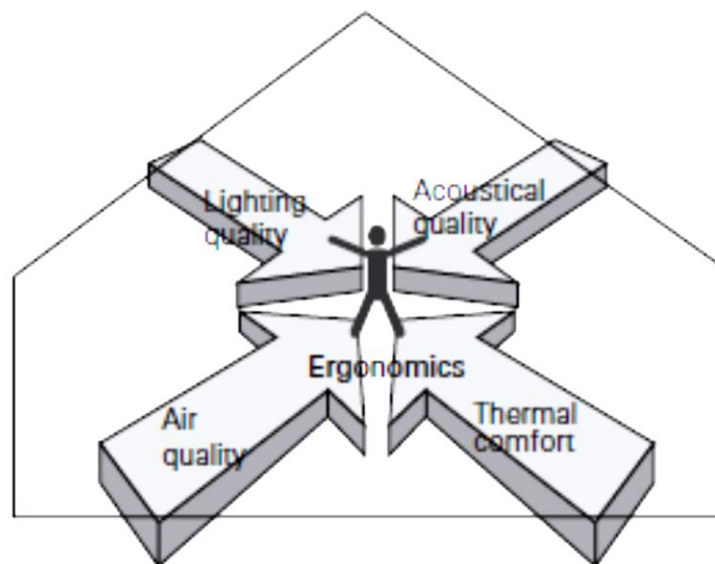
## CHAPTER 1 INLEIDING

**1.1. SITUERING**

Binnenluchtkwaliteit heeft een zeer belangrijke invloed op de menselijke gezondheid doordat mensen 60 tot 90% van hun tijd binnenshuis doorbrengen. Volgens de WHO zijn in 2012, 99.000 overlijdens in Europa (WHO, 2012). Binnenluchtkwaliteit heeft betrekking op de kwaliteit van de lucht in gebouwen en woningen en heeft een invloed op de gezondheid van mensen. Samen met een gezonde binnenomgeving speelt comfort, met inbegrip van het thermische, visuele en akoestische comfort, ook een belangrijke rol in het welzijn van mensen en het vermogen om te werken.

In het algemeen zijn er vier basisfactoren in de binnenomgeving, die enerzijds de zintuiglijke perceptie van die binnenomgeving beïnvloeden, maar anderzijds ook invloed hebben op de lichamelijke en mentale toestand van bewoners:

1. Thermisch comfort (vochtigheid, temperatuur en luchtcirculatie)
2. Visuele- of lichtkwaliteit (bepaald door uitzicht, verlichting, verlichtingsverhoudingen, reflectie)
3. Kwaliteit van de binnenlucht (geur, binnenluchtvervuiling, frisse luchtvoorziening en etc.)
4. Akoestische kwaliteit (beïnvloed door buiten- en binnengeluid, evenals trillingen)



*Figuur 1 Factoren die de menselijke perceptie van de binnenomgeving beïnvloeden (Blyussen, 2009)*

De fysieke toestand van de bewoners (gezondheid), de binnenluchtkwaliteit (de blootstelling van bewoners aan verontreinigende stoffen in de ruimte) en het thermisch comfort leveren de grootste bijdrage. De andere twee factoren (visuele en akoestische kwaliteit van het binnenmilieu) hebben invloed op de menselijke waarneming van het milieu, d.w.z. het comfort en het vermogen om te werken (Alhorr et al. 2016).

Het Vlaams Binnenmilieubesluit (Bvl Reg 11 juni 2004, BS 19/10/2004) bepaalt kwaliteitsnormen (gespecificeerd in richt- en interventiewaarden) voor chemische, fysieke en biotische factoren in het binnenmilieu.

Vermits er gedurende de voorbije 10 jaar veel vooruitgang geboekt is inzake (inter)nationaal onderzoek, beschikbare literatuur en het in kaart brengen van de situatie in Vlaamse binnenmilieus, zijn de bestaande richt- en interventiewaarden mogelijks verouderd. Daarenboven is er een nood om definities bij te sturen, zodat ze meer aansluiten bij de praktijk (bv. Het opleggen mildere saneringsmaatregelen in plaats van de onbewoonbaarheid van de woning).

### 1.2. DOELSTELLING

Het doel van dit rapport is de richt- en interventiewaarden die zijn opgenomen in het Besluit van de Vlaamse

Regering van 11 juni 2004 houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico's door verontreiniging van het binnenmilieu" Belgisch Staatsblad 19/10/2004 te herzien voor de fysieke parameters temperatuur, relatieve vochtigheid, tocht, ventilatievoud en de chemische parameter CO<sub>2</sub> in overeenstemming met de huidige wetenschappelijke stand wat betreft gezondheidseffecten en comfortervaringen van die parameters.

Het literatuuronderzoek naar de geselecteerde parameters is uitgevoerd met behulp van de beschikbare wetenschappelijke peer-reviewed publicatiezoekmachines zoals [www.webofknowledge.com](http://www.webofknowledge.com), [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), en [www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed). Het zoeken naar de relevante wetenschappelijke publicaties werd uitgevoerd met behulp van relevante trefwoorden (bijvoorbeeld "naam van de parameter", "binnenlucht", "comfort" en enz.). Indien deze beschikbaar waren, werden enkel gepubliceerde werken van de afgelopen 10 jaar als relevant beschouwd voor dit rapport.

De voorgestelde waarden worden geëvalueerd aan de hand van bestaande internationale normen en richtlijnen, gepubliceerd door:

- Internationale Organisatie voor Standaardisatie (ISO) ([www.iso.org](http://www.iso.org)) - De ISO is een internationale instelling bestaande uit vertegenwoordigers van verschillende nationale organisaties voor standaardisatie. ISO is een onafhankelijke, niet-gouvernementele organisatie waarvan de leden de organisaties voor standaardisatie uit 163 lidstaten zijn. Het is 's werelds grootste ontwikkelaar van vrijwillige internationale normen en vergemakkelijkt de wereldhandel door gemeenschappelijke normen te verschaffen tussen de naties. De organisatie voorziet vereisten, specificaties, richtlijnen of karakteristieken die consistent gebruikt moeten worden om te garanderen dat materialen, producten, processen en diensten voldoen aan hun doel. ISO staat zelf niet in voor het respecteren van de standaarden, daarvoor bestaan externe certificeringsorganen.
- ASTM International (ASTM) (<http://www.astm.org/>) - ASTM is een internationale organisatie voor normalisatie, die vrijwillig een consensus van technische normen ontwikkelt en publiceert voor een breed scala aan materialen, producten, systemen en diensten. ASTM International heeft geen rol in het naleven of handhaven van zijn normen. De normen kunnen echter verplicht worden wanneer ze worden opgelegd door een extern contract, bedrijf of overheid.

- Het Europees Comité voor Normalisatie (CEN) (<http://www.cen.eu/>) - CEN is een openbare organisatie voor normalisatie, die een efficiënte infrastructuur biedt aan belanghebbende partijen voor de ontwikkeling, het onderhoud en de distributie van samenhangende sets van normen en specificaties. De normalisatie-instellingen van de 30 nationale leden vertegenwoordigen de 27 lidstaten van de Europese Unie.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) (<http://www.ashrae.org/>) - ASHRAE publiceert een reeks standaarden en richtlijnen met betrekking tot HVAC-systemen en -problemen, die vaak worden vermeld in bouwcodes. De standaarden en richtlijnen worden gebruikt door consultancy engineers, aannemers, architecten en overheidsinstanties. Deze normen worden periodiek geëvalueerd, herzien en opnieuw gepubliceerd.

## CHAPTER 2 PARAMETERS EN WAARDEN

## 2.1. PARAMETERS

De term 'fysische factoren' werd in het Vlaams Binnenmilieubesluit gedefinieerd als 'natuurkundige verschijnselen die potentieel schadelijk zijn voor de gezondheid van de mens door hun akoestische, mechanische, thermische of elektromagnetische eigenschappen, met uitzondering van ioniserende straling' (Hoofdstuk 1; Artikel 1).

Deze definitie omvat een breed spectrum van fysische parameters in een binnen omgeving, d.w.z. temperatuur, relatieve vochtigheid, tocht, akoestiek, trillingen, verlichting enz.

De parameters die verband houden met thermisch comfort (temperatuur, relatieve vochtigheid en tocht) zijn echter de belangrijkste parameters voor de comfortervaring van bewoners op korte termijn.

De fysische parameters opgenomen in en waarvoor het huidige besluit waarden voorziet zijn temperatuur, relatieve vochtigheid, tocht, ventilatievoud en extreem lage frequentie elektromagnetische straling (zie **Fout! Ongeldige bladwijzerverwijzing.**):

*Tabel 1 Besluit van de Vlaamse Regering houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico's door verontreiniging van het binnenmilieu (11 JUNI 2004)*

Stof/Factor	Richtwaarde	Interventiewaarde
ELF - Magnetisch veild	$\leq 0,2 \mu\text{T}$	10 $\mu\text{T}$
Temperatuur (T) - Winter - Zomer	20 °C $\leq$ T < 24 °C 22 °C $\leq$ T < 26 °C	
Tocht - Winter - Zomer	< 0,10 m/s < 0,25 m/s	
Relatieve vochtigheid (RV) - Winter - Zomer	30 % $\leq$ RV < 55 % 30 % $\leq$ RV < 80 %	
Ventilatievoud	$\geq 1/\text{h}$	

Een herziening van de parameter elektromagnetische straling wordt uitgevoerd door het Vlaams Planbureau Omgeving.

Vanuit gezondheidskundig standpunt kan er geen algemene ventilatierichtlijn ontwikkeld worden (HealthVent project <http://www.healthvent.byg.dtu.dk/>). De huidige Belgische voorschriften een minimumventilatie van de woningen op basis van het type en de grootte van de ruimte. De regelgeving van de ventilatiepercentages valt onder het EPB-besluit en zal daarom niet worden herzien in dit rapport.

## 2.2. WAARDEN

### → Richtwaarden

De huidige definitie voor richtwaarde is als volgt: een meetbare grootheid die overeenkomt met een kwaliteitsniveau van het binnenmilieu, dat zoveel mogelijk moet worden bereikt of gehandhaafd;

Het voorstel voor de nieuwe, herziene, definitie van richtwaarde voor binnenmilieu is als volgt: 'richtwaarde: meetbare blootstellingswaarde van een chemische, fysische of biotische factor, die overeenkomt met een kwaliteitsniveau van het binnenmilieu dat zoveel mogelijk moet worden bereikt of gehandhaafd. Voor chemische factoren komt dit kwaliteitsniveau overeen met een blootstellingsniveau dat geen nadelige gezondheidseffecten veroorzaakt'.

De temperatuursomstandigheden waarin overleven mogelijk is voor de mens zijn zeer extreem en komen slechts in uitzonderlijke omstandigheden voor en vallen buiten het kader van dit werk. Temperatuur wordt in het kader van het binnenmilieubesluit dan ook louter beschouwt als een comfortparameter.

Wat betreft de chemische parameters, kunnen er concentratiegrenzen worden gedefinieerd waarboven het negatieve effect op de menselijke gezondheid kan worden verwacht.

Deze concentratiegrenzen gelden voor iedereen. Voor comfortparameters zoals temperatuur, relatieve vochtigheid en tocht kunnen dergelijke grenzen niet worden afgeleid. Het menselijke comfort dat wordt bereikt bij verschillende binnenmilieuomstandigheden is voor elke persoon anders. Het is niet mogelijk om een waarde te stellen die iedereen tevreden zal stellen. In dit voorstel van waardes voor de betreffende comfortparameters kiezen we voor waardes waarbij een zo groot mogelijke groep van mensen tevreden zal zijn.

Voor het opstellen van richtwaardes voor het binnenmilieu wensen we in de eerste plaats een beroep te doen op bestaande gezondheidkundige toetsingswaarden, en worden geen eigen afleidingen uitgevoerd (tenzij er goede argumenten zijn om toch een eigen afleiding uit te voeren). Het betreft dus een 'selectie' en geen 'afleiding' van richtwaardes. Dit leidt enerzijds tot een efficiëntere aanpak dan een volledige nieuwe afleiding, en anderzijds vergroot dit het draagvlak voor geactualiseerde Vlaamse binnenmilieunormen.

### → Interventiewaarden

De huidige definitie voor interventiewaarde is als volgt: 'meetbare grootheid die overeenkomt met een maximaal toelaatbaar risiconiveau, dat behoudens in geval van overmacht, niet mag worden overschreden en bij overschrijding aanleiding geeft tot preventieve actie'.

Het voorstel voor de nieuwe definitie voor interventiewaarde voor binnenmilieu is als volgt: 'de concentratie van een bepaalde parameter in binnenlucht die, indien bereikt of overschreden, een actie vereist omdat dit concentratieniveau een gezondheidsrisico kan inhouden, in het bijzonder voor gevoelige mensen die zich langere tijd in deze ruimte bevinden'.

In geen enkel ander land wordt een definitie zoals deze van 'interventiewaarde' gehanteerd, noch een ander instrument gehanteerd gelijkaardig aan dit laatste artikel van het Vlaams Binnenmilieubesluit. Daarnaast is er ook geen wetenschappelijke of internationale beleidsleidraad die stipuleert hoe een

interventiewaarde (of gelijkaardig – volgens de filosofie van de definitie in hoofdstuk V) dient afgeleid te worden.

Van alle bestaande internationale richtwaarden benadert de Duitse 'Richtwerte II'<sup>1</sup> voor chemische polluenten waarschijnlijk de Vlaamse 'interventiewaarde' het meeste, althans met definitie Hoofdstuk 1, Artikel 1 .10 van 'interventiewaarde'. In het kader van de actualisatie van het binnenmilieubesluit wordt dan ook gekozen om de interventiewaarden voor chemische polluenten af te leiden conform de Duitse 'Richtwerte II', vermits deze een transparante en wetenschappelijke onderbouwing heeft en in lijn ligt met de filosofie van de definitie "interventiewaarde".

---

<sup>1</sup> Richtwerte II uit het Duitse binnenlucht evaluatieschema is gedefinieerd als "een schadelijke effect waarde, gebaseerd op toxicologische en epidemiologische kennis, dewelke meestal afgeleid is op basis van een LOAEC of benchmark concentratie van humane studies of dierproeven. Het is de concentratie die, indien bereikt of overschreden, een directe actie vereist omdat dit concentratieniveau een gezondheidsrisico kan inhouden, in het bijzonder voor gevoelige mensen die zich langere tijd in deze ruimte bevinden". De Duitse Richtwerte II werd op een transparante en wetenschappelijk onderbouwde manier afgeleid.



---

## CHAPTER 3 THERMISCH COMFORT

---

Het thermisch comfort van een binnenmilieu heeft het meeste invloed op het comfortgevoel dat bewoners ervaren in een binnenomgeving. Het is gedefinieerd als 'een toestand waarbij er geen drijvende krachten nodig zijn om het milieu door het gedrag te corrigeren' (Hensen, 1991). Een andere definitie van thermisch comfort, gegeven door de American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), is 'de gemoedstoestand die tevredenheid over de thermische omgeving uitdrukt' (ASHRAE, 2010). Op basis van deze definities kan geconcludeerd worden dat thermisch comfort geen conditie of toestand beschrijft, maar wel een gemoedstoestand. De definitie van thermisch comfort omvat geen omschrijving van wat bedoeld wordt met gemoedstoestand of voldoening, maar benadrukt juist dat het oordeel van comfort een cognitief proces is, dat beïnvloed wordt door fysische, fysiologische, psychologische en andere factoren. Hoewel de ervaring van thermisch comfort verschilt tussen mensen, zelfs in dezelfde omgeving, kunnen de factoren die het thermisch comfort van het individu in een binnenomgeving bepalen of beïnvloeden, beschreven worden als:

- Parameters van de binnenomgeving:
  - Luchttemperatuur en gemiddelde stralingstemperatuur (de gewogen gemiddelde temperatuur van alle blootgestelde oppervlakken in een ruimte.)
  - Luchtverplaatsing en turbulentie-intensiteit
  - Relatieve luchtvochtigheid
- Persoonlijke parameters
  - Kleding isolatie
  - Activiteitsniveau (snelheid van metabolisme)

Momenteel bestaan twee algemene benaderingen voor de definitie van thermisch comfort: (1) de rationele of hittebalansbenadering die informatie uit klimaatkamerstudies gebruikt om zijn theorie te onderbouwen en (2) de adaptieve benadering die gebaseerd is op data verkregen uit veldstudies van mensen tijdens hun normale dagelijkse activiteiten in hun gebruikelijke binnenomgeving (Kwok et al., 2010).

### 3.1. TEMPERATUUR

De meest significante component voor de beoordeling van het comfortniveau in een kamer is de temperatuur. Wanneer mensen naar temperatuur verwijzen, bedoelen ze typisch de luchttemperatuur. De ervaring van het thermisch comfort hangt echter ook af van de vloertemperatuur, de gemiddelde stralingstemperatuur en de verticale gradiënt van de luchttemperatuur.

## 3.1.1. LITERATUUR

## → Warmtebalans-benadering

De warmtebalans-benadering evalueert de algemene thermische toestand van het lichaam, zowel op vlak van comfort, warmte of koude stress a.d.h.v. het analyseren van de warmtebalans van het menselijk lichaam, dat wil zeggen de balans tussen warmteoverdracht en warmteproductie van het lichaam. Een negatieve thermische opslag geeft aan dat de omgeving te koud is, terwijl een positieve thermische opslag aangeeft dat de omgeving te warm is. Om comfortabel te zijn, moet de gemiddelde huidtemperatuur ook binnen bepaalde grenzen liggen en moet het warmteverlies laag zijn. De warmtebalans-benadering wordt vooral gekenmerkt door het Predicted Mean Vote (PMV)-model van Fanger (1970), ontwikkeld op basis van laboratorium- en klimaatkamer experimenten. In deze experimenten hebben 1296 deelnemers gekleed in gestandaardiseerde kledij, gestandaardiseerde activiteiten uitgevoerd, terwijl ze blootgesteld werden aan verschillende thermische omgevingen. Tijdens de studies werd alle deelnemers gevraagd om te registreren hoe warm of koud ze het hadden, met behulp van de zevenpunten ASHRAE thermische waarderingschaal van koud (-3), koel (-2), beetje koel (-1), neutraal (0), beetje warm (1), warm (2), heet (3). Het model combineert de thermoregulatie- en warmtebalanstheorieën, volgens welke het menselijk lichaam fysiologische processen reguleert (bijv. zweten, rillen en de regeling van de bloedstroom naar de huid) om zo een evenwicht te houden tussen de warmteproductie en warmteverlies van het lichaam. Het behoud van deze warmtebalans is de eerste voorwaarde voor het bereiken van een neutraal thermisch gevoel (Charles, 2003). Volgens de warmtebalansbenadering zijn de belangrijkste parameters voor het thermisch comfort van het volledige lichaam:

- **Operatieve temperatuur (OT):** de uniforme temperatuur van een zwarte omgeving (een object dat alle elektromagnetische straling absorbeert die erop valt), waarbij een persoon dezelfde hoeveelheid warmte uitwisselt via straling en convectie als in een echte, niet-uniforme omgeving. Indien het verschil tussen de gemiddelde stralingstemperatuur en de luchttemperatuur  $<4^{\circ}\text{C}$  is, wordt de OT berekend als het gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur.
- **Effectieve temperatuur (ET):** de OT bij een relatieve luchtvochtigheid van 50%, dat hetzelfde warmteverlies veroorzaakt in de werkelijke situatie.
- **Voorspelde Gemiddelde Waardering (Predicted Mean Vote - PMV):** een index die de thermische waardering van een persoon voor een bepaalde combinatie van omgevingsparameters (temperatuur, RV, luchtsnelheid), een gekende kledingweerstand en metabolisme voorspelt. De VGW-index voorspelt de gemiddelde waarde van de thermische sensatie van een grote groep mensen op een ASHRAE 7-punten thermische waarderingschaal.

De PMV-index is gerelateerd aan het onevenwicht tussen de werkelijke warmtestroom van een menselijk lichaam in een bepaalde omgeving en de warmtestroom die nodig is voor een optimaal comfort bij een specifieke activiteit volgens de vergelijking (Djongyang et al, 2010):

$$PMV = [0.303 \times \exp(-0.036M) + 0.028]L = \beta L \quad (1)$$

waar L de thermische belasting van het lichaam is, gedefinieerd als een verschil tussen de interne warmteproductie en het warmteverlies naar de omgeving, voor een persoon met hypothetisch comfortabele waarden van huidlaagtemperatuur en warmteverliezen van gereguleerd zweten op dat activiteitsniveau, M de metabolische snelheid is en  $\beta$  is de gevoeligheidscoëfficiënt is.

Met als doel een model te verkrijgen die de PMV uitdrukt in omgevingsparameters die eenvoudig bepaald kunnen worden, heeft het Instituut voor Milieuonderzoek van de Staatsuniversiteit van Kansas uitgebreid onderzoek verricht naar thermisch comfort bij sedentaire activiteiten. Het resultaat heeft tot de volgende vergelijking geleid (Orosa, 2009):

$$PMV = aT + bP_v - c \quad (2)$$

Waar  $P_v$  de druk van waterdamp in de lucht is en  $T$  de temperatuur. De coëfficiënten  $a$ ,  $b$  en  $c$  zijn tabelcoëfficiënten, afhankelijk van de duurtijd van de activiteit en het geslacht van de persoon. Hoewel het PMV-model een goede voorspelling geeft van de gemiddelde waardering van het thermisch comfort door een grote groep mensen, mag deze alleen gebruikt worden voor waarden tussen -2 en +2 en wanneer de zes belangrijkste parameters tussen het volgende waarden liggen (Bluyssen, 2009):

- Metabolisme: 46 - 232 W/m<sup>2</sup>;
- Thermische weerstand van kleding: 0 - 0.310 m<sup>2</sup> °C/W;
- Luchttemperatuur: 10 ° - 30 °C;
- Gemiddelde stralingstemperatuur: 10 ° - 40 °C;
- Luchtsnelheid: 0 - 1 m/s;
- Gedeeltelijke waterdampdruk: 0 - 2700 Pa.

De PMV-index kan gebruikt worden om te bepalen of een bepaalde thermische omgeving voldoet aan de specifieke comfortcriteria en om voorwaarden te stellen voor verschillende aanvaardbaarheidsniveaus. Door gebruik te maken van de PMV-index, kan berekend worden binnen welke grenzen van omgevingstemperaturen (OT) het thermisch klimaat aanvaardbaar is.

Uit de PMV-index kan ook het 'Voorspelde percentage ontevreden personen' (Predicted Percentage of Dissatisfied People - PPD) berekend worden met de volgende vergelijking:

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (3)$$

De PPD drukt zo het percentage van mensen uit, die meer dan een beetje warm of een beetje koud voelen op de thermische waarderingsschaal. Dit komt overeen met het percentage mensen die klagen over de omgeving.

Omwille van individuele verschillen is het onmogelijk om een thermisch klimaat te creëren waarin iedereen zich goed voelt; er zal immers altijd een percentage ontevreden aanwezigen in de ruimte zijn. Maar toch is het mogelijk om omgevingen te omschrijven die voor een bepaald percentage van de gebruikers aanvaardbaar zijn. Om de voorwaarden voor algemeen aanvaardbaar comfort te definiëren, hebben verschillende beschikbare internationale normen en standaarden, gericht op thermisch comfort in het binnenmilieu, een aanvaardbaar bereik van PMV- en PPD-waarden gedefinieerd, waarin respectievelijk minstens 80% van de bewoners het thermisch comfort aanvaardbaar vindt en 10-15% van de bewoners ontevreden is.

ISO 7730:2005 (ISO, 2015) beschrijft zo bijvoorbeeld drie categorieën van gewenst comfort (Tabel 2). Elke categorie is dan equivalent met een 'voorspeld percentage aan ontevreden personen' (PPD) en aanvaardbaar bereik voor PMV voor het lichaam als geheel.

Tabel 2 Categorieën van thermische omgeving, volgens ISO 7730

Categorie	Thermische toestand van het lichaam (als geheel)	
	PPD, %	PMV
A	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

De EN 15251: 2007 (EN, 2007) definieert vier categorieën, die overeenkomen met deze van ISO 7730, maar enkel van toepassing zijn op mechanisch verwarmde en gekoelde gebouwen (Tabel 3).

Tabel 3 Voorbeelden van aanbevolen categorieën voor het ontwerp van verwarmde en mechanisch gekoelde gebouwen, EN 15251

Categorie	Thermische toestand van het lichaam als geheel	
	PPD, %	PMV
I	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
II	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
III	< 15	-0.7 < PMV < +0.7
IV	> 15	PMV < -0.7; or PMV < +0.7

In EN 15251: 2007 (EN, 2007) wordt een beschrijving van de toepasbaarheid voor elk van de gedefinieerde categorieën (Tabel 4) gegeven

Tabel 4 Beschrijving van de toepasbaarheid van de categorieën zoals gedefinieerd in EN 15251

Categorie	Omschrijving
I	Hoog verwachtingsniveau. Wordt aanbevolen voor ruimten die gebruikt worden door zeer gevoelige en kwetsbare personen met speciale eisen zoals gehandicapten, zieken, zeer jonge kinderen en ouderlingen
II	Normaal verwachtingsniveau. Moet gebruikt worden voor nieuwe gebouwen en renovaties.
III	Een aanvaardbaar, gematigd verwachtingsniveau. Kan worden gebruikt voor bestaande gebouwen.
IV	Waarden buiten bovenstaande criteria van bovenstaande categorieën. Deze categorie is enkel toegestaan voor een beperkt deel van het jaar.

In tegenstelling tot de bovenstaande twee standaarden definieert ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2017) slechts één comfortniveau met een grenswaarde van <10% voor PPD en PMV tussen -0,5 en +0,5 (Tabel 5).

Tabel 5 Acceptabele thermische omgeving voor algemeen comfort, ASHRAE Standard 55

PPD, %	PMV
< 10	-0.5 < PMV < +0.5

Hoewel het PMV-PPD-model eenvoudig en accurate voorspellingen maakt van het thermisch comfortgevoel van gebouwgebruikers met hoofdzakelijk sedentaire werkzaamheden, is de methode niet altijd een goede voorspeller van de eigenlijke thermische sensatie, in het bijzonder in veldstudies. Zo vergeleken Ioannou en Itard (2017) in hun studie de PMV en AMV waarden van 58 wooneenheden in Nederland en rapporteerden ze dat het PMV-PPD-model het thermisch comfort van de huurders in de onderzochte woningen onderschat.

→ **Adaptieve benadering**

De adaptieve benadering is gebaseerd op het biologisch inzicht dat de mens een comfort-zoekend dier is dat, wanneer het de kans krijgt, zal interageren met het milieu om comfort te garanderen (Humphrey en Nicol, 1998).

Het uitgangspunt is hier het adaptieve principe: wanneer er een verandering optreedt die discomfort zou veroorzaken, reageren mensen op een manier zodat hun comfort hersteld wordt. Naar deze reacties wordt verwezen als adaptaties of aanpassingen: ze kunnen alle fysiologische-, psychologische-, sociale-, technologische-, en culturele- of gedragsstrategieën omvatten, die mensen kunnen gebruiken om hun comfort te verzekeren (Bluyssen, 2009). Bovendien wordt ook opgemerkt dat, wanneer de gebouwgebruikers toegestaan wordt om zich aan hun omgeving aan te passen door hun kledij aan te passen, de temperatuur zelf te regelen of het interieur aan te passen, ze omgevingscondities kunnen verdragen die buiten het bereik vallen van wat wordt aanbevolen door 'steady state theorieën' (Humphreys en Nicol, 1998). Om die reden wordt een persoon binnen de adaptieve benadering niet gezien als een passieve ontvanger van zintuiglijke indrukken, maar eerder beschouwd als een actieve deelnemer in een dynamisch evenwicht met de thermische omgeving.

De adaptieve benadering werd afgeleid uit veldstudies met als doel de echte aanvaardbaarheid van de thermische omgeving voor gebouwgebruikers te analyseren. Veldstudies worden door vele auteurs aangemoedigd als aanvulling op laboratoriumexperimenten om betrouwbare informatie te verkrijgen over de werkelijke comfortervaring en relevante (interagerende) parameters. Dergelijke studies laten analyses van andere factoren toe dan deze die in testkamers gesimuleerd kunnen worden, aangezien de testpersonen feedback geven tijdens hun dagelijkse gewoonten, terwijl ze hun dagelijkse kleding dragen en zonder enige bijkomende beperkingen handelen (Djongyang et al., 2010).

Door gebruik te maken van de principes van adaptieve comforttheorie, biedt de adaptieve aanpak een eenvoudige methode om de optimale binnentemperatuur te bepalen (dat wil zeggen de temperatuur waarbij de meeste mensen zich comfortabel voelen: de comforttemperatuur), ook het zogenaamde "Adaptive Control Algorithm" genoemd. Volgens dit algoritme is de optimale binnentemperatuur gerelateerd aan de buitentemperatuur op de locatie. Voor natuurlijk geklimatiseerde gebouwen kan dit verband uitgedrukt worden als:

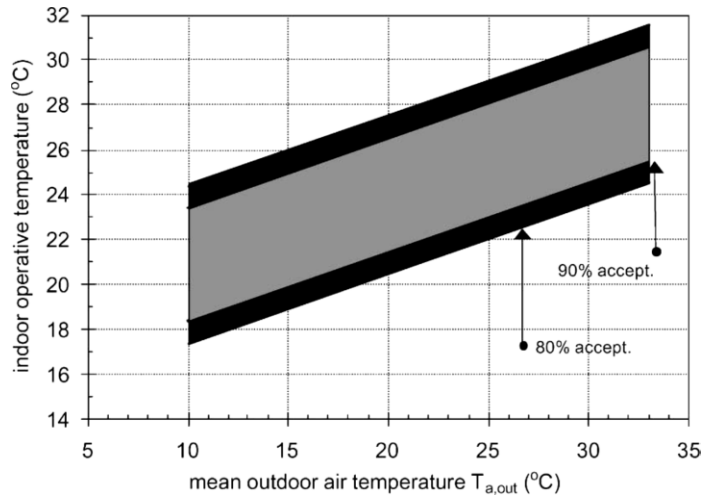
$$T_c = aT_{out} + b \quad (4)$$

waarbij:  $T_c$  de comforttemperatuur is (°C),  $T_{out}$  de buitentemperatuur (°C), en  $a$  en  $b$  constanten zijn (de Dear, 2002; Bluyssen, 2009).

Op basis van informatie uit 21000 reeksen ruwe data van veldstudies, die verzameld werden in de ASHRAE RP-848 database (de Dear et al. 1997), uitgevoerd in verschillende landen over de hele wereld, hebben de Dear en Brager (2002) vervolgens de coëfficiënten bepaald voor de berekening van de optimale comforttemperatuur voor een natuurlijk geventileerd gebouw:

$$T_c = 0.31T_{out} + 17.8 \quad (5)$$

De auteurs bepaalden ook het bereik van temperaturen rond  $T_c$ , die overeenkomen met 90% (d.w.z. wanneer een hoge norm van thermisch comfort gewenst is) en 80% (d.w.z. typische toepassingen of wanneer er geen andere informatie beschikbaar is) thermische aanvaardbaarheid door de gebouwgebruikers (Figuur 2).



Figuur 2 Bereik van de optimale comforttemperatuur voor natuurlijk geventileerde gebouwen, die overeenstemt met 90 en 80% thermische aanvaardbaarheid (aangepast van de Dear, 2002)

Tijdens het Europese SCAT (Smart Controls and Thermal Comfort) project werd een breed scala aan fysische (luchttemperatuur, natteboltemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, luchtcirculatie, CO<sub>2</sub> concentratie, verlichting en geluid) en subjectieve (subjectieve beoordeling van IAQ, comfort en productiviteit) parameters verzameld in 26 binnenomgevingen in Frankrijk, Griekenland, Portugal, Zweden en het Verenigd Koninkrijk op maandelijkse basis gedurende één jaar. Met behulp van de verzamelde data tijdens dit project, hebben Nicol en Humphreys (2007) regressiecoëfficiënten bepaald om de comforttemperatuur te berekenen in de deelnemende landen, die min of meer de algemene klimaatomstandigheden in Europa vertegenwoordigen. De geschatte regressiecoëfficiënten voor natuurlijk geklimatiseerde gebouwen ('free running mode' of gebouwen waarbij geen energieverbruik is voor verwarming of koeling):

$$T_C = 0.33T_{RM} + 18.8 \tag{6}$$

Terwijl voor verwarmde of gekoelde gebouwen geldt:

$$T_C = 0.09T_{RM} + 22.6 \tag{7}$$

In deze regressievergelijkingen tonen de auteurs aan dat thermisch comfort van mensen varieert met een lopend gemiddelde van de buitentemperatuur en niet met een vaste temperatuur. Het gebruik van een dergelijk lopend gemiddelde van de buitentemperatuur ( $T_{RM}$  of 'running mean outdoor temperatuur') in plaats van bijvoorbeeld een maandelijkse gemiddelde temperatuur, houdt dan rekening met het feit dat de mensen volgens de adaptieve theorie reageren op basis van hun thermische ervaring, waarbij de meest recente ervaringen sterker doorwegen dan deze van langer geleden. Dit lopend gemiddelde van de buitentemperatuur is dus een gewogen gemiddelde, waarbij het gewicht van een buitentemperatuur wordt bepaald op basis van hun afstand in het verleden (bijgevolg weegt eergisteren dus minder door dan gisteren, enz.) en wordt berekend aan de hand van de volgende vergelijking:

$$T_{RM(t)} = (1 - \alpha)\{T_{t-1} + \alpha T_{t-2} + \alpha^2 T_{t-3} \dots\} \tag{8}$$

waarbij  $\alpha$  een constante is tussen 0 en 1 (aanbevolen waarde  $\alpha = 0,8$  (Nicol en Humphreys, 2010),  $T_t$  de gemiddelde temperatuur op een tijd  $t$  is in een reeks van gelijke tijdsintervallen (uren, dagen, of maanden, enz.),  $T_{t-n}$  de gemiddelde temperatuur bij  $n$ -tijdsintervallen terug in de tijd. De auteurs

rapporteren dat het model Eq. (6) alleen geldig is voor  $T_{RM} > 10^{\circ}\text{C}$ . Voor  $T_{RM} \leq 10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_c$  is een constante gelijk aan  $22,88^{\circ}\text{C}$  (McCartney en Nicol, 2002).

Nicol en Humphreys (2010) bepaalden ook aanvaardbare afwijkingen op de comforttemperatuur ( $T_c$ ), berekend als een percentage van mensen dat geneigd is om zich ongemakkelijk (oncomfortabel) te gaan voelen. De resultaten bleken vergelijkbaar voor natuurlijk geklimatiseerde gebouwen als voor gebouwen die verwarmd of gekoeld worden. De auteurs merkten op dat in geen enkele situatie 100% comfort ervaren zal worden. Zo bleek 10% van de mensen geneigd om zich ongemakkelijk te gaan voelen bij een afwijking van  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 25% voor  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  en 35% voor  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ . Afwijkingen groter dan  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  moeten volgens de auteurs wel vermeden worden. Deze grenzen worden ook weerspiegeld in de 'categorieën' in de norm EN 15251, waar de categorieën gedefinieerd worden door het type gebouw en door een zekere superioriteit tussen de categorieën. Om opname in een bepaalde categorie te bereiken, mag de OT niet meer dan 3-5% van de bezette uren buiten het gegeven temperatuurbereik vallen. Om opname in een bepaalde categorie te bereiken, mag de binnentemperatuur niet meer dan 3-5% van de bezette uren buiten het gegeven temperatuurbereik vallen (Nicol en Humphreys, 2010).

In een studie gepubliceerd door Rijal et al. (2009) werden regressiecoëfficiënten voor 'mixed mode' gebouwen bepaald (dit zijn gebouwen waarbij verwarming aanwezig is bij koude weerscondities, en koeling bij warm weer, maar waar ook periodes zijn waarbij comfortabele binnen condities bereikt worden zonder gebruik van energie voor verwarming of koeling) in Griekenland en het Verenigd Koninkrijk, terwijl ze werkten in een free-running mode (zonder gebruik van energie voor verwarming of koeling) De regressiecoëfficiënten uit deze studie worden beschreven in volgende vergelijking:

$$T_C = 0.308T_{RM} + 18.1 \quad (9)$$

In de meest recente studie (Barbadilla-Martín et al. 2017) werden regressiecoëfficiënten bepaald op basis van een dataset uit 'mixed-mode' gebouwen in Spanje, gedurende een periode van één jaar. De bestudeerde gebouwen wisselden tussen natuurlijke ventilatie modus en een geconditioneerde modus en een verwarmde modus. Tijdens de meetperiode hebben de gebouwgebruikers alle drie deze condities ervaren. Het regressiemodel voor het schatten van de comforttemperatuur op deze studie wordt in de volgende vergelijking weergegeven:

$$T_C = 0.24T_{RM} + 19.3 \quad (10)$$

### 3.1.2. VOORSTEL VOOR HET VLAAMS BINNENMILIEUBESLUIT

Op basis van voorgaand overzicht kan besloten worden dat het PMV-PPD-model eenvoudige en accurate voorspellingen maakt van het thermisch comfort van (hoofdzakelijk) sedentaire gebouwgebruikers, maar dat het niet altijd een goede voorspeller is van het thermisch comfort in de praktijk, zoals in natuurlijk geventileerde of 'mixed-mode' gebouwen die bij ons frequent voorkomen. Ook is gebleken dat de adaptieve modellen duidelijk aantonen dat de thermische comfortervaring van gebouwgebruikers varieert met een lopend gemiddelde van de buitentemperatuur, en niet met een vaste temperatuur.

Daarom wordt de adaptieve benadering meer frequent gebruikt en gerefereerd, zelfs in de meest recente studies naar thermisch comfort. De benadering is niet enkel gebaseerd op resultaten uit

veldstudies, de veldstudies zijn ook veelal uitgevoerd in Europa en sluiten dus goed aan bij onze realiteit.

Om de comforttemperatuur voor het binnenmilieu in Vlaanderen te bepalen, wordt daarom rekening gehouden met de maandelijkse gemiddelde buitentemperatuur van de voorbije jaren ((periode 2009-2016, gemeten in Antwerpen). Deze berekening wordt gedetailleerd beschreven in Annex A en resulteert in een comforttemperatuur van 22°C voor de koude jaarhelft en 24°C voor de warme jaarhelft.

In een volgende stap wordt dan volgens Nicol en Humphreys (2010) de aanvaardbare afwijking op de comforttemperatuur ( $T_c$ ) berekend als een percentage van mensen dat geneigd is om zich ontevreden(oncomfortabel) te gaan voelen. Voor het Vlaams Binnenmilieubesluit wordt gekozen om berekenddeze aanvaardbare bandbreedte van de optimale temperatuur vast te leggen op  $\pm 2^\circ\text{C}$ , hetwelk impliceert dat minder dan 10% van de gebouwgebruikers de neiging heeft om discomfort te ervaren. Rekening houdend met deze bandbreedte van aanvaardbare afwijking op de comforttemperaturen voor het binnenmilieu, worden seizoensgebonden comforttemperaturen zoals getoond in Tabel 6 voorgesteld:

Tabel 6 Voorgestelde comforttemperaturen en aanvaardbaar bereik

Seizoen	Aanvaardbaar bereik van de comforttemperatuur
Koude jaarhelft	$20^\circ\text{C} \leq T < 24^\circ\text{C}$
Warme jaarhelft	$22^\circ\text{C} \leq T < 26^\circ\text{C}$

<sup>1</sup>Koude jaarhelft: dit zijn de maanden met een gemiddelde buitentemperatuur onder  $10^\circ\text{C}$

<sup>2</sup>Warme jaarhelft: dit zijn de maanden met een gemiddelde buitentemperatuur hoger dan  $15^\circ\text{C}$ .

### 3.1.3. AFTOETSING VAN DEZE COMFORTTEMPERATUREN TEN OPZICHTE VAN BESTAANDE RICHTLIJNEN EN STANDAARDEN

Een overzicht van de bestaande comforttemperatuur ranges in de gepubliceerde internationale normen en richtlijnen, en de aftoetsing van de voorgestelde temperaturen in Tabel 6 worden in de volgende paragrafen weergegeven.

→ **ISO 7730: 2005 "Ergonomie van de thermische omgevingen - Analytische bepaling en interpretatie van thermisch comfort met berekening van PMV- en PPD-indexen en lokale comfortcriteria" (ISO, 2015).**

ISO 7730: 2005 geeft een voorbeeld van ontwerpcriteria voor verschillende soorten gebouwen/ruimtes om een optimale thermische omgeving te verkrijgen (Tabel 7), gebaseerd op typische activiteitsniveaus, en aangepast voor het dragen van kleding met een isolatiewaarde van 0,5 clo tijdens de zomer (koelingsseizoen) en 1,0 clo tijdens winter (verwarmingsseizoen).

Alle waarden zijn afgeleid op basis van voorgedefinieerde voorwaarden voor elke categorie van thermische omgeving (zie Tabel 2).

Voorgestelde comforttemperaturen en het aanvaardbare aanvaardbaar bereik dat voorgesteld werd voor het Vlaams Binnenmilieubesluit, valt binnen de operationele temperaturen die voorgesteld worden in deze norm.



Tabel 7 Voorbeeld ontwerpcriteria voor ruimten in verschillende soorten gebouwen (ISO 7730: 2005)

Soort gebouw/ruimte	Activiteit, W/m <sup>2</sup>	Categorie	Operatieve temperatuur, °C	
			Zomer (koelingsseizoen)	Winter (verwarmingsseizoen)
Kantoor Landschapsbureau Vergaderruimte Auditorium Cafetaria/restaurant Klas	70	A	24.5 ± 1.0	22.0 ± 1.0
		B	24.5 ± 1.5	22.0 ± 2.0
		C	24.5 ± 2.5	22.0 ± 3.0
Kleuterklas	81	A	23.5 ± 1.0	20.0 ± 1.0
		B	23.5 ± 2.0	22.0 ± 2.5
		C	23.5 ± 2.5	22.0 ± 3.5
Warenhuis	93	A	23.0 ± 1.0	19.0 ± 1.5
		B	23.0 ± 2.0	19.0 ± 3.0
		C	23.0 ± 3.0	19.0 ± 4.0

→ EN 15251: 2007 "Binnenomgevings-invoerparameters voor ontwerp en beoordeling van de energieprestaties van gebouwen betreffende de binnenluchtkwaliteit, thermische omgeving, verlichting en akoestiek" (EN 15251, 2007).

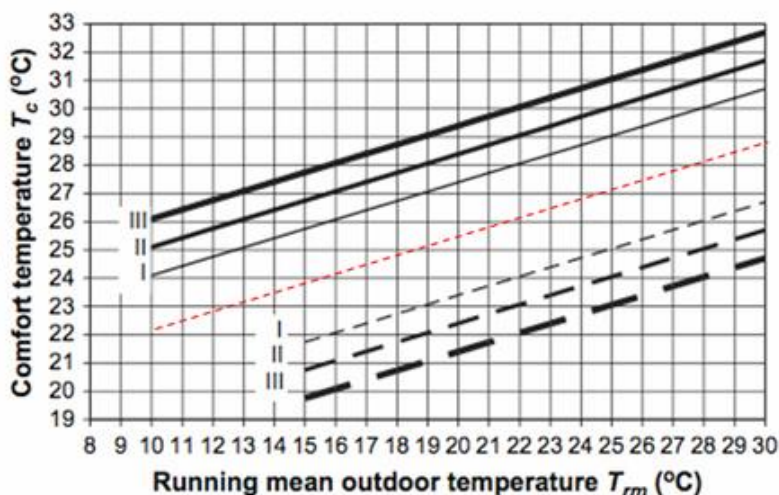
Rekening houdend met de criteria zoals opgelijst in Tabel 3 voor elke categorie van binnenomgeving, beveelt de standaard operatieve temperaturen aan voor het ontwerp van gebouwen en HVAC-systemen (Tabel 8); ook hier wordt rekening gehouden met de isolatiewaarde van kledij.

Tabel 8 Aanbevolen ontwerpwaarden van de binnentemperaturen voor het ontwerp van gebouwen en HVAC-systemen.

Type gebouw/ruimte	Categorie	Operatieve temperatuur °C	
		Minimum verwarming (winterseizoen), ~ 1.0 clo	Maximum koeling (zomerseizoen), ~ 0.5 clo
Woongebouwen: woonruimten (slaapkamers, salon, keuken etc.) Sedentair ~ 1,2 met	I	21.0	25.5
	II	20.0	26.0
	III	18.0	27.0
Woongebouwen: andere ruimtes (opslagplaatsen, inkomhal, enz.) Staan-rondwandelen ~ 1,6 met	I	18.0	
	II	16.0	
	III	14.0	
Bureau (kantoor), Landschapsbureau (open kantoor), Vergaderzaal, Auditorium, Cafetaria / Restaurant, Klaslokaal Sedentair ~ 1,2 met	I	21.0	25.5
	II	20.0	26.0
	III	19.0	27.0
Kleuterschool Staan-rondwandelen ~ 1.4 met	I	19.0	24.5
	II	17.5	25.5
	III	16.5	26.0
Warenhuis Staan-rondwandelen ~ 1.6 met	I	17.5	24.0
	II	16.0	25.0
	III	15.0	26.0

Een vergelijking tussen de in dit rapport voorgestelde comforttemperatuurbereiken (Tabel 6) en de aanbevolen operationele temperatuurbereiken voor gebouwen met HVAC-systemen toont aan dat de voorgestelde comforttemperaturen voldoen aan de aanbevelingen voor categorie II en III van het gewenste comfort, dat wil zeggen het normale verwachtingsniveau van toepassing op nieuwe gebouwen en renovaties (categorie II) en een bescheiden verwachtingsniveau dat van toepassing is op bestaande gebouwen (categorie III)

De standaard definieert ook de aanvaardbare binnentemperaturen die overeenstemmen met de buitentemperaturen voor gebouwen zonder mechanische koelsystemen met behulp van de adaptieve benadering. De aanbevolen operationele temperatuur wordt berekend met behulp van Vgl. (6) hierboven vermeld. De boven- en onderlimieten van de aanvaardbare werkingstemperatuur voor elke categorie worden bepaald door het toevoegen van specifieke coëfficiënten aan de gedefinieerde optimale operationele temperatuur. De norm definieert een coëfficiënt van respectievelijk  $\pm 2$ ,  $\pm 3$  en  $\pm 4$  voor categorie I, II en III van het gewenste thermische comfort (Tabel 4). Figuur 3 toont een grafische weergave van de aanvaardbare operationele temperatuurgrenzen voor gebouwen zonder mechanische koelsystemen voor  $T_{RM}$  tussen  $10^{\circ}\text{C}$  en  $30^{\circ}\text{C}$ .



Figuur 3 Ontwerpwaarden van de bedrijfstemperatuur in gebouwen zonder mechanische koelsystemen (EN 15251: 2007)

De aanvaardbare operationele temperatuurlimieten voor elke categorie met behulp van de methode gemiddelde buitentemperatuur van de voorbije jaren (periode 2009-2016), voor koude en warme jaarhelft gemeten in Antwerpen (vermeld in BIJLAGE A) zijn berekend en vermeld in Tabel 9.

Tabel 9 Operationele temperatuurlimieten voor gebouwen zonder mechanische koeling volgens de vereisten van EN 15251:2007 gebruik maandelijks gemiddelde buitentemperatuur van de voorbije jaren (periode 2009-2016), gemeten in Antwerpen.

	Categorie	Operatieve temperatuur °C	
		Onderwaarde	Bovenwaarde
Koude jaarhelft	I	21	25
	II	20	26
	III	19	27
Warme jaarhelft	I	22	26
	II	21	27

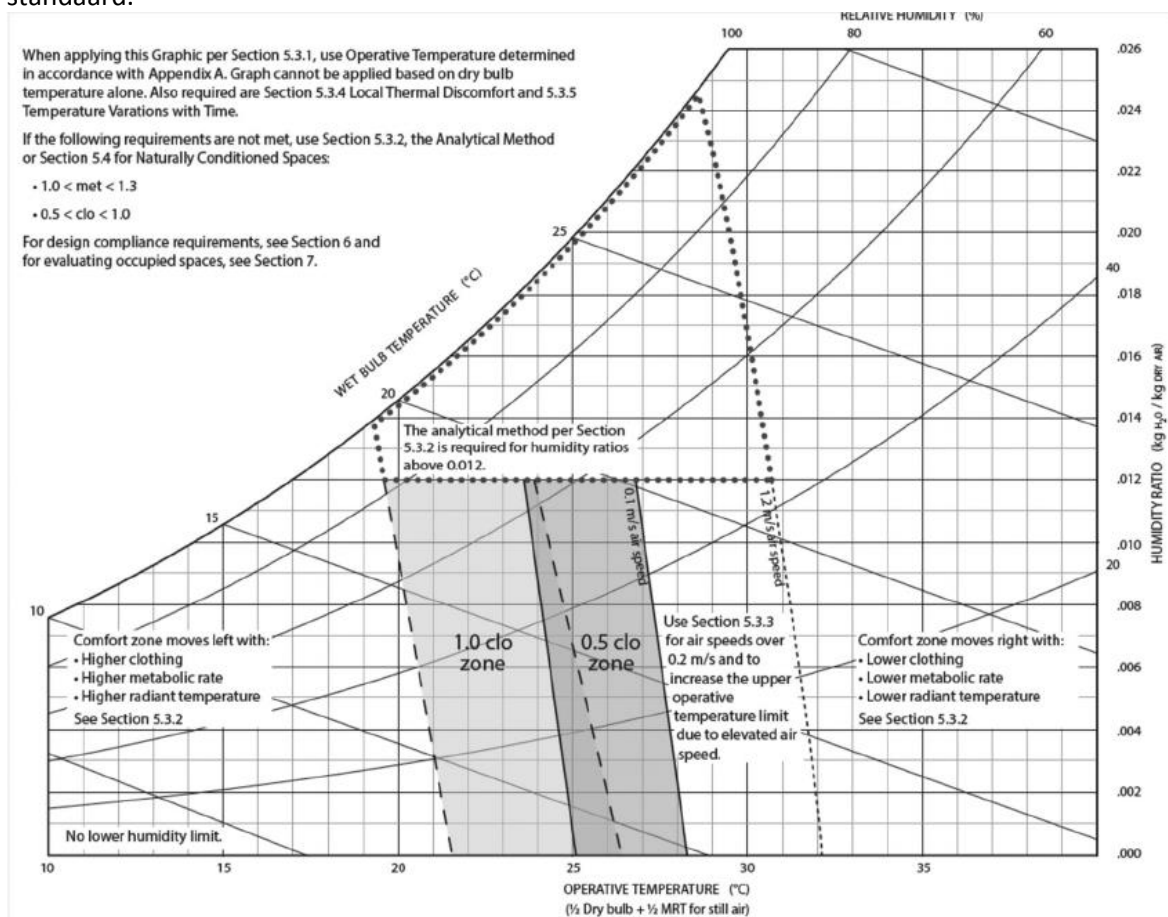
	III	20	28
--	-----	----	----

Een vergelijking tussen de in dit rapport voorgestelde comforttemperatuurbereiken (Tabel 6) en de aanbevolen operatieve temperatuurbereiken voor gebouwen zonder mechanische koelsystemen toont aan dat de voorgestelde comforttemperatuurbereiken voldoen aan de aanbevelingen voor categorie II en III van het gewenste comfort, dwz het normale verwachtingsniveau van toepassing op nieuwe gebouwen en renovaties (categorie II) en een bescheiden verwachtingsniveau dat van toepassing is op bestaande gebouwen (categorie III)

→ **ASHRAE Standard 55 - 2017 "Thermische omgevingscondities voor menselijk gebouwgebruik" (ASHRAE, 2017)**

In ASHRAE Standard 55 wordt de comfortzone tijdens gebouwgebruik berekend aan de hand van de criteria opgelijst in Tabel 5 voor gegeven luchttemperaturen (tussen 19,6 en 27,4 °C), relatieve vochtigheid (tussen 13 en 86%), luchtsnelheid (<0,20 m/s), metabolische snelheid (tussen 1,0 en 1,3 met), en kledingisolatie (0,5 clo zomerseizoen en 1,0 clo winterseizoen). Een grafische weergave van het aanvaardbare bereik van bedrijfstemperatuur voor gegeven RV, luchtsnelheid, metabolische snelheid en kledingisolatie is weergegeven in Figuur 4

Een vergelijking tussen de in dit rapport voorgestelde comforttemperatuurbereiken voor koude en warme seizoenen (Tabel 6) en het aanvaardbare bereik gedefinieerd door ASHRAE 55 (Figuur 4) toonde aan dat de voorgestelde comforttemperaturen overeenkomen met die in de ASHRAE 55-standaard.

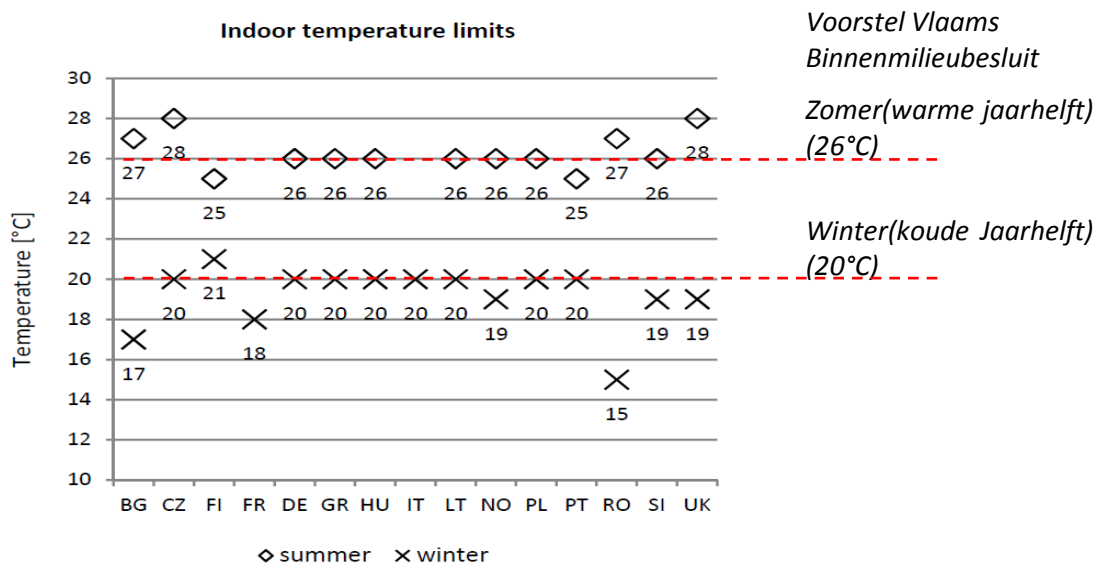


Figuur 4 Grafische weergave van het aanvaardbare bereik van de operationele temperatuur en vochtigheid voor werkruimten (ASHRAE, 2017).

→ **Vergelijking met de binnentemperatuurgrenswaarden in andere Europese landen**

De volgende grafiek (Figuur 5) geeft een overzicht van de grenswaarden voor de binnentemperatuur uit de geldende regelgeving van een selectie van Europese landen voor de zomer- en winterperiode (Breliah, 2011).

De rode stippellijnen duiden de laagste ondergrens (koude jaarhelft) en de hoogste bovengrens (warme jaarhelft) van het voorstel voor het Vlaams Binnenmilieubesluit aan (sectie 3.1.2) en tonen zo aan dat de temperaturen uit het Vlaams Binnenmilieubesluit sterk in lijn zijn met deze uit andere EU landen.



Figuur 5 Binnenhuistemperatuur-grenswaarden van uit een selectie van EU landen (Breliah, 2011)

**3.2. RELATIEVE VOCHTIGHEID**

Vochtigheid is de hoeveelheid waterdamp die in de lucht aanwezig is. De vochtigheid wordt typisch uitgedrukt op twee verschillende manieren:

- (1) Absolute vochtigheid (AH) - gedefinieerd als de hoeveelheid water in een deelvolumen lucht, uitgedrukt in gram per kubieke meter (g/m<sup>3</sup>); en
- (2) Relatieve vochtigheid (RH) - gedefinieerd als de verhouding van de gedeeltelijke druk van waterdamp in een gasvormig mengsel van lucht en waterdamp tot de verzadigde dampdruk van water bij een bepaalde temperatuur, uitgedrukt in percentage (%).

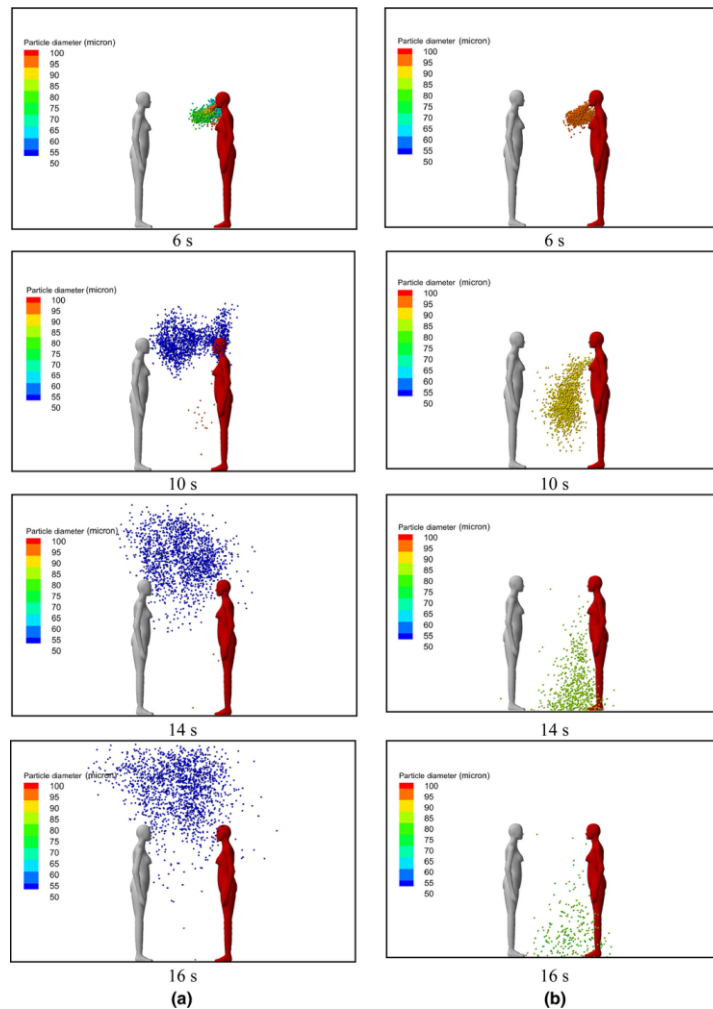
**3.2.1. LITERATUUR**

De waterdamp in de binnenomgeving wordt normaal gesproken niet beschouwd als oorzaak van gezondheidsproblemen. Een bepaald niveau van vochtigheid in de lucht is immers nodig voor comfort. Aan de andere kant heeft de relatieve luchtvochtigheid van binnenomgevingen (binnen een

range van binnentemperaturen tussen 19 tot 27°C) zowel directe als indirecte effecten op gezondheid en het comfort.

Directe effecten verwijzen meestal naar de impact van relatieve luchtvochtigheid op fysiologische processen, b.v. verstoren van de traanfilm, verlies van huidvocht, verstoring van de luchtwegslijmvliezen. Zo rapporteerde Wyon et al. (2002) een toenemend gevoel van droge ogen, oogirritatie en droge huid bij een vermindering van de vochtigheid vanaf 35% RV. Sunwoo et al (2006) constateerde dat de huid (metingen van het vochtgehalte van de huid), ongeacht de leeftijd van de onderzoekspopulatie, droog wordt bij een luchtvochtigheid binnen lager dan 30%. Guggenbichler et al. (2007) rapporteerde dat om de filterende functie van de luchtwegen te behouden een luchtvochtigheid van ten minste 30%, beter zelfs 45%, vereist is.

Indirecte effecten komen voort uit de impact van vochtigheid op pathogene organismen of chemicaliën (Arundel et al., 1986). Zo wordt in een studie gepubliceerd door Liu et al. (2016) geconcludeerd dat de uitgedemde druppels voldoende fijne druppelkernen vormen om gedurende een aanzienlijke tijdsperiode in een relatief droge omgeving (bijv. 35% RH bij 23°C) in suspensie te blijven, terwijl de druppel 10 keer langzamer zal evaporeren en sneller dalen in vochtige lucht (bijv. 95% RV bij 23°C), wat de overbrenging van bepaalde respiratoire virussen kan beïnvloeden. Figuur 6 (uit Lui et al. 2016) illustreert deze vaststelling door middel van een computer gesimuleerde dispersie van grote uitgedemde druppels bij (a) lage en (b) hoge relatieve luchtvochtigheid.



Figuur 6 Computer gesimuleerde dispersie van grote uitgedemde druppels (initiële grootte  $100\ \mu\text{m}$  diameter) door normale ademhaling in een geventileerde kamer met een lage RV (35%) (a) en een hoge (95%) (b) RV, uit Lui et al (2016)

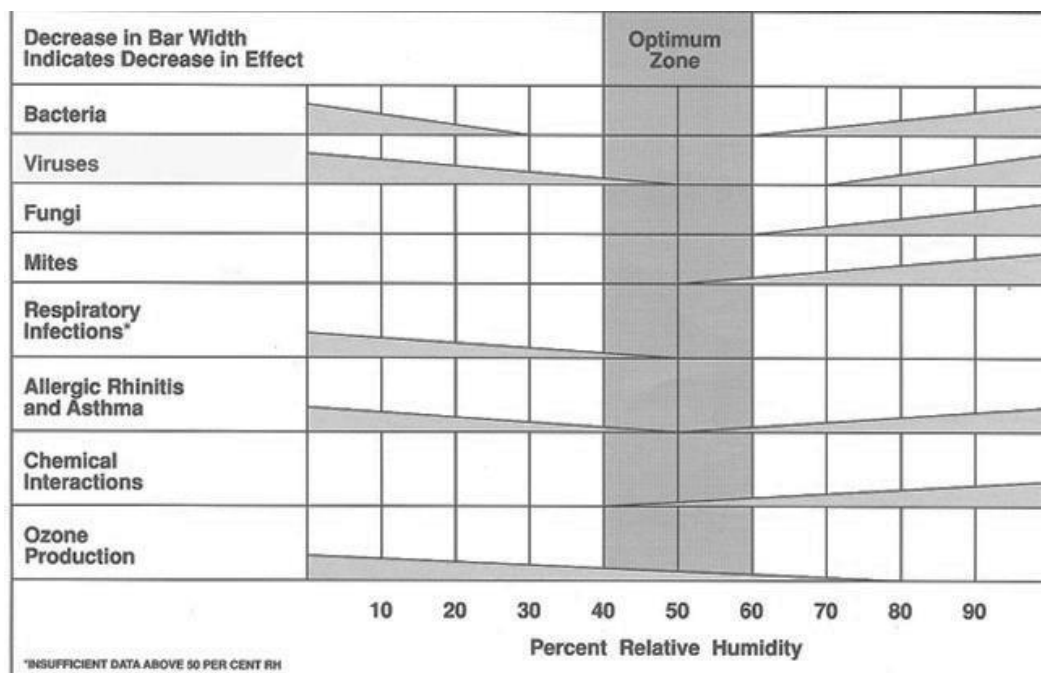
Hogere luchtvochtigheid binnenshuis kan echter ook de gezondheid en het comfort van de mens beïnvloeden. Verschillende studies bijvoorbeeld, rapporteren ook een toename van chemische en sensorische emissies (bijv. van formaldehyde) uit bouwmaterialen (zoals acrylvernisverf of wandverf) bij een hogere RV (hoger dan 60%) (Fang et al., 1999; Wolkoff et al., 2007, Zhou et al., 2017). Langdurige blootstelling aan lage formaldehyde-concentraties kunnen nadelige gezondheidseffecten veroorzaken, zoals huidirritaties, oog- en ademhalingsstoornissen en allergieën (McGwin et al, 2011). Bovendien worden hogere RV-niveaus ook gerelateerd aan een toename van schimmel- en bacteriegroei (Dannemiller et al., 2016). Blootstelling aan schimmels kan ook schadelijke gevolgen voor de gezondheid met zich meebrengen, waaronder infecties, overgevoelighedsstoornissen en toxische/irriterende effecten van hun bijproducten. Recent onderzoek, gepubliceerd door Møller et al. (2017), voorgesteld om schimmeligroei binnenshuis te voorkomen, de RV van de binnenoppervlakken moet lager worden gehouden dan 75% ( $12\ \text{g}/\text{m}^3$  bij  $20^\circ\text{C}$ ). De auteurs merkten ook op dat de hydrothermische omstandigheden van de binnenoppervlakken van de gebouwschil afhankelijk zijn van de luchtvochtigheid binnenshuis en de temperatuur van het oppervlak, die ook een complexe functie is van de binnen- en buitentemperatuur, en de constructie van de omhulling zelf (bijv. isolatie). Bij gegeven binnenluchttemperatuur en RV, neemt de binnenoppervlakte RH toe met afname van de temperatuur van het oppervlak. (Tabel 10). Dit effect is significant tijdens koude

perioden van het jaar, waarbij de temperatuur van de binnenoppervlakken verscheidene graden lager kan zijn dan de binnenruimte temperaturen vooral voor niet goed geïsoleerde gebouwen.

Tabel 10 Invloed van de temperatuur op de RV van de binnenoppervlakken bij een binnentemperatuur van 20 °C (Møller et al., 2017)

Binnen RH	Temperatuur op het binnenoppervlak	RV op het binnenoppervlak
60 %	9 °C	100 %
60 %	13 °C	94 %
60 %	17 °C	72 %

Een overzicht van het effect van RV op biologische en chemische factoren in binnenomgevingen (Figuur 7), gepubliceerd door Arundel et al. (1986) stelt dat schadelijke gezondheidseffecten beperkt kunnen worden door RV d tussen 40% en 60% te houden. Tijdens de zomerperiode echter, wanneer de buitentemperaturen boven 15°C zijn, wordt de condensatie op koude oppervlakken verminderd en zijn hogere RV (d.w.z. tot 70%) niveaus aanvaardbaar.



Figuur 7 Optimale relatieve luchtvochtigheid voor het minimaliseren van nadelige gezondheidseffecten (aangepast van Arundel et al., 1986)

Op vlak van thermisch comfort in gebouwen liet de informatie die tijdens het Europese SCAT-project verzameld werd zien dat de luchtvochtigheid zeer kleine en nauwelijks significante correlatie met de comfortscore van gebouwgebruikers vertoont in de bestudeerde opgevingen toont (Nicol en Humphrey 2010).

### 3.2.2. VOORSTEL VOOR HET VLAAMS BINNENMILIEUBESLUIT

Rekening houdend met de beschikbare informatie uit de wetenschappelijke literatuur (opgelist in paragraaf 3.2.1) ligt de optimale RV waarbinnen mogelijk nadelige gezondheidseffecten beperkt zijn tussen 40% en 60%. Een RV hoger dan 40% verlaagt de mobiliteit van bacteriën en virussen,

ademhalingsinfecties en astma-gerelateerde klachten, terwijl een RV lager dan 60% helpt bij het verminderen van allergische reacties (veroorzaakt door schimmelgroei) of irritaties ten gevolge van chemische emissies.

Tijdens de warme periodes, waar de gemiddelde temperatuur van de binnenoppervlakken hoger is en de concentraties van bacteriën en virussen lager zijn (Frankel et al, 2012) kan een aanvaardbare bandbreedte van RV tussen 30% en 70% worden toegelaten.

Tabel 11 Voorgestelde bereik van RH

Seizoen	Relative vochtigheid (RV)
Koude jaarhelft	$40\% \leq RV < 60\%$
Warme jaarhelft	$30\% \leq RV < 70\%$

<sup>1</sup>Koude jaarhelft: dit zijn de maanden met een gemiddelde buiten temperatuur onder 10°C

<sup>2</sup>Warme jaarhelft: dit zijn de maanden met een gemiddelde buiten temperatuur hoger dan 15°C.

### 3.2.3. AFTOETSING VAN DIT VOORSTEL VOOR RELATIEVE VOCHTIGHEID TEN OPZICHTE VAN BESTAANDE RICHTLIJNEN EN STANDAARDEN

In de volgende paragrafen wordt een overzicht gegeven van de bestaande voorstellen voor de range van RV in de internationale normen en richtlijnen.

→ **ISO 7730: 2005 "Ergonomie van de thermische omgevingen - Analytische bepaling en interpretatie van thermisch comfort met berekening van PMV- en PPD-indices en lokale comfortcriteria" (ISO, 2015).**

ISO 7730 adviseert geen acceptabel range voor de vochtigheid. De aanbevolen ontwerpcriteria voor bedrijfstemperatuur (Tabel 7) en maximum gemiddelde luchtcirculatie (Tabel 17), wordt respectievelijk zomer- en winter-relatieve vochtigheid van 60% en 40% gebruikt. De standaard suggereert ook dat bij temperaturen <26 °C en gematigde activiteitsniveaus (< 2 met), de luchtvochtigheid een bescheiden invloed heeft op de thermische sensatie, waardoor bredere vochtigheidsbereiken worden geaccepteerd.

→ **EN 15251: 2007 "Binnenomgevingsinvoerparameters voor het ontwerpen en beoordelen van de energieprestaties van gebouwen betreffende luchtkwaliteit van de binnenlucht, thermische omgeving, verlichting en akoestiek" (EN 15251, 2007).**

EN 15251 adviseert alleen ontwerpcriteria voor de vochtigheid in bezette ruimten indien er bevochtigings- of ontvochtigingssystemen geïnstalleerd zijn. Naast de aanbevolen RV begrenst de standaard de absolute vochtigheid tot 12 g/kg (dit overeenkomt met 60% - 80% RV bij voorgestelde comforttemperatuurlimieten op Tabel 6 (20 - 26°C)).

Tabel 12 Aanbevolen ontwerpcriteria voor de vochtigheid in bezette ruimten wanneer er een bevochtigings/ ontvochtigingsapparaat geïnstalleerd is (EN 15251: 2007)

Type gebouw/ruimte	Categorie	Ontworpen RH voor ontvochtiging, %	Ontworpen RH voor bevochtiging, %
Ruimtes waar de vochtigheidscriteria worden bepaald door menselijke	I	50	30
	II	60	25



bezigting. Bijzondere plaatsen (musea, kerken, enz.) kunnen andere grenzen vereisen	III	70	20
	IV	> 70	< 20

→ ASHRAE Standard 55 - 2017 "Thermische omgevingscondities voor menselijke bezetting" (ASHRAE, 2017)

De ASHRAE Standard 55 heeft de bezettingscomfortzone (Figuur 4) gedefinieerd als een RV tussen 13 en 86%. Naast de aanbevolen RV begrenst de standaard de absolute vochtigheid tot 12 g/kg (dit overeenkomt met 60% - 80% RV bij voorgestelde comforttemperatuurlimieten op Tabel 6 (20 - 26°C)).

### 3.3. TOCHT

Luchtsnelheid wordt gedefinieerd als de snelheid van de luchtbeving op een punt, ongeacht de richting, die uitgedrukt wordt in meter per seconde (m/s) (ASHRAE, 2017). Luchtsnelheid is een belangrijke bepalende factor van thermisch comfort, omdat het de lichaamswarmteoverdracht door convectie en evaporatie aanzienlijk beïnvloedt. Hoe sneller de luchtsnelheid, hoe groter de snelheid van de warmtestroom door zowel convectie als evaporatie.

Een merkbare luchtsnelheid over een bezweet lichaam kan worden beschouwd als een aangenaam, verkoelend briesje. Wanneer de omgevende oppervlaktes en de kamertemperatuur echter ook koel zijn, zal deze luchtsnelheid waarschijnlijk als een frisse tocht beschouwd worden. Ook kunnen zeer trage luchtsnelheden een gevoel van discomfort en duifheid in een kamer veroorzaken (Bluyssen, 2009). Typische subjectieve reacties van gebouwgebruikers op variaties van luchtsnelheid in een ruimte, zoals gerapporteerd door Bradshaw (2006) worden weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 Subjectieve reactie op luchtbeving (Bradshaw, 2006)

Luchtcirculatie, m/s	Reactie van de gebouwgebruiker
0 to 0.05	Klacht over stagnatie
0.05 to 0.25	Algemeen gunstig (luchtuitlaten zijn normaal ontworpen voor 0,25 m/s in bewoonde of gebruikte zones)
0.25 to 0.51	Gewaarwording van luchtsnelheid, maar kan comfortabel zijn, afhankelijk van de bewegende luchttemperatuur en de omstandigheden in de ruimte
0.51 to 1.02	Constante gewaarwording van luchtbeving, maar kan aanvaardbaar zijn (bijv. in sommige fabrieken) als de luchttoevoer fluctuerend is en als de luchttemperatuur en omstandigheden in de ruimte aanvaardbaar zijn
1.02 en meer	Klachten over opwaaiende papieren en haren, en andere irritaties

#### 3.3.1. LITERATUUR

Verschillende studies, gericht op het effect van luchtsnelheid op menselijk thermisch comfort bij verschillende temperaturen, hebben vastgesteld dat bij temperaturen tot 29°C thermisch comfort gecreëerd kan worden bij luchtsnelheden van ongeveer 0,8 m/s (Fanger et al., 1974; Rohles et al., 1974). Toch werd in een recentere studie van Huang et al. (2013), uitgevoerd met 30 proefpersonen (15 mannen en 15 vrouwen) in een gecontroleerde klimaatkamer, besloten dat mensen ook luchtsnelheden hoger dan 0,8 m/s kunnen accepteren om thermisch comfort te behouden. Toch is

er niet voldoende informatie over het evenwicht tussen de positieve comforteffecten en negatieve storing of ergernis (bijv. droge ogen, papieren vliegen in het rond) door hogere lichtsnelheden. Daarom zijn er meer en sterkere bewijzen nodig alvorens besloten kan worden dat een hogere bovengrens voor aanvaardbare lichtsnelheid nodig is. Een maximale lichtsnelheid van 0,8 m/s is dus nog steeds de algemeen aanvaardbare bovengrenswaarde om thermisch comfort te bieden bij temperaturen boven 25°C (Zhu et al, 2015).

In tegenstelling tot het positieve effect van de verhoogde luchtcirculatie op het thermisch comfort bij hogere kamertemperaturen, kan bij lagere luchttemperaturen de lokale koeling van het lichaam door de lichtsnelheid een lokaal thermisch discomfort veroorzaken, zoals tocht.

Om de mate van het ongemak veroorzaakt door tocht te voorspellen, ontwikkelde Melikov (1989) een tocht-risicomodel waarbij het ongemak t.g.v. tocht afhankelijk is van de gemiddelde lichtsnelheid, de turbulentie-intensiteit (gedefinieerd als een verhouding van de standaardafwijking van de lichtsnelheid tot de gemiddelde lichtsnelheid) en de luchttemperatuur. Het voorspelde percentage mensen dat discomfort ervaart ten gevolge van tocht, de zogenaamde Draft Rate (DR), kan dan bepaald worden als:

$$DR = (34 - T_a)(V_o - 0.05)^{0.62}(0.37 \cdot S_o + 3.14) \quad (11)$$

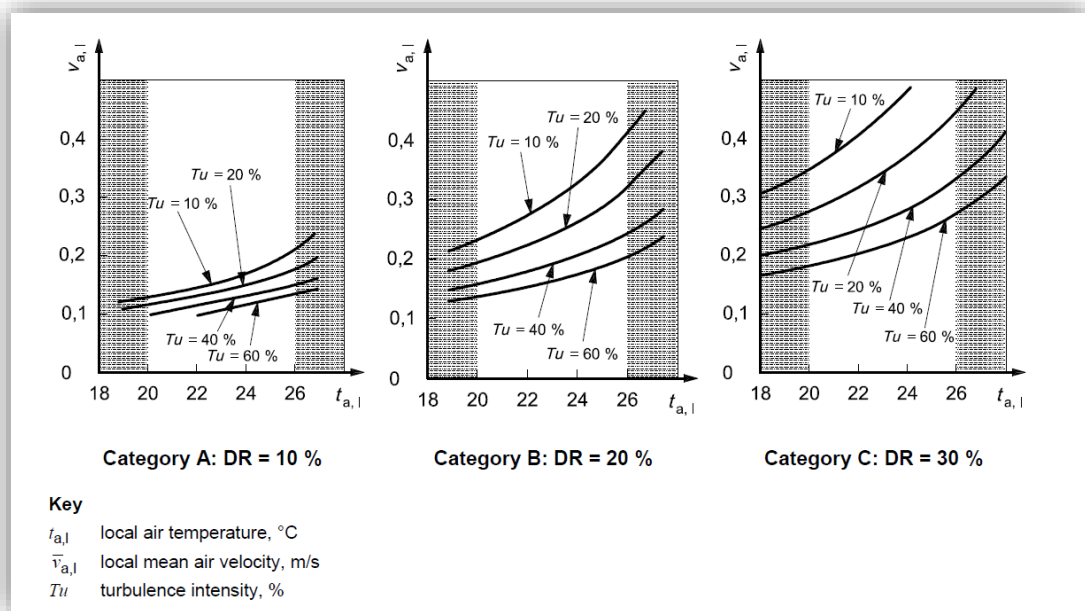
waarbij  $T_a$  de luchttemperatuur is,  $V_o$  de gemiddelde lichtsnelheid ( $\geq 0,05$  m/s) en  $S_o$  de standaardafwijking van de luchtverplaatsing ( $\leq V_o$ ). Indien  $DR > 100\% \rightarrow DR = 100\%$ .

Analoog aan de grenswaarden die vastgelegd werden voor PPD en PMV volgens verschillende aanvaardbaarheids-categorieën voor thermische omgevingen (beschreven in paragraaf 3.1.1), worden in de internationale standaarden ook grenswaarden voor de aanvaardbaarheid van DR gedefinieerd. De grenswaarden van aanvaardbaar lokaal thermisch comfort, gedefinieerd in het DR model voor de verschillende categorieën van thermische omgeving, zoals beschreven in de normen volgens ISO 7730: 2005 (ISO, 2015) en prEN 16798-1:2015 zijn samengevat in Tabel 14.

Tabel 14 Categorieën van thermische omgeving in termen van tocht

Categorie		DR
ISO 7730:2005	prEN 16798-1	
A	I	< 10 %
B	II	< 20 %
C	III	< 30 %

In Figuur 8 worden vervolgens de intervallen van de lokale thermische ongemakparameters voor de drie categorieën van thermisch comfort weergegeven.



Figuur 8 Maximaal toelaatbare gemiddelde luchtsnelheid in functie van lokale luchttemperatuur en turbulentie-intensiteit, ISO 7730: 2005

### 3.3.2. VOORSTEL VOOR HET VLAAMS BINNENMILIEUBESLUIT

Door de voorgestelde reeks van aanvaardbare comforttemperaturen uit paragraaf 3.1.2 toe te passen in vergelijking (11) als  $T_a$ , en de gemiddelde turbulentie-intensiteit dat is de meest frequent gemeten in binnenruimten d.w.z. 40% (Goda, 2014), kan de DR waarde voor elke luchtsnelheid berekend worden. Wanneer er vervolgens voor gekozen wordt om, naar analogie met de comforttemperaturen, een discomfort DR van 10% toe te laten, kan de maximaal aanvaardbare luchtsnelheid voor elke combinatie van luchttemperatuur, turbulentie-intensiteit en DR bepaald worden. Deze informatie wordt getoond in Tabel 15.

Tabel 15 Maximaal aanvaardbare luchtsnelheid voor de aanvaardbare comforttemperaturen voorgesteld in paragraaf 3.1.2, de luchttemperaturen, turbulentie-intensiteit (40%) en DR (10%)

Seizoen	Lucht-temperatuur	Turbulentie-intensiteit	DR	Maximale luchtsnelheid
Koude jaarhalf	20 °C	40 %	10 %	0.15 m/s
	24 °C	40 %	10 %	0.20 m/s
Warme jaarhalf	22 °C	40 %	10 %	0.16 m/s
	26 °C	40 %	10 %	0.25 m/s

<sup>1</sup>Koude jaarhalf: dit zijn de maanden met een gemiddelde buiten temperatuur onder 10°C

<sup>2</sup>Warme jaarhalf: dit zijn de maanden met een gemiddelde buiten temperatuur hoger dan 15°C.

Op basis van Tabel 15, kan besloten worden dat tijdens de koude jaarhalf, de aanvaardbare luchtsnelheid met een maximum van 10% van de gebouwgebruikers die discomfort t.g.v. tocht ervaren, overeenstemt met een luchtsnelheid van 0.15 m/s. Merk op dat hierbij de laagste ondergrens van de aanvaardbare temperaturen gekozen wordt, om voldoende comfort te bieden binnen het gehele temperatuurbereik van deze jaarhalf.

Omdat tijdens de warme jaarhelft (wanneer de operationele temperaturen hoger kunnen zijn dan 25°C) de luchtsnelheid meestal waargenomen wordt als een aangenaam briesje, zijn hogere luchtsnelheden aanvaardbaar. Daarom wordt op basis van Tabel 15, een maximaal aanvaardbare luchtsnelheid van 0.25 m/s voorgesteld. Beide voorstellen voor de maximaal aanvaardbare luchtsnelheden tijdens de warme en koude jaarhelften, worden weergegeven in Tabel 16.

Tabel 16 Voorgestelde grenswaarde voor luchtsnelheid

Jaarhelft	Luchtsnelheid/tocht
Koude jaarhelft	< 0.15 m/s
Warme jaarhelft	< 0.25 m/s

<sup>1</sup>Koude jaarhelft: dit zijn de maanden met een gemiddelde buitentemperatuur onder 10°C

<sup>2</sup>Warme jaarhelft: dit zijn de maanden met een gemiddelde buitentemperatuur hoger dan 15°C.

### 3.3.3. AFTOETSING VAN DEZE GRENSWAARDEN VOOR TOCHT TEN OPZICHTE VAN BESTAANDE RICHTLIJNEN EN STANDAARDEN

→ ISO 7730: 2005 "Ergonomie van de thermische omgevingen - Analytische bepaling en interpretatie van thermisch comfort met berekening van PMV- en PPD-indices en lokale comfortcriteria" (ISO, 2015).

ISO 7730: 2005 geeft een voorbeeld van ontwerpcriteria voor de maximale gemiddelde luchtsnelheid in verschillende types van gebouwen/ruimtes, om zo een optimale thermische omgeving te creëren (Tabel 17) in functie van typische activiteiten-niveaus, voor kleding van 0,5 clo tijdens de zomer ('koeleingsseizoen') en 1,0 clo tijdens de winter ('verwarmingsseizoen') en turbulentie-intensiteit van ongeveer 40% (met zogenaamde 'mixing ventilatie', waarbij koude buitenlucht gemengd wordt met warme binnenlucht).

Tabel 17 Voorbeeld ontwerpcriteria voor ruimten in verschillende soorten gebouwen (ISO 7730: 2005)

Type gebouw/ruimte	Activiteit, W/m <sup>2</sup>	Categorie	Maximale gemiddelde luchtsnelheid*, m/s	
			Zomer (koelingsseizoen)	Winter (verwarmingsseizoen)
Kantoor Landschapsbureau Vergaderruimte Auditorium Cafeteria/restaurant Klaslokaal	70	A	0.12	0.10
		B	0.19	0.16
		C	0.24	0.21
Kleuterklas	81	A	0.11	0.10
		B	0.18	0.15
		C	0.23	0.19
Warenhuis	93	A	0.16	0.13
		B	0.20	0.15
		C	0.23	0.18

\* De maximale gemiddelde luchtsnelheid is gebaseerd op een turbulentie-intensiteit van 40% en de luchttemperatuur gelijk aan de werkende temperatuur van Figuur 8. Een relatieve vochtigheid van 60% en 40% wordt gebruikt voor

respectievelijk zomer en winter. Voor zowel zomer als winter wordt een lagere temperatuur in het bereik gebruikt om de maximale gemiddelde luchtcirculatie te bepalen

Zoals vermeld in de standard, zijn de maximale gemiddelde lichtsnelheden geldig voor de lagere waarden van de voorgestelde operationele temperatuur bereiken voor zomer- en winterperiodes (Tabel 7). De standaard houdt ook rekening met het feit dat bij hogere temperaturen (bijvoorbeeld boven 25 °C) de luchtbeweging kan worden gebruikt om de warmte-sensatie veroorzaakt door verhoogde temperatuur te compenseren. Daarom worden hogere lichtsnelheden tijdens het zomerseizoen geaccepteerd, met een maximale waarde van niet meer dan 0,82 m/s.

→ **prEN 16798-1: 2015 "Energieprestatie van gebouwen - Deel 1: Binnenmilieu-input parameters voor het ontwerp en de beoordeling van energieprestaties van gebouwen betreffende luchtkwaliteit binnenshuis, thermische omgeving, verlichting en akoestiek - Module M1-6**

De prEN 16798-1: 2015 definieert de criteria voor thermische discomfortparameters van de drie categorieën van thermische omgevingen voor het ontwerp van gebouwen en HVAC systemen. Tot vandaag is prEN 16798-1: 2015 nog steeds 'onder goedkeuring', uiteindelijk zal deze standaard EN15251: 2007 vervangen. De maximale lichtsnelheden van elke categorie thermische omgeving, zoals gedefinieerd in prEN 16798-1: 2015 zijn vermeld in Tabel 18.

*Tabel 18 Criteria voor maximale lichtsnelheid voor de drie categorieën voor het ontwerp van gebouwen en HVAC*

Categorie	Maximale lichtsnelheid	
	Winter (koude jaarthelft), m/s	Zomer (warme jaarthelft), m/s
I	0.10	0.12 <sup>b</sup>
II	0.16	0.19 <sup>b</sup>
III	0.21	0.24 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Uitgaande van een activiteitsniveau van 1.2 met een turbulentie-intensiteit van 40% en luchttemperaturen rond 20°C in de winter en 23°C in de zomer

<sup>b</sup> Wanneer de luchttemperatuur hoger ligt dan 25°C, zijn hogere maximale lichtsnelheden toegestaan en genieten vaak zelfs de voorkeur (tocht wordt aangename bries), maar alleen onder de voorwaarde dat de bewoners directe controle hebben over de snelheid van de lucht.

De waarden in de standaardwaarden worden verkregen voor operationele temperaturen van 20 °C in de winter en 23 °C in de zomer. Voor luchttemperaturen boven 25 °C suggereert de standaard dat hogere waarden kunnen worden geaccepteerd.

→ **ASHRAE Standard 55 - 2017 "Thermische milieuomstandigheden voor menselijke activiteiten" (ASHRAE, 2017)**

De ASHRAE Standard 55 heeft de comfortzone voor gebouwgebruik (Figuur 4) gedefinieerd bij een lichtsnelheid < 0,20 m/s. Bovendien, voor temperaturen lager dan 23°C zegt de norm voor de een thermisch comfort tussen  $-0.5 < PMV < +0.5$  (<10% klachten over discomfort, zie Tabel 2), dat een lichtsnelheid van 0,20 m/s niet mag overschreden worden.

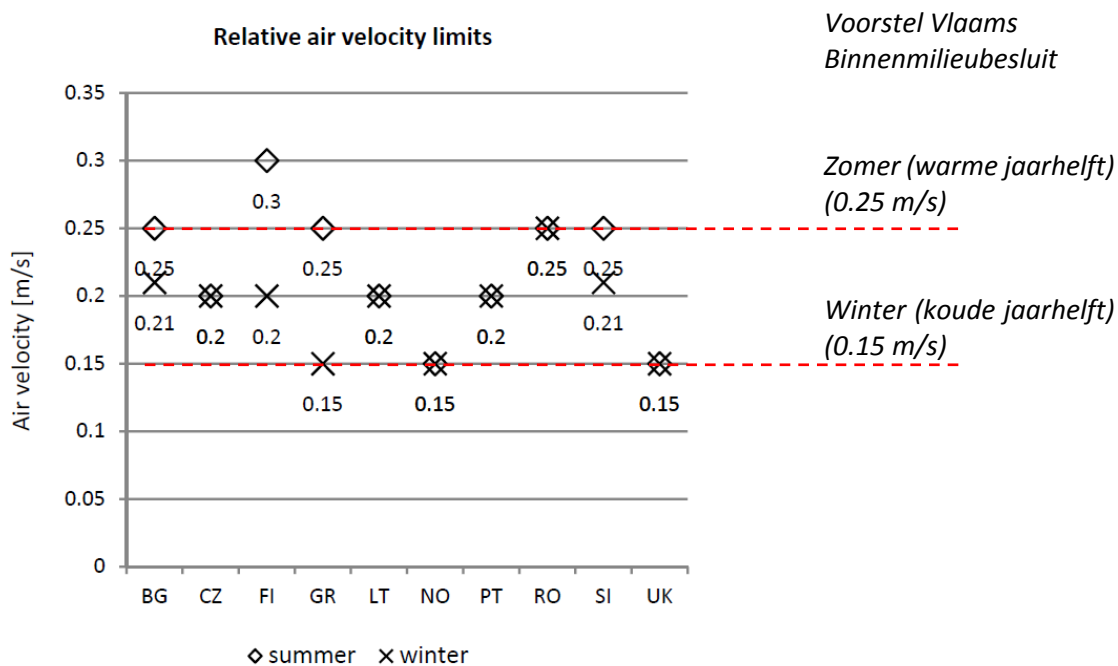
Voor temperaturen boven 25,5 °C houdt de standaard rekening met het feit dat de waarneming van de tocht gelijk is aan bries en hogere niveaus van lichtsnelheid acceptabel zijn. De norm vermeldt een bovengrens van de gemiddelde lichtsnelheid van 0,8 m/s alleen voor de omstandigheden waarin de bezetters geen controle hebben over de lichtsnelheid in de binnenomgeving. In het geval van directe controle over de lichtsnelheid door de inzittenden, beveelt de standaard geen limieten aan voor de lichtsnelheid.

→ **Vergelijking met de luchtsnelheid vereisten uit andere Europese landen**

Figuur 9 toont een overzicht van de vereiste waarden voor luchtsnelheid binnenshuis, welke opgenomen zijn in de regelgeving van de opgesomde Europese landen, respectievelijk voor de zomer- en winterperiode. De rode stippellijnen duiden de vergelijking aan van de luchtsnelheidsvereisten in andere landen, ten opzichte van de advieswaarden die voorgesteld worden voor het Vlaams Binnenmilieubesluit in dit rapport (paragraaf 3.3.2).

De vergelijking toont enerzijds dat, ten opzicht van de vereisten voor de binnentemperatuur, minder EU landen grenswaarden opleggen voor luchtsnelheid in gebouwen. 5 van de 10 landen met vereisten voor luchtsnelheid bevinden zich in Oost-Europa, 2 landen in Noord-Europa en 2 landen in Zuid-Europa. Het Verenigd Koninkrijk sluit, klimaat- en bouwstijlgewijs waarschijnlijk het dichtste aan bij België. De maximaal toelaatbare luchtsnelheid is daar echter 0,15 m/s tijdens het ganse jaar, welke equivalent is voor de Vlaamse BiMi-vereisten tijdens de verwarmingsperiode.

Algemeen kan gesteld worden dat het voorstel voor het Vlaams BiMi-besluit in lijn is met de vereisten van de andere landen, respectievelijk tijdens de winter (koude jaarhelft) - en zomerperiode (warme jaarhelft).



Figuur 9 Relatieve vereisten voor luchtsnelheid in EU-landen (Breliv, 2011)

---

## CHAPTER 4 KOOLSTOFDIOXIDE

---

Verhoogde CO<sub>2</sub>-concentraties worden al jarenlang in verband gebracht met gebouwventilatie en de kwaliteit van de binnenlucht. Discussies over en onderzoek naar CO<sub>2</sub> in relatie tot binnenmilieukwaliteit en ventilatie hebben zich verder ontwikkeld, gericht op de impact van CO<sub>2</sub> op de aanwezigen, hoe CO<sub>2</sub> in de binnenlucht verband houdt met de perceptie van bio-effluenten door aanwezigen, hoe CO<sub>2</sub> gebruikt kan worden om ventilatie te sturen en of CO<sub>2</sub> al dan niet gebruikt kan worden als tracer gas voor het inschatten van het ventilatievoud (Persily, 2015).

### 4.1. LITERATUUR

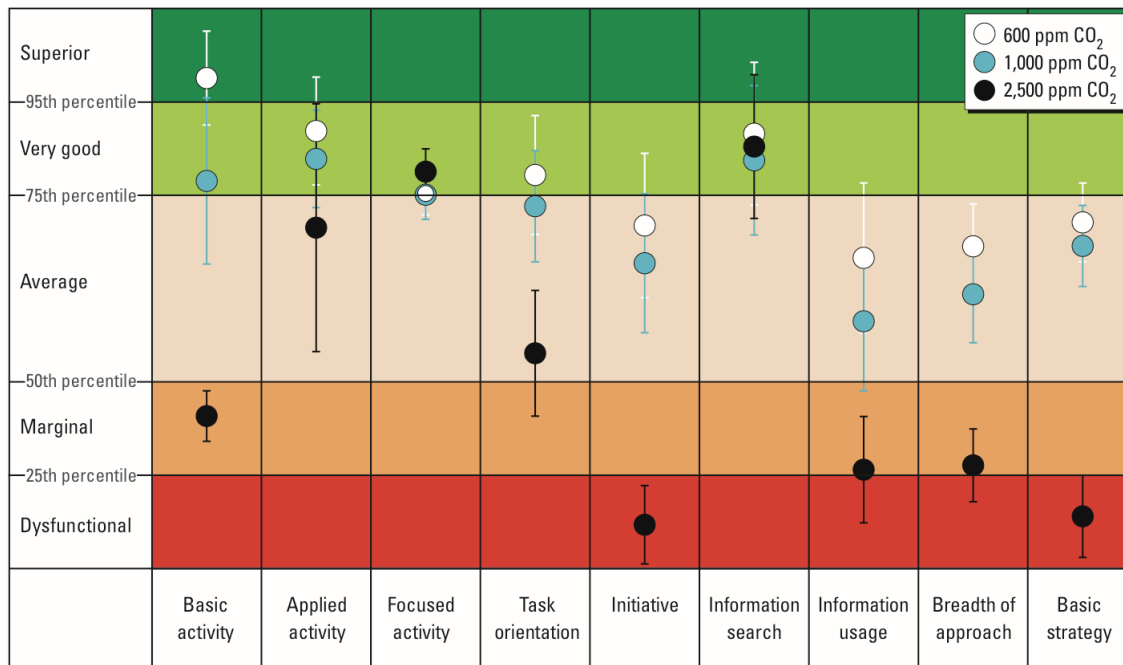
CO<sub>2</sub> is fysiologisch een belangrijk gas dat door het lichaam wordt geproduceerd als gevolg van ons metabolisme. De concentratie van CO<sub>2</sub> in het menselijk lichaam speelt een belangrijke rol bij de regeling van ademhalingsnelheid, aangezien het CO<sub>2</sub>-niveau in het bloed rechtstreeks invloed heeft op de zenuwen in onze hersenen die de ademhalingspijpen stimuleren en activeren. Hoge niveaus van CO<sub>2</sub> komen overeen met hoge niveaus van zuur (lage pH) in het bloed en geven de behoefte voor meer zuurstof aan. De uitwisseling van zuurstof en CO<sub>2</sub> tussen de longblaasjes en het bloed vindt plaats via eenvoudige diffusie, afhankelijk van het concentratieverschil van beide gassen tussen de longblaasjes en het bloed. Daarom kan een te hoge CO<sub>2</sub>-concentratie (d.w.z. > 1%) kan het menselijk lichaam in gevaar brengen doordat de afvoer van CO<sub>2</sub> als afvalproduct stilvalt (Bierwirth, 2014). Vanwege de hoge acuut dodelijke concentratie van CO<sub>2</sub> (90.000 ppm of 9% voor een 5 minuten blootstelling) werd in het verleden aangenomen dat de CO<sub>2</sub>-concentraties in gebouwen (tot 5000 ppm) geen directe invloed hebben op de gezondheid of op de prestaties van de aanwezigen had. Uit recente onderzoeken blijkt echter een duidelijke daling de mogelijkheid om besluiten te nemen, wanneer mensen blootgesteld worden aan relatief lage CO<sub>2</sub>-concentraties (lager dan 5000 ppm) (Satish, 2012; Allen, 2016).

Figuur 10 toont het resultaat van dit onderzoek van Satish (2012). Hierbij werden de prestaties van deelnemers, blootgesteld aan verschillende CO<sub>2</sub>-concentratieniveaus (600 ppm, 1000 ppm, en 2500 ppm) in een kantoor bestudeerd werd, door hen 9 voorgedefinieerde activiteiten te laten uitvoeren. De presentaties voor elke activiteit werd geëvalueerd door middel van een 5-puntsschaal, gaande van 'slecht functionerend' tot 'uitermate goed'. De grenzen tussen de 5 niveaus werden afgeleid van de verdeling van de resultaten binnen een referentiepopulatie van > 20 000 volwassenen van de V.S.A., met leeftijden tussen 16 en 83 jaar, uit voorgaande studies. De auteurs merkten een duidelijke reductie van de mogelijkheid om beslissingen te nemen, bij deelnemers blootgesteld aan 2 500 ppm CO<sub>2</sub> gedurende een periode van 2,5 uur.

In een andere studie uitgevoerd door Zhang et al (2017 a, b), werden zelf-gerapporteerde acute gezondheidssymptomen en de cognitieve prestatie van deelnemers blootgesteld aan pure CO<sub>2</sub>, metabolisch gegenereerde CO<sub>2</sub> en bio-effluenten bestudeerd. De resultaten duiden niet op een significant effect op de waargenomen luchtkwaliteit, acute gezondheidssymptomen, of de cognitieve prestaties tijdens de blootstelling aan pure CO<sub>2</sub> (in concentraties tot 3000 ppm), ten opzichte van een controle groep (die blootgesteld werd aan 500 ppm CO<sub>2</sub>). Blootstelling aan metabolisch gegenereerde CO<sub>2</sub> (als bioeffluent) bij eenzelfde concentratieniveau (3000 ppm) duidde echter wel op een dalende perceptie van de luchtkwaliteit, een toename van klachten over hoofdpijn, en een toegenomen bloeddruk, een significante toename van de hartslag, slaperigheid, slapeloosheid en

moeilijkheden om helder na te denken. Het resultaat van deze studies wijst er dus op dat de schadelijke effecten op de cognitieve presentaties en perceptie van het binnenmilieu eerder veroorzaakt worden door bio-effluenten dan door pure CO<sub>2</sub> bij relatief lage luchtconcentraties in het binnenmilieu (Zhang et al. 2017 a, b).

De resultaten duiden er dus op dat bij niet-industriële concentratieniveaus, CO<sub>2</sub> eerder beschouwd moet worden als een indicator van menselijke bio-effluenten (geuren) dan als een binnenpolluent.



Figuur 10 Impact of CO<sub>2</sub> on human decision-making performance (Satish, 2012)

Indien geen andere grote CO<sub>2</sub> bronnen aanwezig zijn in een binnenmilieu (zoals tabaksrook), zijn de CO<sub>2</sub>-concentraties gerelateerd aan de binnenconcentraties van menselijke bio-effluenten en geurtjes, welke beschouwd worden als ongewenst voor het menselijk comfort binnenshuis. Verschillende studies naar de subjectieve beleving van binnenluchtkwaliteit in functie van menselijke geurtjes, rapporteerden dat om 80% van de mensen die in een kamer binnentreden vanuit een kamer met frisse lucht, tevreden te stellen, de tweede kamer een binnenconcentratie van metabolisch gegenereerde CO<sub>2</sub> (bio-effluenten) tussen 350 en 500 ppm boven de buitenconcentraties mag hebben (wat overeenkomt met een ventilatievoud van 7,5 – 9 L/s per persoon) (Berg-Munch et al. 1983, Wargocki, P. et al 2000).

#### 4.2. VOORSTEL VOOR HET VLAAMS BINNENMILIEUBESLUIT

Rekening houdend met de in paragraaf 4.1, worden fysiologische effecten van menselijke blootstelling aan CO<sub>2</sub> in gebouwen waargenomen bij concentratieniveaus hoger dan 2000 ppm. Echter, uit studies van de perceptie van het binnenmilieu door gebouwgebruikers, blijkt dat 80% van hen het binnenmilieu ervaart als comfortabel bij concentraties tussen 350 – 500 ppm boven de buitenconcentraties van CO<sub>2</sub>. Met andere woorden, de maximale CO<sub>2</sub>-concentratie binnenshuis, waarbij ten minste 80% van de niet-aangepaste mensen de luchtkwaliteit binnenshuis waarnemen



als menselijke bieffluenten (geuren) als comfortabel, wordt gedefinieerd als 500 ppm boven de openlucht CO<sub>2</sub>-concentratieniveaus, gemeten tijdens de bezettingstijd (Tabel 19).

Tabel 19 Voorgestelde grenswaarde voor CO<sub>2</sub> concentratie

	Concentratie niveau boven de buitenconcentraties
KOOLSTOFDIOXIDE	< 500 ppm

#### 4.3. AFTOETSING VAN DEZE GRENSWAARDEN VOOR TOCHT TEN OPZICHTE VAN BESTAANDE RICHTLIJNEN EN STANDAARDEN

In deze paragraaf wordt het voorgestel van een CO<sub>2</sub> concentratie voor het Vlaams Binnenmilieubesluit afgetoetst aan bestaande internationale standaarden en richtlijnen voor CO<sub>2</sub> concentraties voor het binnenmilieu aanbevelen, als een parameter voor een comfortabel binnenmilieu.

→ **EN 15251:2007 “Binnenmilieu-parameters voor het ontwerpen en beoordelen van de energieprestaties van gebouwen betreffende de luchtkwaliteit van binnenlucht, thermische omgeving, verlichting en akoestiek” (EN 15251, 2007).**

De EN 15251 standaard bevat aanbevolen CO<sub>2</sub>-niveaus, die gebruikt worden bij het ontwerpen van mechanisch gestuurde ventilatie. Het maximale ontwerp-ventilatievoud moet overeenkomen met de maximaal toelaatbare CO<sub>2</sub>-concentratie, en de maximale CO<sub>2</sub>-concentratie houdt op zijn beurt rekening met de buitenconcentratie van CO<sub>2</sub>. De aanbevolen luchtconcentraties CO<sub>2</sub> boven de buitenconcentratie worden weergegeven in Tabel 20.

Tabel 20 Aanbevolen CO<sub>2</sub>-concentraties boven de buitenconcentratie voor verschillende categorieën en verwacht percentage ontevreden personen

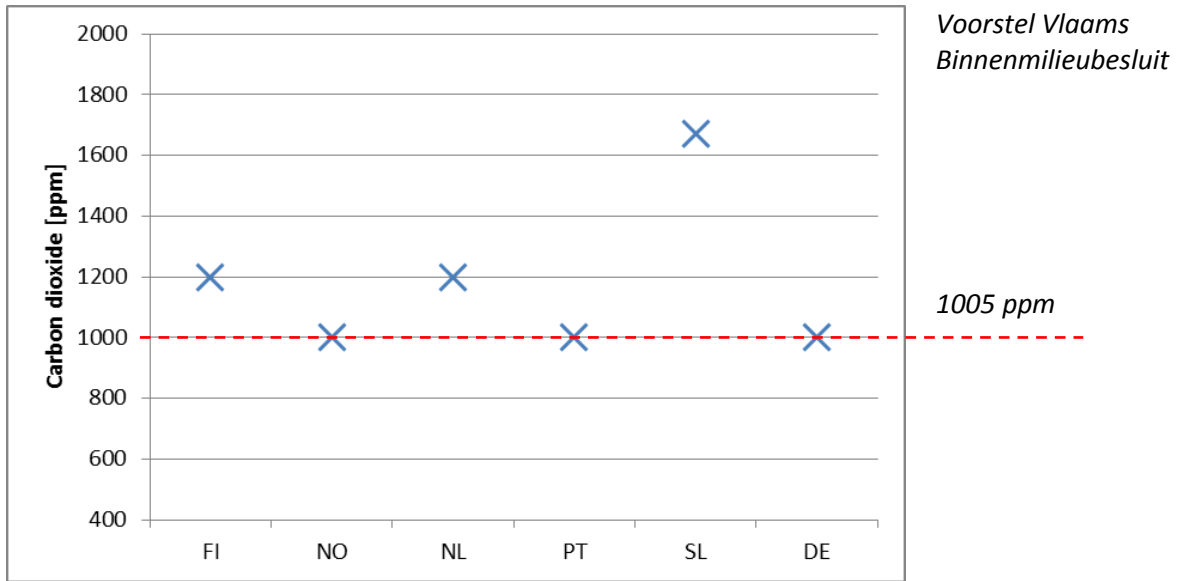
Categorie	Verwacht percentage ontevreden personen, %	Aanbevolen CO <sub>2</sub> -niveaus boven de buitenconcentraties, uitgedrukt in ppm
I	15	350
II	20	500
III	30	800
IV	>30	< 800

De voorgestelde richtwaarde van 500 ppm boven de buitenconcentraties in dit rapport voldoet aan de aanbevelingen voor categorie II en III van het gewenste comfort, dat wil zeggen het normale verwachtingsniveau dat van toepassing is op nieuwe gebouwen en renovaties (categorie II) en een bescheiden verwachtingsniveau dat van toepassing is op bestaande gebouwen (categorie III).

→ **Vergelijking met aanbevelingen voor CO<sub>2</sub> in de binnenlucht uit andere EU landen**

Onderstaande grafiek (Figuur 11) toont een vergelijking van de aanbevolen CO<sub>2</sub> grenswaarden voor het binnenmilieu in andere EU landen. Deze concentraties worden vergeleken met de aanbevolen concentraties voor het Vlaams Binnenmilieubesluit zoals gemotiveerd in paragraaf 4.2. De rekening

houdend met het gemiddelde buiten CO<sub>2</sub>-concentratie niveau van 455 ± 50 ppm gemeten in Vlaanderen (Stranger et al., 2015, 2009) resulterend in een maximaal gemiddelde aanbevolen CO<sub>2</sub>-concentratie van 1005 ppm. De rode stippelijn duidt deze vergelijking aan.



Figuur 11 Binnenlucht CO<sub>2</sub> concentratie richtwaarden van geselecteerde EU landen (Breliv, 2011)

## CHAPTER 5 CONCLUSIE

Op basis van de analyse die uitgevoerd werd in dit rapport, worden volgende aanbevelingen gemaakt voor de fysische parameters uit het Vlaams Binnenmilieu besluit:

Voor temperatuur:

Seizoen	Aanvaardbaar bereik van de comforttemperatuur
Koude jaarhelft	$20^{\circ}\text{C} \leq T < 24^{\circ}\text{C}$
Warme jaarhelft	$22^{\circ}\text{C} \leq T < 26^{\circ}\text{C}$

Voor relatieve vochtigheid:

Seizoen	Relative vochtigheid (RV)
Koude jaarhelft	$40\% \leq \text{RV} < 60\%$
Warme jaarhelft	$30\% \leq \text{RV} < 70\%$

Voor tocht:

Seizoen	Luchtsnelheid / tocht
Koude jaarhelft	$< 0.15 \text{ m/s}$
Warme jaarhelft	$< 0.25 \text{ m/s}$

Voor CO<sub>2</sub>:

	Concentratie
<b>KOOLSTOFDIOXIDE</b>	$< 500 \text{ ppm}$ boven de buitenconcentraties

CHAPTER 6 REFERENCES

---

Al horr Y., Arif M., Katafygiotou M., Mazroei A., Kaushik A., Elsarrag E., (2016) Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (1), 1-11

Al horr Y., Arif M., Katafygiotou M., Mazroei A., Kaushik A., Elsarrag E., (2016) Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (1), 1-11

Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. (2016) Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environ Health Perspect* 124:805–812; <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1510037>

Arundel A.V., Sterling E.M., Biggin J.H., Sterling T.D. (1986) Indirect health effects of relative humidity in indoor environments, *Environmental health perspectives*, 65, 351-361

ASHRAE Standard 55, (2017) Thermal Environment Conditions for Human Occupancy.

ASHRAE Standard 62.1, (2010b). Ventilation for acceptable indoor air quality.

B. Berg-Munch, G. Clausen, P.O. Fanger, (1986) Ventilation requirements for the control of body odor in spaces occupied by women, In *Environment International*, Volume 12, Issues 1–4, 1986, Pages 195-199, ISSN 0160-4120, [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(86\)90030-9](https://doi.org/10.1016/0160-4120(86)90030-9).

Barbadilla-Martín E, Lissén JMS, Martín JG, Aparicio-Ruiz P, Brotas L. (2017) Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain, *Building and Environment* 123, 163-175

Bierwirth, P. (2014) The unapprehended major risks to human health associated with carbon dioxide breathing toxicity related to climate change. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1256261.v1>

Bluyssen, P.M., (2009) *The Indoor Environment Handbook How to Make Buildings Healthy and Comfortable*. ISBN: 978-1-84407-787-8

Bonnefoy, X. R., Annesi-Maesona, I., Aznar, L. M., Braubachi, M., Croxford, B., Davidson, M., Ezratty, V., Fredouille, J., Ganzalez-Gross, M., van Kamp, I., Maschke, C., Mesbah, M., Moissonnier, B., Monolbaev, K., Moore, R., Nicol, S., Niemann, H., Nygren, C., Ormandy, D., Röbbel, N. and Rudnai, P. (2004) Review of Evidence on Housing and Health, Fourth Ministerial Conference on Environment and Health, Budapest, Hungary, 23–25 June 2004

Bradshaw V. (2006) *The Building Environment: Active and Passive Control Systems*, 3rd Edition, Wiley, ISBN: 978-0-471-68965-2

Brelih, N., Seppänen O. (2011) Ventilation rates and IAQ in European standards and national regulations, AIVC conference Oct 12-13, 2011, Brussels, Belgium.

- Charles K.E. (2003) Finger's Thermal Comfort and Draught Models, National Research Council Canada; IRC-RR-162
- Dannemiller, K. C., Weschler, C. J. and Peccia, J. (2017), Fungal and bacterial growth in floor dust at elevated relative humidity levels. *Indoor Air*, 27: 354–363. doi:10.1111/ina.12313
- De Dear R.J., Brager G.S., (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revision to ASHRAE Standard 55, *Energy and Buildings*, 34, 549-561
- De Dear R.J., Brager G.S., Cooper D. (1997) Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference FINAL REPORT ASHRAE RP- 884. <http://www.cbe.berkeley.edu/research/other-papers/de%20Dear%20-%20Brager%201998%20Developing%20an%20adaptive%20model%20of%20thermal%20comfort%20and%20preference.pdf>
- Djongyang N., Tchinda R., Njomo D. (2010) Thermal comfort: A review paper, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2626–2640
- EN 15251 (2007) Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
- European Commission (2000) Report No 22: Risk assessment in relation to indoor air quality. EUROPEAN COLLABORATIVE ACTION URBAN AIR, INDOOR ENVIRONMENT AND HUMAN EXPOSURE
- European Commission (2007) Opinion on risk assessment on indoor air quality, Scientific Committee on Health and Environmental Risks. [http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scher/docs/scher\\_o\\_055.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scher/docs/scher_o_055.pdf)
- Fang L., Clausen G., Fanger P.O. (1999) Impact of Temperature and Humidity on Chemical and Sensory Emissions from Building Materials, *Indoor Air*, 9, 193-201
- Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H., Ring J. (1988) Air turbulence and sensation of draught *Energy and Buildings*, 12, pp. 21–39
- Fanger PO, Ostergaard J, Olesen B, Lund M., (1974) The effect on man's comfort of a uniform air flow from different directions. *ASHRAE Trans*, 80, 142 -157.
- Guggenbichler, P., Hüster, R. and Stephan, G. (2007) Luftfeuchtigkeit und Immunabwehr. Die Rolle der Schleimhaut und Auswirkungen auf die Klimatechnik', *TAB TECHNIK AM BAU* 38, 9, 66-68.
- Healy JD. (2003). Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *Journal of Epidemiology and Community Health* 57,784-789.
- Hensen JLM., (1991) On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Huang L, Ouyang Q, Zhu YX, Jiang LF. (2013) A study about the demand for air movement in warm environment. *Build Environ*; 61: 27 - 33.
- Humphreys, M. A. and Nicol, J. F. (1998) Understanding the adaptive approach to thermal comfort', *ASHRAE Transactions*, 104, (1), 991–1004

Ioannou A., Itard L., (2017) In-situ and real time measurements of thermal comfort and its determinants in thirty residential dwelling in the Netherlands, *Energy and Buildings* 139, 487-505

ISO 7730:2005 (2015) Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, International Organization for Standardization (last revised and confirmed in 2015)

Iwashita G, Kimura K, Tanabe S, Yoshizawa S, Ikeda K, (1990) Indoor air quality assessment based on human olfactory sensation. *Journal of Archit Plann Environ Engng, AIJ*, No 410, April 1990, pp 9-19

Kosatsky T. (2005). The 2003 European heat waves. *Eurosurveillance* 10, 148-149.

Kwok A.G., Rajkovich B.B. (2010) Addressing climate change in comfort standards, *Building and Environment*, 45, 18-22

Liu, L., Li, Y., Nielsen, P. V., Wei, J. and Jensen, R. L. (2017), Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 27: 452–462. doi:10.1111/ina.12314

McCartney K.J., Nicol J.F. (2002) Developing an adaptive control algorithm for Europe, *Energy and Buildings*, 34, 623-635

McGwin G Jr, Lienert J, Kennedy JI Jr. (2011) Formaldehyde exposure and asthma in children: a systematic review; *Cien Saude Colet.*;16(9):3845-52.

Melikov, A. K. (1989) Quantifying draught risk, *Technical Review, Bruel & Kjaer*, 2, Denmark

MIRA Klimaatrapport (2015) over waargenomen en toekomstigeklimaatveranderingen  
[http://www.milieurapport.be/Upload/main/0 Klimaatrapport/342195 Klimaatrapport%20toegankelijk.pdf](http://www.milieurapport.be/Upload/main/0_Klimaatrapport/342195_Klimaatrapport%20toegankelijk.pdf)

Nicol F., Humphreys M., (2007) Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort, *Solar energy* 81, 295-304

Nicol F., Humphreys M., (2010) Derivation of the adaptive equation from thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251, *Building and Environment*, 45, 11-17

Orosa J.A. (2009) Research on General Thermal Comfort Models, *European Journal of Scientific Research*; 27 Issue 2, p217

Persily A, de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017;00:1–11. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>

Persily, A.K. (2015) Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62, *Building and Environment*, 91, 61 – 69

Rice S.A. (2004) HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT OF CO<sub>2</sub>: SURVIVORS OF ACUTE HIGH-LEVEL EXPOSURE AND POPULATIONS SENSITIVE TO PROLONGED LOW-LEVEL EXPOSURE, THIRD ANNUAL CONFERENCE ON CARBON SEQUESTRATION May 3-6, 2004, Alexandria, Virginia, USA

Rijal HB, Humphreys MA, Nicol JF (2009) Understanding occupant behaviour: the use of controls in mixed-mode office buildings. *BUILDING RESEARCH & INFORMATION*, 37(4), 381–396

- Rohles FH, Konz S, Jones B. (1983) Ceiling fans as extenders of the summer comfort envelope. ASHRAE Trans; 89(1):245 - 263
- Rohles FH, Woods JE, Nevins RG. (1974) The effect of air movement and temperature on the thermal sensations of sedentary man. ASHRAE Trans, 80(1), 101-119.
- Salthammer, T. (2009) Chapter 5: Environmental Test Chambers and Cells, Measuring Organic Indoor Pollutants, In: Salthammer, T. and Uhde, E. (eds) Organic Indoor Air Pollutants, Weinheim, WILEY.
- Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, Fisk WJ. (2012). Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human Decision-Making Performance. Environ Health Perspect 120:1671–1677; <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Sunwoo Y,, Chou C, Takeshita J, Murakami M, Tochihara Y. (2006) Physiological and subjective responses to low relative humidity in young and elderly men., J Physiol Anthropol. 25(3):229-38.
- Tanabe S, Kimura K, Hara T. (1987) Thermal comfort requirements during the summer season in Japan. ASHRAE Trans; 93(1):564 - 577.
- WARGOCKI, P. , WYON, D. P., SUNDELL, J., CLAUSEN, G. and FANGER, P. O. (2000), The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity. Indoor Air, 10: 222–236. doi:10.1034/j.1600-0668.2000.010004222.x
- WHO (2012) Burden of disease from Household Air Pollution for 2012 [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/HAP\\_BoD\\_results\\_March2014.pdf?ua=1](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/HAP_BoD_results_March2014.pdf?ua=1)
- Wolkoff P., Kjærgaard S. (2007) The dichotomy of relative humidity on indoor air quality, Environmental International, 33, 850
- Wyon, D., Fang, L., Meyer, H., Sundell, J., Weirsoee, C., SederbergOlsen, N., Fanger, P. O. (2002). Limiting criteria for human exposure to low humidity indoors. Proceedings of Indoor Air 2002.
- Zhang, X., Wargocki, P. and Lian, Z. (2017b), Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bio-effluents at levels typically occurring indoors. Indoor Air, 27: 65–77. doi:10.1111/ina.12286
- Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z. and Thyregod, C. (2017a), Effects of exposure to carbon dioxide and bio-effluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. Indoor Air, 27: 47–64. doi:10.1111/ina.12284
- Zhu Y., Luo M., Ouyang Q., Huang L., Cao B., (2015) Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments: A review, Building and Environment 91, 5 – 14
- Frankel, M., Bekö, G. Timm M, Gustavsen S, Hansen E.W, and Madsena M. A. (2012) Seasonal Variations of Indoor Microbial Exposures and Their Relation to Temperature, Relative Humidity, and Air Exchange Rate, Appl. Environ. Microbiol., vol. 78 no. 23 8289-8297
- VMM (2010) Chemische karakterisering van fijn stof in Vlaanderen <https://www.vmm.be/publicaties/chemkar-pm10-chemische-karakterisering-van-fijn-stof-in-vlaanderen-2010>

Goda R. (2014) Turbulence intensity and air velocity characteristics in a slot ventilated space. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 58(1) pp. 1-6

Stranger M., Aerts W., Daems J., Spruyt M., Geyskens F., Verbeke L., Verbeke S., Vyver I., Goelen E., Täubel M., Hyvärinen A., Laverge J., Backer L.D., Janssens A., Lauriks L., Geens T. (2015) Renovair Verkennend onderzoek naar de binnenmilieukwaliteit in gebouwen na (energie-efficiënte) renovaties, , [http://www.milieuinfo.be/dms/d/d/workspace/SpacesStore/3022641f-ea68-4873-b5ca-f07f964339c1/renovair\\_eindrapport.pdf](http://www.milieuinfo.be/dms/d/d/workspace/SpacesStore/3022641f-ea68-4873-b5ca-f07f964339c1/renovair_eindrapport.pdf)

Stranger M., De Brouwere K., Goelen E., Govarts E., Koppen G., Willems H, Torfs R., Desager K. (2009) Onderzoek naar de luchtkwaliteit van de binnenlucht in scholen: invloed van het buitenmilieu, van ventilatie en van klasinrichting, <http://www.lne.be/sites/default/files/atoms/files/samenvatting%20voor%20de%20studie%20Onderzoek%20naar%20de%20kwaliteit%20van%20de%20binnenlucht%20in%20scholen-%20invloed%20van%20het%20buitenmilieu%20C%20van%20ventilatie%20en%20van%20klasinrichting.pdf>

Møller, E.B., Andersen, B., Rode, C. and Peuhkuri, R. (2017) Conditions for mould growth on typical interior surfaces, *Energy Procedia*, 132, 171-176.

Zhou, C., Zhan, Y., Chen, S., Xia, M., Ronda, C., Sun, M., Chen, H. and Shen, X. (2017) Combined effects of temperature and humidity on indoor VOCs pollution: Intercity comparison, *Building and Environment*, 121, 26-34.



## ANNEX A COMFORT TEMPERATUUR BEREKENINGEN

Om het aanvaardbare temperatuurbereik in bemande ruimtes in te schatten, werd de optimale comforttemperatuur berekend aan de hand van de regressiemodellen die alleen afkomstig zijn uit Europese veldstudies (vermeld in HOOFDSTUK 3), rekening houdend met de jaarlijkse gemiddelde buitentemperaturen gemeten in de stad Antwerpen, België voor de periode 2009 - 2016 (tabel 19).

Tabel 21 Maandelijkse gemiddelde buitentemperatuur in Antwerpen, België voor de periode 2009 - 2016 (bron: [www.meteo.be](http://www.meteo.be))

Jaar	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Jan	2	0	4	6	2	6	5	5
Feb	4	2	6	1	2	7	5	5
Mart	8	8	8	11	4	11	9	7
Apr	14	12	16	10	10	15	13	11
Mei	16	13	16	16	13	17	16	17
Jun	18	19	17	16	17	20	20	19
Jul	20	22	17	18	22	22	22	20
Aug	21	19	19	20	21	19	22	20
Sep	17	15	17	16	18	19	15	20
Oct	12	11	13	12	14	15	12	11
Nov	10	6	9	7	8	10	10	7
Dec	3	-1	6	5	6	5	9	6

\*  $\alpha = 0.8$

### → Met behulp van lopend gemiddelde buitentemperaturen

Bij toepassing van vergelijking (8) op de maandelijkse gemiddelde temperatuursgegevens uit Tabel 21, kan de maandelijks lopend gemiddelde buitentemperatuur voor stad Antwerpen voor de periode 2009 - 2016 berekend worden. De resulterende waarden ( $T_{RM}$ ), weergegeven in Tabel 22, werden vervolgens toegepast in de regressiemodellen voor het berekenen van de comforttemperaturen van gebouwen die werkzaam zijn in verschillende temperatuursregelings-modi (zoals natuurlijk geklimatiseerd en de 'mixed-running mode'). Merk op dat voor deze berekeningen enkel modellen uit Europese veldstudies (d.w.z. SCATs, Europe\_longitudinal, MM studie) gebruikt werden. Tabel 22 toont ook de berekende gemiddelde comforttemperatuur volgens elk van de 4 modellen.

Tabel 22 toont ook de berekende comforttemperatuur voor de koude jaarhelft en warme jaarhelft, bepaald als het gemiddelde van de resulterende comforttemperaturen voor de maanden van beide jaarhelften. Deze twee gemiddelde temperaturen werden vervolgens gebruikt als input voor de seizoensgebonden comforttemperaturen voor het "Aanvaardbaar bereik van de comforttemperatuur" in hoofdstuk 3.1.2.

Tabel 22 Resulteerde maandelijks lopend gemiddelde buitentemperatuur ( $T_{RM}$ ) and de berekende comforttemperatuur ( $T_c$ ) met behulp van de regressiemodellen van veldstudies uitgevoerd in Europa, gegeven in °C

Jaarheft	Month	$T_{RM}$	SCATs_NV <sup>a</sup> $T_c = 0.33T_{RM} + 18.8$ natuurlijk geklimatiseerd	SCATs_AC <sup>a</sup> $T_c = 0.09T_{RM} + 22.6$ Verwarmd of gekoeld	Europe_long <sup>b</sup> $T_c = 0.308T_{RM} + 18.1$ Mixed mode operation	MM <sup>c</sup> $T_c = 0.24T_{RM} + 19.3$ Mixed mode operation	Gemiddelde	$T_c$
Koude jaarheft	Jan	4	22	22	22	22	22	22
	Feb	4	22	22	22	22	22	
	Mrt	7	22	22	22	22	22	
	Apr	11	23	24	22	22	22	
Warme jaarheft	Mei	14	24	24	23	23	23	24
	Jun	17	24	24	23	23	24	
	Jul	19	25	24	24	24	24	
	Aug	18	25	24	24	24	24	
	Sep	16	24	24	23	23	24	
Koude jaarheft	Okt	11	23	24	22	22	22	22
	Nov	8	22	22	22	22	22	
	Dec	5	22	22	22	22	22	

<sup>a</sup>Nicol and Humphreys (2007)

<sup>b</sup>Rijal et al. (2009)

<sup>c</sup>Barbadilla-Martin et al. (2017)

## ANNEX B MEETMETHODES

---

Een nauwkeurige kalibratie van het gebruikte meetinstrument is essentieel voor een nauwkeurige en realistische bepaling van de in dit rapport beschreven fysieke parameters van de binnenomgevingen. De kalibratieprocedure en de intervallen tussen kalibraties zijn verschillend tussen verschillende instrumenten. In het algemeen zal de fabricant van het instrument een tijdsinterval tussen de kalibraties aanbevelen. Het is echter een goede algemene praktijk om de prestaties van de instrumenten minstens een keer per jaar te controleren. Een lijst van de internationaal aanvaarde standaardmetingstechnieken wordt voor elke parameter gegeven in de volgende paragrafen.

Parameter	<b><i>Air temperature</i></b>	
<b><i><u>Vlaams binnenmilieubesluit:</u></i></b>		
<u>Richtwaarde:</u>	Koude jaarkhelft	$22^{\circ}\text{C} \leq T < 26^{\circ}\text{C}$
	Warme jaarkhelft	$20^{\circ}\text{C} \leq T < 24^{\circ}\text{C}$
<u>Interventiewaarde:</u>	-	
<b><i><u>Aanbevolen meetmethoden:</u></i></b>		
<u>ISO 7726:1998</u>		
Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities		
Toepassingsgebied:	This International Standard specifies the minimum characteristics of instruments for measuring of air temperature.	
Instrument	Calibrated thermometers	

Parameter	<b><i>Humidity</i></b>	
<b><u>Vlaams binnenmilieubesluit:</u></b>		
<u>Richtwaarde:</u>	Koude jaarhelft	$40\% \leq T < 60\%$
	Warme jaarhelft	$30\% \leq T < 70\%$
<u>Interventiewaarde:</u>	-	
<b><u>Aanbevolen meetmethoden:</u></b>		
<u>ISO 7726:1998</u>		
Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities		
Toepassingsgebied:	This International Standard specifies the minimum characteristics of instruments for measuring the absolute humidity of the air	
Instrument		
<u>ASTM E337 – 15</u>		
Standard Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)		
Toepassingsgebied:	This test method covers the determination of the humidity of atmospheric air by means of wet- and dry-bulb temperature readings. This method is applicable within the ambient temperature range 5 to 50°C, wet-bulb temperatures not lower than 1°C, and restricted to ambient pressures not differing from standard atmospheric pressure by more than 30 %	
Instrument	Psychrometer (wet- and dry- thermometers)	

Parameter	<b><i>Air velocity</i></b>	
<b><u>Vlaams binnenmilieubesluit:</u></b>		
<u>Richtwaarde:</u>	Koude jaarhelft	< 0.15 m/s
	Warme jaarhelft	< 0.25 m/s
<u>Interventiewaarde:</u>	-	
<b><u>Aanbevolen meetmethoden:</u></b>		
ISO 7726:1998 Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities		
Toepassingsgebied:	This International Standard specifies the minimum characteristics of instruments for measuring air velocity	
Instrument		
<u>ASTM D3464 - 96(2014)</u> Standard Test Method for Average Velocity in a Duct Using a Thermal Anemometer		
Toepassingsgebied:	This test method describes the measurement of the average velocity with a thermal anemometer for the purpose of determining gas flow in a stack, duct, or flue. It is limited to those applications where the gas is essentially air at ambient conditions and the temperature, moisture, and contaminant loading are insignificant as sources of error compared to the basic accuracy of the typical field situation. The range of the test method is from 1 to 30 m/s (3 to 100 ft/s).	
Instrument	Calibrated Thermal Anemometer	

Parameter	<b><u>Carbon dioxide</u></b>
<b><u>Vlaams binnenmilieubesluit:</u></b>	
<u>Richtwaarde:</u>	< 500 ppm boven de buitenconcentraties
<u>Interventiewaarde:</u>	-
<b><u>Aanbevolen meetmethoden:</u></b>	
<u>ISO 16000-26:2012</u> Indoor air -- Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	
Toepassingsgebied:	This standard method specifies the planning of carbon dioxide indoor pollution measurements.
Monsterneming:	Continuously measured over a certain time during the intended use (occupancy by people) of the room.
Analyse:	<u>Non-dispersive infrared spectrometry (NDIR)</u> Continuous CO <sub>2</sub> determination in the concentration range from about 1 ppm to 5 000 ppm. <u>Photoacoustic spectroscopy (PAS)</u> Continuous CO <sub>2</sub> determination in the concentration range from about 1 ppm to 5 000 ppm.