

Binnenklimaatcriteria voor de energieprestatie van gebouwen

De filosofie achter EN15251

De Europese Richtlijn voor Energieprestatie van Gebouwen (EPBD) is begin 2003 goedgekeurd. De overgangperiode is, afhankelijk van het artikel, 3 tot 6 jaar. De Europese Commissie voor Normalisatie (CEN) heeft verschillende normen ontworpen om lidstaten te helpen bij het ten uitvoer brengen van de richtlijn. Eén van deze normen is de norm “inputparameters van het binnenklimaat voor het ontwerp en de beoordeling van de energieprestatie van gebouwen – gericht op binnenluchtkwaliteit, thermische omgeving, verlichting en akoestiek”. De norm omschrijft ontwerpwaarden voor het binnenklimaat, waarden die dienen te worden gebruikt in energieberekeningen en methoden waarmee het omschreven binnenklimaat in gebouwen kan worden gecontroleerd. De norm omvat methoden voor de beoordeling van het binnenklimaat op lange termijn. Dit artikel beschrijft de filosofie en een aantal van de uitgangspunten die worden gebruikt in de norm en geeft voorbeelden die in de norm worden voorgedragen. Een conceptnorm heeft het internationale herzieningsproces doorstaan en is nu definitief goedgekeurd tijdens de formele uitspraak.

- door B.W. Olesen

Het Europese Parlement en de Raad hebben in december 2002 een richtlijn betreffende de energieprestatie van gebouwen (EPBD) goedgekeurd. Deze richtlijn vereist van de lidstaten dat zij:

1. een uitgebreide methodologie ontwikkelen voor berekening van de geïntegreerde energieprestatie van gebouwen en HVAC-systemen, inclusief verwarming, koeling, ventilatie en verlichting;
2. minimumeisen stellen aan de energieprestatie van nieuwe gebouwen;
3. deze eisen toepassen in bestaande gebouwen;
4. een energiecificeringssysteem ontwikkelen voor gebouwen;
5. verwarmings- en airconditionings-systemen regelmatig laten inspecteren.

Het energiegebruik van gebouwen hangt in belangrijke mate af van de criteria die worden gebruikt voor het binnenklimaat, die ook de gezondheid, de productiviteit en het comfort van de gebouwgebruikers beïnvloeden. Het opstellen van een energienorm zonder een norm die is gerelateerd aan het binnenklimaat heeft geen zin. Het binnenklimaat wordt verschillende keren genoemd in de EPBD. Allereerst dienen maatregelen om energie te besparen het comfort en de gezondheid van de gebouwgebruikers niet nadelig te beïnvloeden. Ten tweede wordt aanbevolen om in het gebouw, naast het energiecificeringssysteem en de werkelijke waarden voor het energiegebruik, de ontwerpwaarden voor het binnenklimaat en de comfortindicatoren van de

ruimte te tonen. Daarom bestaat er een behoefte om criteria te specificeren voor ontwerp van het binnenklimaat, een behoefte aan energieberekeningen, aan een prestatie-evaluatie en aan een weergave van de condities waarop het binnenklimaat van het gebouw wordt geregeld.

Dit artikel beschrijft hoe ontwerpcriteria van het binnenklimaat zijn bepaald voor de dimensionering van systemen en voor energieberekeningen, in navolging van de norm. Het artikel legt de nadruk op een aantal nieuwe uitgangspunten in de norm, zoals de verschillende binnenklimaatcategoriën, het verschil tussen nagestreefde waarden voor de dimensionering en energieberekeningen, uitgangspunten voor bepaling van ventilatievouden en beoordeling van het binnenklimaat. Voor de dimensionering en energieberekeningen worden verschillende benaderingen geïntroduceerd voor mechanisch gekoelde gebouwen, en voor gebouwen zonder mechanische ventilatie. Tot slot zal dit artikel een aantal kwesties behandelen dat naar voren is gekomen tijdens de publieke herziening.

DOEL VAN DE NORM

De Europese conceptnorm [1] specificeert de parameters die van invloed zijn op het binnenklimaat en/of criteria voor het binnenklimaat en de wijze waarop deze worden gebruikt om te voldoen aan de intenties van de EPBD. De norm omvat de volgende onderdelen:

Vertaling van “The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings”, door mw. P.M. Briggan BSc, afstudeerder bij de unit Building Physics & Systems van de TU Eindhoven.

- het specificceert de binnenklimaatparameters die van invloed zijn op de energieprestatie van gebouwen en het omschrijven hoe inputparameters voor het binnenklimaat voor het ontwerp van het gebouwssysteem kunnen worden bepaald, en hoe energieprestatieberekeningen dienen te worden uitgevoerd;
- de norm geeft een omschrijving van de beoordelingsmethoden van het gerealiseerde binnenklimaat op lange termijn, als resultaat van berekeningen of metingen;
- het stelt parameters vast die dienen te worden gebruikt bij het monitoren en weergeven van het binnenklimaat in bestaande gebouwen;
- de norm is voornamelijk toepasbaar in niet-industriële gebouwen, waar binnenklimaatcriteria worden bepaald door het gebruik van het gebouw, en waar de productie of het proces geen grote invloed heeft op het binnenklimaat. De norm is dus toepasbaar op de volgende gebouwtypen: eengezinswoningen, appartementencomplexen, kantoren, schoolgebouwen, ziekenhuizen, hotels en restaurants, sportfaciliteiten, groothandels en dienstgebouwen van de detailhandel;
- de norm omschrijft hoe verschillende categorieën binnenklimaatcriteria kunnen worden gebruikt, maar vereist niet dat bepaalde criteria worden gebruikt. Dit wordt overgelaten aan nationale voorschriften of individuele projectspecificaties;
- de aanbevolen criteria in deze norm kunnen ook worden gebruikt in nationale berekeningsmethoden, die kunnen verschillen van de methoden waarnaar hier wordt verwezen.
- de norm schrijft geen ontwerpmethoden voor, maar geeft inputparameters voor het ontwerp van gebouwen, verwarming, koeling, ventilatie en verlichtingsystemen;
- de norm omvat geen criteria voor lokale factoren van discomfort, zoals tocht, stralingsasymmetrie, verticale temperatuurgradiënten en oppervlaktetemperaturen van de vloer.

Verschillende criteria zijn gegeven in een aantal categorieën, zoals weergegeven in tabel 1. De parameters en criteria zijn gebaseerd op bestaande normen en richtlijnen zoals [2, 3, 4, 5 en 6] en bestaande nationale normen.

Categorie	Toelichting
I	Hoog niveau van verwachting; wordt aanbevolen voor ruimtes die worden gebruikt door erg gevoelige en fragiele personen met speciale behoeften, zoals gehandicapten, zieke personen, erg jonge kinderen en oudere personen.
II	Normaal niveau van verwachting; dient te worden gebruikt voor nieuwe gebouwen en renovaties.
III	Een acceptabel, gemiddeld niveau van verwachting; kan worden gebruikt voor bestaande gebouwen.
IV	Waarden buiten de criteria voor de bovenstaande categorieën. Deze categorie dient alleen te worden aanvaard voor een beperkt gedeelte van het jaar.

Omschrijving van de toepasbaarheid van de gebruikte categorieën.

- TABEL 1-

Categorie	Thermische staat van het lichaam als geheel	
	PPD (%)	PMV (Predicted Mean Vote)
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 of +0,7<PMV

Voorbeelden van aanbevolen ontwerpcategorieën voor mechanisch verwarmde en gekoelde gebouwen.

- TABEL 2-

INPUTCRITERIA

Over het algemeen dienen nationaal gespecificeerde ontwerpcriteria en criteria voor de dimensionering van systemen te worden gebruikt, maar wanneer nationale reglementen ontbreken geeft de norm aanbevolen ontwerpwaarden in informatieve annexen. De aanbevolen criteria worden voor drie van de vier categorieën gegeven. Gebruikmaking van een hogere klasse met strengere criteria zal resulteren in hogere berekende ontwerpbelastingen en kan daardoor leiden tot grotere systemen en installaties.

Thermische omgeving

De aanbevolen criteria voor de thermische omgeving zijn verschillend voor gebouwen met, en voor gebouwen zonder mechanische koeling. Voor het ontwerp van gebouwen en voor de dimensionering van HVAC-systemen dienen de thermische comfortcriteria (minimale kamertemperatuur in de winter, maximale kamertemperatuur in de zomer) en de vereiste ventilatievouden voor een acceptabele binnenluchtqualiteit te worden gebruikt als invoer voor warmte- [7] en koellast-

berekeningen [8]. Dit zal garanderen dat een minimum-maximum kamertemperatuur kan worden verkregen voor de ontwerpwaarden van de buitencondities en de interne belastingen.

Gebouwen met mechanische koeling

De basis voor het vaststellen van de criteria wordt gevormd door de norm EN ISO 7730 en het gebruik van de PMV-PPD indices, zoals weergegeven in tabel 2.

Het is mogelijk om op basis van een gespecificeerd of aangenomen kledingtype en activiteitsniveau van gebouwgebruikers, het bijbehorende bereik van de operationele temperatuur te berekenen. Als voorbeeld worden in tabel 3 voor gebouwen met mechanische koeling thermische ontwerpcriteria gegeven voor verschillende typen ruimten. Vooral de criteria voor kleuterscholen en woningen staan onder discussie. In deze typen gebouwen zal het activiteitsniveau niet gelijkmatig zijn verdeeld over het aantal personen dat zal zitten of lopen en kinderen die aan het spelen zijn. Daarnaast kan het kledingniveau tussen de verschillende groepen gebouwgebruikers verschillen (verkop-

Type gebouw/ruimte	Categorie	Operatieve temperatuur (°C)	
		Verwarming (winterseizoen), ~1,0 clo	Koeling (zomerseizoen), ~0,5 clo
Woongebouwen: leefruimten (slaapkamers, zijkamer, keuken, etc.), zittend ~1,2 met	A	21,0	25,5
	B	20,0	26,0
	C	18,0	27,0
Woongebouwen: overige ruimten (opslagruimten, gangen, etc.), staand / lopend ~1,6 met	A	18,0	
	B	16,0	
	C	14,0	
Enkel kantoor, kantoorruimte, vergaderruimte, auditorium, zittend ~1,2 met	A	21,0	25,5
	B	20,0	26,0
	C	19,0	27,0
Cafeteria / restaurant, zittend ~1,2 m	A	21,0	25,5
	B	20,0	26,0
	C	19,0	27,0
Klaslokaal, zittend ~1,2 met	A	21,0	25,0
	B	20,0	26,0
	C	19,0	27,0
Kleuterschool, staand / lopend ~1,4 met	A	19,0	24,5
	B	17,5	25,5
	C	16,5	26,0
Warenhuis, staand / lopend ~1,4 met	A	17,5	24,0
	B	16,0	25,0
	C	15,0	26,0

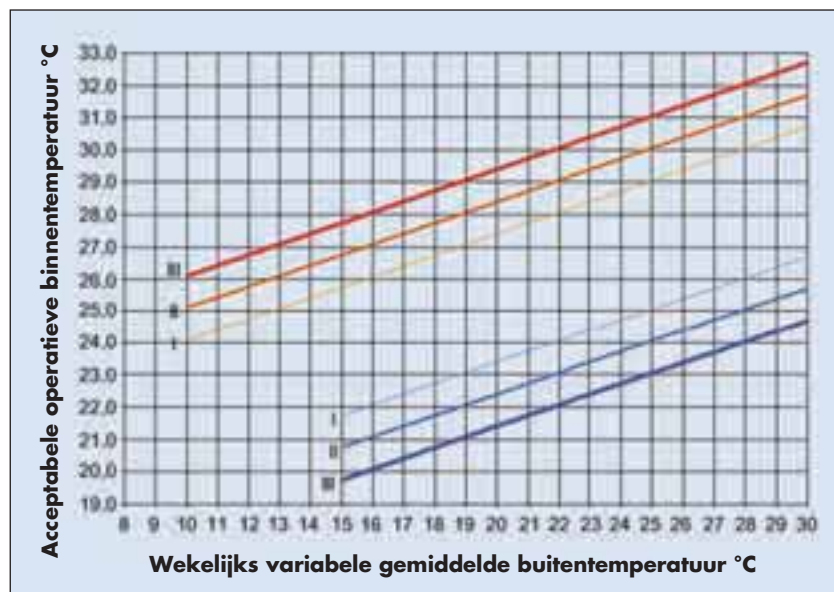
Aanbevolen ontwerpwaarden voor de ruimtetemperatuur voor het ontwerp van gebouwen en HVAC-systemen.

- TABEL 3-

klanten). Andere typen gebouwen, zoals ziekenhuizen, restaurants, sportfaciliteiten en pakhuizen zullen vergelijkbare problemen hebben over de variaties in activiteitsniveau en kledingniveaus tussen verschillende typen gebouwgebruikers [9 en 10].

Gebouwen zonder mechanische koeling

De criteria voor de thermische omgeving in gebouwen zonder mechanische koeling kunnen gedurende het warme seizoen anders worden gespecificeerd dan voor gebouwen met mechanische koeling. Dit komt door de andere verwachtingen en mogelijkheden tot aanpassing die gebouwgebruikers hebben. Dit blijkt uit verschillende onderzoeken [11 en 12] en is voor het eerst ter sprake gebracht in de ASHRAE Standard 55-2004. Het niveau van aanpassing en verwachting is sterk gerelateerd aan de klimaatcondities. Omdat er geen mechanisch koelsysteem hoeft te worden gedimensioneerd, worden de categorieën van zomertemperaturen voornamelijk gebruikt voor het gebouwontwerp. Er kan gebruik worden gemaakt van een gepaste oriëntatie, zonwering, thermische massa van de gebouwschil, natuurlijke ventilatie etc. om te voorkomen dat het gebouw oververhit raakt. Aanbevolen criteria



Ontwerpwaarden voor de operatieve temperatuur van het binnenklimaat, voor gebouwen zonder mechanisch koelsysteem, als functie van het exponentiële gewogen variabele gemiddelde van de buitentemperatuur. Categorie I ~90 %, categorie II ~80 %, categorie III ~65 % tevredenheid [12].

- FIGUUR 1-

voor de binnentemperatuur worden weergegeven in Figuur 1, gebaseerd op een variabele wekelijkse gemiddelde buitentemperatuur. Deze grafiek is alleen gevalideerd voor kantoorgebouwen met ramen die te openen zijn en door de gebouwgebruikers worden geregeld.

Terwijl de grafiek in de ASHRAE-

norm is gebaseerd op een maandelijkse gemiddelde buitentemperatuur, is de grafiek die hier wordt gepresenteerd gebaseerd op een Europees onderzoek [12] en op een exponentieel gewogen variabele gemiddelde van de dagelijkse gemiddelde buitentemperatuur Θ_{ed} .

Dit wordt berekend met behulp van de vergelijking:

$$\Theta_{rm} = (1 - \alpha) \{ \Theta_{ed-1} + \alpha \Theta_{ed-2} + \alpha^2 \Theta_{ed-3} + \dots \} \quad (1)$$

Deze vergelijking kan worden vereenvoudigd tot:

$$\Theta_{rm} = (1 - \alpha) \Theta_{ed-1} + \alpha \Theta_{rm-1} \quad (2)$$

waarin Θ_{rm} het variabele gemiddelde is van de temperatuur van vandaag, Θ_{rm-1} het variabele gemiddelde van de temperatuur van de voorgaande dag, Θ_{ed-1} de dagelijkse gemiddelde buitentemperatuur van de voorgaande dag, Θ_{ed-2} de dagelijkse gemiddelde buitentemperatuur van de dag daarvoor etc.

Daarnaast is α een constante met een waarde tussen 0 en 1. Het wordt aanbevolen om voor α een waarde van 0,8 te gebruiken.

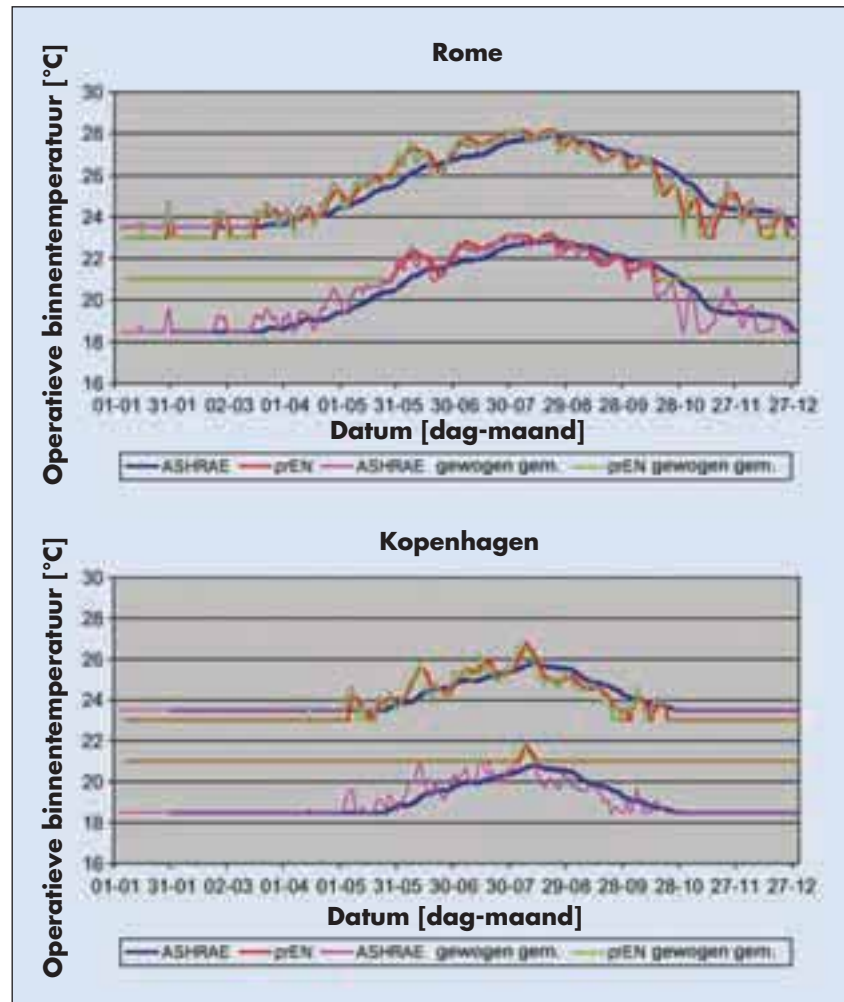
De volgende benaderende vergelijking kan worden gebruikt als data van de dagelijkse gemiddelde buitentemperatuur niet beschikbaar zijn:

$$\Theta_{rm} = \frac{\Theta_{ed-1} + 0,8\Theta_{ed-2} + 0,6\Theta_{ed-3} + 0,5\Theta_{ed-4} + 0,4\Theta_{ed-5} + 0,3\Theta_{ed-6} + 0,2\Theta_{ed-7}}{3,8} \quad (3)$$

Omdat de relatie met de buitentemperatuur toe te schrijven is aan de kleding, het gedrag en het aanpassingsniveau van de mensen, lijkt het verstandiger om een hogere weging te geven aan de buitentemperaturen van vandaag en gisteren dan om een vereenvoudigd maandelijks gemiddelde te gebruiken. Het gebruik van de twee benaderingen is voor twee geografische gebieden in Europa vergeleken in figuur 2. Over het geheel genomen zijn er niet veel verschillen, behalve dat het wekelijkse variabele gemiddelde grotere fluctuaties vertoont in het geschatte temperatuurbereik. In figuur 1 en 2 is te zien dat voor de warmere klimaatzones hogere ruimtetemperaturen worden geaccepteerd dan voor mechanisch gekoelde of geventileerde gebouwen (tabel 3). Dit komt deels door aanpassing (clo-waarden lager dan 0,5) en deels door de lagere verwachtingen. Aan de andere kant volgt uit figuur 2 dat bij deze benadering in gedeelten van de zomerperiode lagere ruimtetemperaturen worden geaccepteerd dan voor mechanisch gekoelde gebouwen.

Lokale thermische comfortcriteria

Criteria voor tocht, verticale temperatuurgradiënten, stralingsasymmetrie



Aanbevolen operatieve temperaturen gebaseerd op het 90 % tevredenheidscriterium. Waarden zijn gebaseerd op ASHRAE-55 en EN15251.

- FIGUUR 2-

en oppervlaktetemperaturen zullen ook invloed hebben op het ontwerp en de dimensionering van gebouwen en HVAC-systemen. Deze criteria zijn niet opgenomen in de huidige norm. Als alternatief daarvoor wordt verwezen naar de norm ISO EN 7730. Voor de beoordeling van de energieprestatie worden deze parameters niet meegenomen.

Binnenluchtkwaliteit en ventilatievouden

Voor het ontwerp van ventilatiesystemen en voor de berekening van de warmte- en koellasten dienen de benodigde ventilatievouden in de ontwerpdocumenten gespecificeerd te zijn op basis van nationale reglementen of met gebruikmaking van de methoden die in de norm worden aanbevolen. In de norm zijn verschillende methoden voor de berekening van het aanbevolen ventilatievoud opgenomen. Er dient minimaal te worden geventileerd om de verontreinigingen te verdunnen die door de gebouwgebruikers worden

geproduceerd (menselijke component, q_p , zie tabel 4). Deze ventilatievouden zijn gebaseerd op een bepaald aantal verwachte bezoekers dat de lucht als onacceptabel zal beoordelen. De ontwerpwaarden zijn bedoeld om mensen tevreden te stellen die de ruimte inlopen. Er kan worden bediscussieerd of dit altijd het geval zou moeten zijn. Mensen passen zich erg snel aan de geur in een ruimte aan. Eerder dan het ventilatievoud is naar schatting toereikend om ervoor te zorgen dat gebouwgebruikers de waargenomen luchtkwaliteit als acceptabel beoordelen (minimaal 15 minuten aangepast aan de lucht). Dat wil zeggen dat voor categorie II 2,5 l/s per persoon toereikend is in plaats van 7. De ASHRAE-norm 62.1 voor ventilatie en binnenluchtkwaliteit vormt hiervoor de basis, gebruik makende van ventilatievouden voor personen (gebouwgebruikers) die zich hebben aangepast aan de heersende condities.

Categorie	Verwacht percentage ontevreden	Menselijke component, q_p (l/s persoon)	Gebouwcomponent, q_b		
			Erg weinig verontreinigend (l/s m ²)	Weinig verontreinigend (l/s m ²)	Niet weinig verontreinigend (l/s m ²)
I	15	10	0,5	1,0	2,0
II	20	7	0,35	0,7	1,4
III	30	4	0,2	0,4	0,8
IV	>30	<4	<0,2	<0,4	<0,8

Vereiste basisventilatievouden voor verschillende categorieën voor verdunning van verontreinigingen van personen (q_p).

- TABEL 4-

Type gebouw of ruimte	Categorie	Vloeroppervlak (m ² /persoon)	q_p (l/s m ² persoon)	Erg weinig verontreinigend (l/s m ²)		Weinig verontreinigend (l/s m ²)		Niet weinig verontreinigend (l/s m ²)	
				q_b	q_{tot}	q_b	q_{tot}	q_b	q_{tot}
Enkel kantoor	I	10	1,0	0,5	1,5	1,0	2,0	2,0	3,0
	II	10	0,7	0,3	1,0	0,7	1,4	1,4	2,1
	II	10	0,4	0,2	0,6	0,4	0,8	0,8	1,2
Kantoorruimte	I	15	0,7	0,5	1,2	1,0	1,7	2,0	2,7
	II	15	0,5	0,3	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9
	II	15	0,3	0,2	0,5	0,4	0,7	0,8	1,1
Vergader ruimte	I	2	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0
	II	2	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9
	II	2	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8
Auditorium	I	0,75	15	0,5	15,5	1,0	16	2,0	17
	II	0,75	10,5	0,3	10,8	0,7	11,2	1,4	11,9
	II	0,75	6,0	0,2	0,8	0,4	6,4	0,8	6,8
Restaurant	I	1,5	7,0	0,5	7,5	1,0	8,0	2,0	9,0
	II	1,5	4,9	0,3	5,2	0,7	5,6	1,4	6,3
	II	1,5	2,8	0,2	3,0	0,4	3,2	0,8	3,6
Klaslokaal	I	2,0	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0
	II	2,0	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9
	II	2,0	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8

Aanbevolen ventilatievouden voor gebouwen die niet als woning worden gebruikt met een standaardwaarde voor de bezetting van de gebouwgebruikers, voor drie categorieën van verontreiniging van het gebouw zelf.

- TABEL 5-

Aanvullend is het ventilatievoud verhoogd, zodat rekening kan worden gehouden met de emissie van het gebouw en de systemen (zie tabel 4, q_B). Er is echter geen algemeen geaccepteerde methode wanneer de bijdrage van het gebouw geheel in rekening dient te worden gebracht. Verschillende onderzoeken laten zien dat dit de beste benadering is, maar mogelijk is het niet voor alle typen verontreinigin-

gen geldig. In dit geval is het de bijdrage aan geur en irritatie (waargenomen luchtkwaliteit), waar rekening mee dient te worden gehouden. Daarom kan er worden gesteld dat één orgaan, de neus, wordt beïnvloed en deze daarom dient te worden toegevoegd. Een eenvoudige optelling kan eigenlijk alleen worden gemaakt voor hetzelfde chemische component als het gezondheidsrisico wordt

beschouwd. Daarom wordt in een aantal landen voor het ventilatievoud aangeraden om een waarde te selecteren tussen het minimumniveau voor verontreiniging door mensen en het verhoogde ventilatievoud voor verontreiniging door mensen en het gebouw zelf.

Eén methode is om deze waarden op te tellen, gebruik makende van de volgende vergelijking:

$$q_{tot} = nq_p + Aq_B \quad (4)$$

waarin q_{tot} het totale ventilatievoud van de ruimte is (l/s), n de ontwerpwaarde voor het aantal personen in de ruimte, q_p het ventilatievoud voor de bezetting per persoon (l/s persoon), A het vloeroppervlak van de ruimte (m^2) en q_B het ventilatievoud voor emissies van het gebouw (l/s m^2).

Voorbeelden voor de verschillende categorieën zijn weergegeven in tabel 5. De menselijke component hangt af van de bezetting, en de gebouwcomponent hangt af van het gebouwtype. Een andere methode is het kiezen van een waarde tussen de menselijke component en het totaal.

Ventilatievoudcriteria kunnen ook worden uitgedrukt als het totale ventilatievoud per m^2 vloeroppervlak (l/s m^2) of per gebouwgebruiker (l/s gebouwgebruiker). Door het uit te drukken in een menselijke component en een gebouwcomponent wordt het eenvoudiger om benodigde ventilatievouden te berekenen voor afwijkende aantallen gebouwgebruikers.

Het ventilatievoud voor de gebouwcomponent voor verschillende typen gebouwen is een discussiepunt. Voor nieuwe gebouwen [13], waar aandacht is geschonken aan de keuze van constructiematerialen, rookvrije ruimten, etc., kunnen lagere niveaus (gelijk aan 0,14 l/s m^2) worden verkregen. Om die reden is een erg weinig verontreinigend gebouw opgenomen in tabel 4. Er is echter behoefte om methoden en testen te ontwikkelen voor materialen, op basis waarvan de verontreiniging van het gebouwtype kan worden vastgesteld. In de annex van de norm is een aantal voorgestelde criteria opgenomen.

Luchtvochtigheid

Bevochtiging van de binnenlucht is doorgaans niet noodzakelijk. De luchtvochtigheid heeft bij temperaturen lager dan 26 °C slechts een klein effect op de thermische sensatie en de waargenomen luchtkwaliteit in ruimten voor zittende gebouwgebruikers. Langdurige hoge luchtvochtigheden binnen kunnen echter microbiologische groei veroorzaken. Daarnaast kunnen erg lage luchtvochtigheden (< 15-20 %) droogte en irritatie van de ogen en luchtwegen veroorzaken.

Gebouw	Type ruimte	geluiddruk niveau [db(A)]	
		typisch bereik	standaard ontwerpwaarde
Woongebouw	Woonkamer	25-40	32
	Slaapkamer	20-35	26
Kinderdagverblijven	Peuterklas	30-45	40
	Crèche	30-45	40
Plaatsen van samenkomst	Auditoriums	30-35	33
	Bibliotheken	28-35	30
	Bioscopen	30-35	33
	Rechtszalen	30-40	35
	Musea	28-35	30
Commercieel	Kleinhandels	35-50	40
	Warenhuizen	40-50	45
	Supermarkten	40-50	45
	Computerruimten, groot	40-60	50
	Computerruimten, klein	40-50	45
Ziekenhuizen	Gangen	35-45	40
	Operatiekamers	30-48	40
	Zalen	25-35	30
	Slaapkamers, 's nachts	20-35	30
Hotels	Slaapkamers, overdag	25-40	30
	Foyer	35-45	40
	Receptieruimten	35-45	40
Kantoren	Hotelkamers, 's nachts	25-35	30
	Hotelkamers, overdag	30-40	35
	Kleine kantoren	30-40	35
	Vergaderruimten	30-40	35
Restaurants	Kantoortuinen	35-45	40
	Enkele kantoren	35-45	40
	Cafeteria's	35-50	40
	Restaurants	35-50	45
Scholen	Keukens	40-60	55
	Klaslokalen	30-40	35
	Gangen	35-50	40
	Gymzalen	35-45	40
Sport	Docentenkamers	30-40	35
	Gesloten sportstadions	35-50	45
	Zwembaden	40-50	45
Algemeen	Toiletten	40-50	45
	Garderobes	40-50	45

Voorbeelden van ontwerpwaarden voor het A-gewogen equivalent geluiddruk niveau.

- TABEL 6-

Type gebouw of ruimte	Categorie	Temperatuurbereik voor verwarmen (°C) (kleding ~1,0 clo)	Temperatuurbereik voor koelen (°C) (kleding ~0,5 clo)
Kantoren en ruimten met gelijksoortige activiteiten (enkele kantoren, kantoortuinen, vergaderruimten, auditoriums, cafetaria's, restaurants, klaslokalen (activiteit ~1,2 met))	I	21,0 - 23,0	23,5 - 25,5
	II	20,0 - 24,0	23,0 - 26,0
	III	19,0 - 25,0	22,0 - 27,0

Temperatuurbereik voor uurlijkse berekening van koel- en verwarmingsenergie in drie binnenklimaatcategorieën.

- TABEL 7-

Als een bevochtigings- of ontvochtigingssysteem wordt gebruikt zijn de ontwerpwaarden in categorieën I, II en III voor ontvochtiging 50, 60 en 70 % en voor bevochtiging 40, 30 en 20 %. Gewoonlijk is bevochtiging of ontvochtiging alleen benodigd in speciale gebouwen (zoals musea, sommige instellingen van de gezondheidszorg, etc.) en gedurende een gedeelte van het jaar in sommige klimaatzones. Bevochtiging en ontvochtiging kunnen een belangrijk energieverlies veroorzaken [14].

Verlichting

Ontwerpverlichtingsniveau's dienen op nationaal niveau te worden vastgesteld. Aanbevolen ontwerpwaarden voor de luminantie die dienen te worden gebruikt bij het ontwerpen van een verlichtingssysteem voor kantoren zijn: luminantieniveau op een hoogte van 0,8 m 500 lux, uniforme glare index URG < 19 en kleurweergave-index $R_a > 80$ (bewerkt uit EN12464 [15]). Als het aankomt op luminantieniveau's, lijkt een onderscheid in categorieën minder geschikt te zijn dan bijvoorbeeld voor temperatuur en verse luchttoevoer. De norm geeft waarden voor de daglichtfactor (in het midden van de ruimte), uniformiteit van de luminantie, regeling en verduistering, uniforme glare rating (UGR), gemak van aanpassingen aan de verlichting, lichtkleur (kleurtemperatuur) en kleurweergave-index R_a .

Geluid

Het geluid dat afkomstig is van de energiesystemen van het gebouw kan de gebouwgebruikers storen en het bedoelde gebruik van de ruimte of het gebouw in de weg staan. Het geluid in een ruimte kan worden beoordeeld door gebruikt te maken van een A-gewogen equivalent geluiddrukkniveau (tabel 6). Ook voor het geluid is beslo-

ten geen verschillende categorieën voor de criteria te gebruiken. De criteria hebben zowel betrekking op de geluidsbronnen van het gebouw, als op het geluidsniveau van het HVAC-systeem. De criteria dienen te worden gebruikt om het geluidsniveau van de mechanische installaties te beperken, en om eisen aan de geluidsisolatie te stellen voor geluid van buiten en voor geluid uit aangrenzende ruimten. De waarden kunnen worden overschreden wanneer de gebouwgebruikers controle hebben over de bediening van de installaties of ramen.

Een airconditioner van een ruimte kan bijvoorbeeld een hoger geluidsdrukkniveau veroorzaken als de gebouwgebruiker de bediening regelt, maar zelfs in dat geval dient de stijging van het geluidsdrukkniveau boven de waarden in tabel 6 te worden beperkt tot 5 en 10 dB(A).

Daarom wordt opgemerkt dat de ventilatie niet afhankelijk mag zijn van te openen ramen als het gebouw in een gebied is gesitueerd met een te hoog geluidsniveau buiten, rekening houdend met het niveau dat de ontwerper in de binnenruimte wil bereiken.

BINNENKLIMAATPARAMETERS VOOR ENERGIEBEREKENINGEN

Gestandaardiseerde inputwaarden voor de energieberekeningen zijn benodigd voor de berekeningen die zijn omschreven in artikel 3 en in de annex van de EPBD. Om een jaarlijkse energieberekening uit te voeren dienen de binnenklimaatcriteria te worden gespecificeerd en gedocumenteerd.

Thermisch omgeving in mechanisch gekoelde gebouwen

Omdat de energieberekeningen op basis van seizoenen, maanden of uren (dynamische simulatie) worden ver-

richt, wordt het binnenklimaat op eenzelfde wijze omschreven.

Voor seizoen- en maandelijkse berekeningen worden dezelfde binnentemperatuurwaarden gebruikt als die er voor het ontwerp (afmetingen) van verwarmings- en koelsystemen dienen te worden gebruikt (tabel 3), gespecificeerd voor iedere binnenklimaatcategorie, om energiegebruik van respectievelijk verwarming en koeling te berekenen. Bij dynamische simulatie wordt het energiegebruik berekend op uurlijkse basis. Aanbevolen waarden voor het acceptabele binnentemperatuurbereik voor verwarming en koeling zijn gebaseerd op een bereik van de PMV-index (tabel 2). Een voorbeeld is weergegeven in tabel 7. Het middelpunt van het temperatuurgebied dient te worden gebruikt als richtwaarde, maar de binnentemperatuur mag als gevolg van de energiebesparende kenmerken of het bedieningsalgoritme fluctueren binnen een gebied.

Als de koeling beperkt is (mixed mode gebouwen) dienen de overschreden binnentemperaturen te worden geschat door gebruik te maken van één van de methoden in de norm.

Thermisch omgeving in gebouwen zonder mechanische koeling

Voor verwarming gelden dezelfde onderste temperatuurgrenzen als voor mechanisch gekoelde gebouwen. Omdat er geen mechanische koeling is, zal er geen energiegebruik zijn voor koeling en daardoor heeft de bovenste grens in figuur 1 eigenlijk geen invloed. Het kan echter worden aanbevolen om de energievraag te berekenen alsof er koeling is geïnstalleerd, of om te berekenen in welke mate er niet wordt voldaan aan het aanbevolen temperatuurgebied. De berekende energievraag in de zomer voor een fictieve koeling mag

Categorie	Overeenkomstige CO ₂ boven de buitenlucht in ppm voor energieberekeningen
I	350
II	500
III	800
IV	<800

Voorbeelden van aanbevolen CO₂-concentraties boven de buitenconcentratie voor energieberekeningen en vraaggestuurde ventilatie.

- TABEL 8 -

worden opgeteld bij de algehele energievraag als een verlies, rekening houdend met het feit dat mensen in een later stadium mogelijk mechanische koeling willen installeren.

Binnenluchtkwaliteit en ventilatie

Voor energieberekeningen zijn de ventilatievouden gedurende de uren waarin het ventilatiesysteem wordt gebruikt gewoonlijk gelijk aan de ventilatievouden die zijn gespecificeerd voor ontwerpberoeeningen van de belasting en dimensionering van het ventilatiesysteem. Om een goede binnenluchtkwaliteit te garanderen aan het begin van het gebruik van de ruimte dient te worden geventileerd voor bezetting van de ruimte, of is er een minimum ventilatieniveau benodigd in perioden waarin de ruimte niet wordt gebruikt. De ventilatie dient daarnaast langer ingeschakeld te zijn dan dat er gebouwgebruikers aanwezig zijn, om alle verontreinigingen te verwijderen die tijdens het gebruik van het gebouw zijn ontstaan. Luchttoevoer van buiten, overeenkomend met twee luchtvolumes van de geventileerde ruimte, dient aan de ruimte te worden toegevoegd voordat de ruimte in gebruik wordt genomen (de ventilatie dient bijvoorbeeld een uur voor de ingebruikname van de ruimte te worden ingeschakeld als het aanbevolen ventilatievoud twee

bedraagt). Infiltratie kan worden berekend als een gedeelte van de ventilatie (aannamen voor de lekkage dienen beschreven te zijn).

Ook wordt aanbevolen om gebouwen te ventileren in perioden waarin het gebouw niet wordt gebruikt, gewoonlijk met een lager ventilatievoud dan gedurende de bezette periode. Het minimale ventilatievoud dient op basis van het bouwtype en de verontreinigingslast van de ruimten te worden bepaald. Een minimumwaarde van 0,1-0,2 l/s m² wordt aanbevolen als nationale eisen niet beschikbaar zijn. Ventilatievouden in natuurlijk geventileerde gebouwen zijn berekend op basis van de bouwconstructie, locatie en weercondities. In perioden waarin gebouwen niet worden gebruikt, dient te worden voorzien in een minimumventilatie. Een waarde tussen 0,05 en 0,1 l/s m² kan worden gebruikt als nationale reglementen en voorschriften niet beschikbaar zijn. Nationale voorschriften kunnen aanvullende ventilatie door verluchting toestaan, indien aan akoestische eisen kan worden voldaan, om in een zacht seizoen aan deze eisen te voldoen.

Bij systemen met een variabel volume en bij vraaggestuurde ventilatie mag het ventilatievoud variëren tussen het maximum voor volledige bezetting of het ventilatievoud waaraan behoefte is,

en het minimum voor een niet-bezette ruimte.

De norm bevat aanbevolen CO₂-concentratieniveaus voor een vraaggestuurd systeem (Tabel 8). Deze CO₂-gehalten liggen lager dan dat alleen benodigd is voor het ventileren door bezetting met mensen (tabel 9), omdat bepaalde additionele ventilatie inbegrepen is om rekening te kunnen houden met de emissies van gebouwen.

Ventilatie in woongebouwen

De ventilatie-eisen in woongebouwen voor energieberekeningen zijn in de meeste gevallen omschreven in nationale bouwbesluiten. De eisen kunnen ventilatievoudcriteria bevatten en voor lokale verontreinigingen in keukens, badkamers en toiletten. Ook in woongebouwen kan vraaggestuurde ventilatie worden gebruikt voor energieberekeningen, waarbij gebruik wordt gemaakt van de CO₂-concentratie of de luchtvochtigheid. Tabel 10 presenteert de waarden die worden aanbevolen in de norm.

BEOORDELING VAN HET BINNENKLIMAAT

Omdat de belasting van de gebouwen in ruimte en tijd varieert kan het zijn dat het ontworpen systeem niet in staat is om in alle ruimten gedurende de hele periode te voldoen aan de intenties van het ontwerp. Er is een behoefte om de bouwprestatie over het binnenklimaat op langere termijn te beoordelen. Daarnaast presenteert de norm indicatoren voor een dergelijke beoordeling en het gebruik daarvan.

Beoordeling van de thermische comfortcondities op lange termijn

Om de comfortcondities over een periode (seizoen, jaar) te beoordelen dient een optelling van de parameters

Categorie	Verwacht percentage ontevreden	Ventilatievoud per persoon (l/s persoon)	CO ₂ -niveau boven de buitenconcentratie (ppm)	Absolute CO ₂ bij 340 ppm buiten (ppm)
I	15	10	460	800
II	20	7	660	1.000
III	30	4	1.190	150
IV	>30	<4	>1.190	>1.530

Relatie tussen ventilatievouden per persoon en overeenkomstige CO₂-concentraties boven de buitenconcentratie.

- TABEL 9 -

Categorie	Ventilatievoud ^a		Woonkamer en slaapkamers, voornamelijk geventileerd met buitenlucht		Verontreiniging luchtstroom		
	l/s m ²	h ⁻¹	l/s persoon ^b	l/s m ²	keukens	badkamers	Toiletten
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1,0	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7

Onafgebroken inschakeling van de ventilatie in perioden waarin het gebouw wordt gebruikt. Volledige menging.
a De ventilatievouden uitgedrukt in l/s m² en h⁻¹ komen met elkaar overeen bij een plafondhoogte van 2.5 m.
b Het aantal gebouwgebruikers van een woongebouw kan worden geschat aan de hand van het aantal slaapkamers.
Als er aannamen op nationaal niveau zijn gemaakt dienen deze te worden gebruikt, deze kunnen variëren voor energie- en binnenluchtkwaliteitberekeningen.

Voorbeeld van ventilatievouden voor woongebouwen.

- TABEL 10-

Temperatuur	(°C)	PPD (%)	Weegfactoren	
			wf (°C)	wf (PPD)
Koel	20	47	3	4,7
	21	31	2	3,1
	22	19	1	1,9
Neutraal	23	10	0	0
	24	<10	0	0
	25	<10	0	0
	26	10	0	0
Warm	27	19	1	1,9
	28	31	2	3,1
	29	47	3	4,7

Voorbeelden van weegfactoren gebaseerd op een temperatuurverschil of PPD voor mechanisch verwarmde of mechanisch gekoelde gebouwen, in navolging van de aannamen die in de tekst worden genoemd.

- TABEL 11-

3 % / 5 % van de periode	dagelijks (min)	wekelijks (uren)	maandelijks (uren)	jaarlijks (uren)
Werkuren	15/24	1/2	5/9	61/108
Totale uren	43/72	5/9	22/36	259/432

Voorbeelden van duur van afwijkingen overeenkomend met 3 % en 5 % van de tijd.

- TABEL 12-

te worden gemaakt, gebaseerd op gemeten data in bestaande gebouwen of op dynamische computersimulaties. Verschillende methoden, zoals het percentage van de tijd buiten een bepaald gebied, "graad-uren" en PPD-gewogen uren worden tot dat doel aanbevolen. Tabel 11 illustreert het concept van graad-uren en PPD-gewogen uren. De weegfactoren zijn gebaseerd op het temperatuurverschil, wf (°C) en PPD, wf (PPD). Deze factoren worden getoond voor een comfortgebied van 23-26 °C, overeenkomend met zittende werkzaamheden (1,2 met) en dun-

ne zomerkleding (0,5 clo). Voor temperaturen boven of onder dit gebied zal het aantal uren met deze factoren worden vermenigvuldigd. Het gebruik van PPD-weegfactoren zal resulteren in een groter aantal uren. De waarden kunnen worden gebruikt voor de beoordeling van comfortcondities op lange termijn.

Aanbevolen criteria voor acceptabele afwijkingen

De beoordeling van het binnenklimaat van een gebouw wordt gemaakt door het binnenklimaat van karakteristieke

ruimtes te beoordelen die verschillende zones in het gebouw representeren. Er wordt aanbevolen dat 95 % van de ruimte (ruimten) moet voldoen aan de opgestelde criteria.

Beoordeling kan zijn gebaseerd op ontwerp, metingen of berekeningen. Als de criteria zijn gebaseerd op momentwaarden moeten variaties buiten het aanbevolen gebied acceptabel zijn voor korte perioden gedurende de dag. Er wordt om die reden aanbevolen dat de berekende of gemeten waarden 3 tot 5 % van de tijd (werkuren) buiten het gebied mogen liggen.

Tabel 12 toont de tijd die overeenkomt met een afwijking van 3 % (5 %), gebaseerd op werkuren en totale uren. Dit staat korte afwijkingen toe, dat wil zeggen dat wanneer een raam wordt geopend, de luchtsnelheid en het geluid die een korte tijd zullen zijn verhoogd, worden geaccepteerd. Het is bijvoorbeeld op het 5 % niveau acceptabel om temperaturen te hebben die 108 uur gedurende een jaar boven het criterium liggen, maar niet meer dan 24 minuten gedurende een werkdag en 2 uur gedurende een werkweek (tabel 12).

Algehele beoordeling van het binnenklimaat

Er is een behoefte om een indicator voor het totale binnenklimaat te introduceren waarbij rekening wordt gehouden met alle fysische parameters zoals warmte, luchtkwaliteit, geluid en licht. Dit dient samen met het energiecertificaat te worden gepresenteerd. Helaas is de kennis er niet om dat te doen. Allereerst zal het lastig zijn om

Criteria van binnenklimaat	Categorie van het gebouw	Ontwerpcriteria
Thermische condities in de winter	II	20 - 24 °C
Thermische condities in de zomer	III	20 - 27 °C
Indicator van de luchtkwaliteit, CO ₂	II	500 ppm boven de buitenconcentratie
Ventilatievoud	II	1 l/s m ²
Verlichting		Em > 500lx; UGR < 19; 80 < Ra
Akoestische omgeving		Binnengeluid <35 dB(A), geluid van buiten < 55 dB(A)

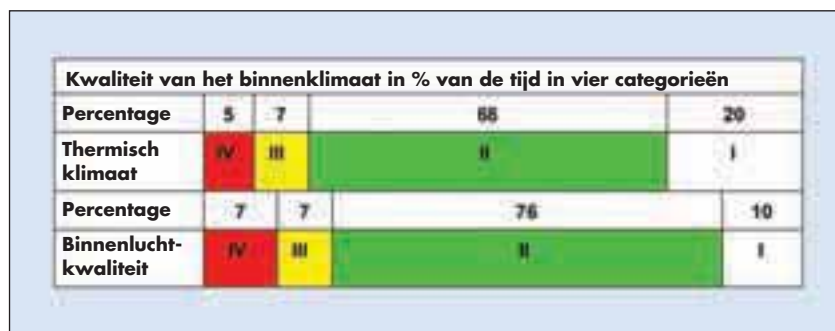
Classificatie gebaseerd op criteria voor energieberekeningen.

- TABEL 13-

weegfactoren toe te passen op de verschillende parameters. Zelfs als er gebruik wordt gemaakt van een schatting van ontevreden personen ontstaan er problemen, zoals we die kennen van de thermische omgeving en de binnenluchtkwaliteit. Het criterium voor de thermische omgeving is op een lager niveau van het voorspelde aantal ontevreden personen gebaseerd, dan het criterium voor de binnenluchtkwaliteit (tabellen 1 en 4). Voor de thermische omgeving zijn er mensen ontevreden als gevolg van het temperatuurniveau en verder zijn er mensen ontevreden als gevolg van lokaal thermisch discomfort. Daarnaast is er niet genoeg kennis over hoe deze waarden dienen te worden opgeteld. In de norm worden drie manieren voorgesteld om de totale kwaliteit van het binnenklimaat uit te drukken. Eén daarvan is gebaseerd op de omschreven ontwerpcriteria, zoals getoond is in tabel 13.

Een andere methode deelt de verdeling van ruimtetemperaturen en ventilatievoud op in vier categorieën, gebaseerd op computersimulaties of metingen gedurende een jaar of een seizoen. Een voorbeeld wordt getoond in figuur 3.

Ten slotte is het gebruik van subjectieve beoordelingen in de norm voorgesteld. Door gebruik te maken van alle of een aantal van de schalen die worden aanbevolen in een Annex, worden de gebouwgebruikers gevraagd op representatieve tijden van het jaar (winter, lente, zomer herfst) vragenlijsten in te vullen. Het percentage van de mensen dat acceptabel invult (thermische omgeving en luchtkwaliteit) wordt voor elk van de representatieve ruimten in de gebouwen berekend. Een gewogen



Voorbeelden van classificatie door "foot-print" van thermische kwaliteit en binnenluchtkwaliteit / ventilatie. De verdeling in de verschillende categorieën is gewogen aan de hand van het vloeroppervlak van de verschillende ruimten in het gebouw.

- FIGUUR 3-

gemiddelde, overeenkomend met het aantal personen in de verschillende ruimten, wordt berekend en gebruikt voor de classificatie. Meer details kunnen worden opgenomen door de verdeling van de beoordelingen op de zeven-punts thermische sensatieschaal te tonen en door het percentage personen te laten zien dat een hogere, geen veranderde of lagere ruimtetemperatuur wenst.

De totale kwaliteit kan, zoals in tabel 14 gepresenteerd, worden gebaseerd op een set van subjectieve beoordelingsschalen die aan de gebouwgebruikers worden voorgelegd op bepaalde momenten in het seizoen.

Economische indicator (opmerking: het is ofwel financieel ofwel economisch, zelden het laatste)

De criteria die in de norm zijn gepresenteerd houden niet direct rekening met de invloed van het binnenklimaat op de prestatie van personen. Veel onderzoeken hebben aangetoond dat de temperatuur, het ventilatievoud, het geluidsniveau en de verlichting een belangrijke invloed hebben op de prestatie van personen [16]. Bij een econo-

mische beoordeling van de wisselwerkingen tussen het binnenklimaat, en bijvoorbeeld verhoogde temperaturen in de zomer, comfort en energieprestatie, dient de prestatie van de gebouwgebruikers te worden meegenomen. Er zijn verschillende onderzoeken die relaties tussen ventilatievoud en prestatie, en tussen temperatuur en prestatie laten zien. Gebaseerd op een literatuuranalyse van Seppänen en Fisk [17] toont Figuur 4 een relatie tussen de prestatie en de ruimtetemperaturen voor ruimten die worden bezet door personen met voornamelijk zittende activiteiten en normale binnenkleding.

DANKBETUIGING

Dit werk werd ondersteund door de Europese Commissie voor Normalisatie (CEN) met een subsidie van de Europese Commissie, en voorzien van commentaar door de CEN-werkgroep TC 156 WG12 en nationale organisaties. In het bijzonder wil ik graag de Task Group bedanken (Olli Seppänen, Anne-Marie Bernard en Atze Boerstra).



Classificatie gebaseerd op antwoorden van gebouwgebruikers	Percentage						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Personen die het binnenklimaat acceptabel vinden				85			
Personen die de binnenlucht kwaliteit acceptabel vinden				80			
Verdeling van de stemmen voor de thermische sensatie	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	0	5	10	53	20	10	2
Verdeling van de voorkeur voor temperatuur	Kouder		Onveranderd			Warmer	
	20		75			5	

Voorbeelden van gebruik van de subjectieve reactie als classificatie van het binnenklimaat.

- TABEL 14 -

REFERENTIES

1. CEN EN15251, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings—addressing indoor air quality*, thermal environment, lighting and acoustics. Document for formal vote, 2006.
2. ASHRAE Standard 55-1992, *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE, Atlanta, 2005.
3. ASHRAE Standard 62-2001, *Ventilation for Acceptable Air Quality*, ASHRAE, Atlanta, 2004.
4. EN ISO 7730, *Moderate thermal environments—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort*, 2005.
5. CEN CR 1752-1998, *Ventilation for buildings—design criteria for the indoor environment*, Bruxelles, 1998.
6. ISO DIS 16814-2005, *Building environment design – indoor air quality – methods of expressing the quality of indoor air for human occupancy*, Geneva, 2005.
7. EN12831, *Heating systems in buildings—calculation of the heating load*, Bruxelles, 2003.
8. EN15243, *Dynamic calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems (including solar shading, passive cooling, position and orientation)*, Bruxelles, 2007.
9. EN ISO 9920, *Ergonomics of the thermal environment – estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*, Bruxelles, 2006.
10. EN ISO 8998, *Ergonomics – determination of metabolic heat production*, Bruxelles, 2004.
11. de Dear, *Thermal comfort in practice*, Indoor Air Journal 14 (7) (2004) 32–39.
12. K.J. McCartney, J.F. Nicol, *Developing an adaptive control algorithm for Europe: results of the scats project*, Energy and Buildings 34 (6) (2002) 623–635.
13. P. Wargocki, *Sensory pollution sources in buildings*, Indoor Air 14 (Suppl. 7) (2004) 82–91.
14. K.T. Papakostas, A.M. Papadopoulos, *Energy requirements for the treatment of fresh air in HVAC systems: a case study for Athens and Thessaloniki Int.*, Journal of Ventilation 3 (1) (2004) 33–40.
15. EN 12464-2002, *Light and lighting – lighting of work places*, Part 1, Indoor work places, Bruxelles, 2002.
16. R. Kosonen, F. Tan, *Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index*, Energy and Buildings 36 (10) (2004) 987–993.
17. O. Seppänen, W.J. Fisk, *Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health*, in: Proceedings of 9th International conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, September, 2005.

REHVA GUIDEBOOK NO 10:

Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design, ISBN 2-9600468-9-7. Uitgegeven door REHVA, Federation of European Heating and Airconditioning Associations.

Was men ongeveer dertig jaar geleden nog aangewezen op een proefkamer of schaalmodel om inzicht te krijgen in het stromingspatroon, temperatuurverdeling en verspreiding van luchtverontreinigingen in een geventileerde ruimte, dankzij het gebruik van snellere computers en aanbod van geavanceerde software, zijn deze voorspellingen momenteel steeds beter numeriek te benaderen met behulp van Computable Fluid Dynamics (CFD).

Dit in het Engels geschreven handboek is geschreven om Europese technici een degelijke en gemakkelijk te begrijpen publicatie aan te bieden over het gebruik van CFD. Het beschrijft een rekenmodel dat daaraan ten grondslag ligt. Getracht wordt de lezer vertrouwd te maken met de theoretische achtergronden en gebruikte afkortingen die van belang zijn voor de toepassing.

De voorspellingen van de luchtstroming zijn gebaseerd op het oplossen van de fundamenteel geformuleerde stromingsvergelijkingen zoals de behoudswetten voor massa, impuls (voor elke hoofdrichting één) en energie. Verder moet worden voldaan aan een diffusievergelijking voor de verdeling van verontreinigingen. De tur-

bulentie ter plaatse wordt daarbij uitgedrukt door middel van een variabele diffusiecoëfficiënt, dat de turbulente viscositeit wordt genoemd. Deze viscositeit wordt weer berekend uit twee aanvullende transportvergelijkingen, namelijk de vergelijking voor turbulente kinetische energie en de vergelijking voor dissipatie van turbulente kinetische energie.

Al met al wordt het stromingspatroon zodoende beschreven door acht aan elkaar gekoppelde niet lineaire differentiaalvergelijkingen. Oplossing is analytisch niet mogelijk maar alleen numeriek. Daarvoor wordt de ruimte verdeeld in cellen en de differentiaalvergelijkingen omgevormd naar eindige elementen formules voor elke cel. Als de beschouwde ruimte zou worden verdeeld in 90 x 90 x 90 cellen en de acht differentiaalvergelijkingen in discrete vergelijkingen zou dat 5,8 miljoen vergelijkingen opleveren met evenveel onbekenden. Voor het oplossen zijn ongeveer zeventien miljard iteraties nodig.

Het boek besteedt veel aandacht aan fundamentele achtergrondinformatie en hoe die numeriek kan worden benaderd. Een hoofdstuk apart wordt besteed aan de randvoorwaarden die ontstaan bij de begrenzen van de ruimte, obstakels in de ruimte, warmtebronnen en de toe- en afvoeropeningen voor de ventilatielucht. Aan de hand van voorbeelden wordt het gebruik van CFD dan verder verduidelijkt.

Vertrouwd raken met de inhoud van dit handboek vereist een grondige kennis van stromingsleer, naast het nodige doorzettingsvermogen.

Ir. K. te Velde