



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Programma van Eisen en Wensen voor het binnenmilieu

EOS-Facet

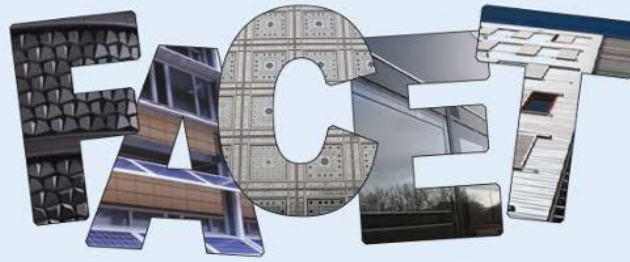
Datum Oktober 2011

TU Delft, Faculteit Bouwkunde, afdeling Bouwtechnologie,
Sectie Klimaatontwerp, Ing. S.R. Kurvers,
drs. J.L. Leijten, ir. A.K. Raue, ir. A.A. Alders

In opdracht van SenterNovem (nu Rijksdienst voor
Ondernemend Nederland)

Publicatienr RVO-173-1501/RP-DUZA
www.rvo.nl

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Economische Zaken.



Facade als Adaptief Comfortverhogend Energiebesparend Toekomstconcept

FACET-deelrapport 1.1/4.1

WP 1 Programma van Eisen en Wensen voor het binnenmilieu WP 4 Gebruikersaspecten

Datum	21 oktober 2011
Auteur(s)	ing. S.R. Kurvers drs. J.L. Leijten ir. A.K. Raue ir. A.A. Alders TU-Delft, faculteit Bouwkunde, afdeling Bouwtechnologie, Sectie Klimaatontwerp
Exemplaarnummer	<copy no>
Oplage	<no.of copies>
Aantal pagina's	40
Aantal bijlagen	<number of appendices>
Opdrachtgever	<Customer>
Projectnaam	FACET
Projectnummer	ABA01G

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van de auteurs.

Inhoudsopgave

Verantwoording	4
1 Inleiding	5
1. Thermisch comfort	6
1.1. Comforttemperatuur:.....	6
2.2. Free Running modus:.....	7
2.2.1. Toelichting comforttemperatuur.....	7
2.2.2. Interpretatie temperatuuroverschrijdingsberekeningen.....	9
2.3. Verhoogde lichtsnelheden bij Top > 25°C.....	9
2.3.1. Toelichting verhoogde lichtsnelheden.....	9
2.4. Beïnvloeding van temperatuur.....	10
2.4.1. Toelichting beïnvloeding temperatuur.....	10
2.5. Temperatuurvariatie.....	10
2.6. Temperatuurvariatie binnen een dag.....	10
2.7. Temperatuurvariatie tussen twee opeenvolgende dagen.....	11
2.7.1. Toelichting temperatuurvariatie.....	11
2.8. Lichtsnelheid door mechanische ventilatie.....	11
2.8.1. Toelichting lichtsnelheid mechanische ventilatie.....	11
2.9. Stralingstemperatuurasymmetrie.....	11
2.9.1. Toelichting stralingsasymmetrieverschil.....	11
2.10. Verticale temperatuurgradiënt.....	11
2.10.1. Toelichting verticale temperatuurgradiënt.....	12
2.11. Maximale luchttemperatuur t.b.v. ervaren luchtkwaliteit.....	12
2.11.1. Toelichting maximale luchttemperatuur t.b.v. ervaren luchtkwaliteit.....	12
2. Luchtkwaliteit	13
2.1. Ventilatie.....	13
2.2. Mechanische ventilatie.....	13
2.2.1. Toelichting mechanische ventilatie.....	13
2.3. Hybride of natuurlijke ventilatie:.....	13
2.3.1. Toelichting hybride of natuurlijke ventilatie.....	13
2.4. Ventilatie vergaderruimten.....	14
2.4.1. Toelichting ventilatie vergaderruimten.....	14
2.5. Verontreinigingen buitenlucht.....	14
2.6. Verontreinigingen ventilatiesysteem.....	15
2.7. Luchtinlaatfilters.....	15
2.7.1. Toelichtingluchtinlaatfilters.....	15
2.8. Luchttoevoerkanalen.....	16
2.8.1. Toelichting luchttoevoerkanalen.....	16
2.9. Luchtbevochtiging:.....	16
2.9.1. Toelichting luchtbevochtiging.....	16
2.10. Koeling van de ventilatielucht.....	16
2.10.1. Toelichting koeling.....	17
2.11. Recirculatie.....	17
2.11.1. Toelichting recirculatie.....	17
2.12. Warmtewiel.....	17
2.12.1. Toelichting warmtewiel.....	17
2.13. Bouw- en inrichtingsmaterialen.....	18

2.14.	Enthalpie.....	19
2.14.1.	Toelichting enthalpie.....	19
2.15.	Beïnvloeding luchtkwaliteit	19
2.15.1.	Toelichting beïnvloeding luchtkwaliteit	19
3.	Overige onderzoeksvragen	21
4.	Literatuur	26
1.	Bijlage 1: Achtergronden thermisch comfort	28

Concept

Verantwoording

In dit rapport wordt het “programma van eisen en wensen voor het binnenmilieu” beschreven dat onderdeel is van Werkpakket 1.1. Tevens wordt in dit rapport het programma van eisen gebruikersaspecten” beschreven, dat onderdeel is van Werkpakket 4.1. Er is gekozen om de vragen uit de Werkpakketten 1.1 en 4.1 samen te beantwoorden, omdat bij het formuleren van eisen voor het binnenmilieu gebleken is dat een comfortabel en gezond binnenmilieu alleen te realiseren is als aan zowel de fysische omgeving als aan het gebruik en de beïnvloeding van de omgeving eisen worden gesteld. Daarom is een geïntegreerde benadering noodzakelijk.

Concept

1 Inleiding

In de volgende hoofdstukken worden voor de verschillende deelonderwerpen de eisen en wensen gegeven voor een comfortabel, gezond en productief binnenmilieu. Bij iedere eis of wens wordt een korte onderbouwing gegeven. Deze onderbouwing is weer gebaseerd op een uitgebreidere literatuurstudie die een beeld geeft van de huidige kennis (state of the art) op het gebied van het binnenmilieu (zie Literatuuronderzoek naar State of the Art Programma van Eisen voor het Binnenmilieu, FACET-deelrapport ..).

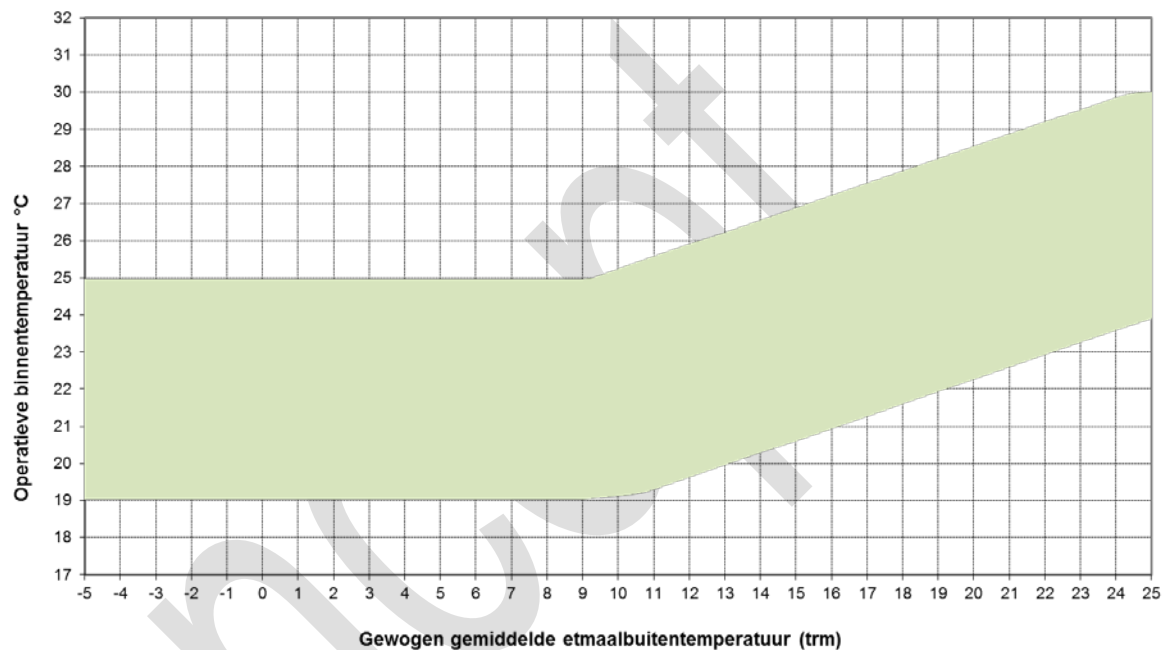
De eisen en wensen gelden in principe voor kantoren, woningen en scholen voor activiteiten met een lage lichamelijke inspanning (activiteitsniveaus van circa 1 tot 1,3 Met). Daar waar afwijkende waarden gelden voor kantoren, woningen of scholen zal dat separaat worden vermeld.

De eisen gelden dus niet voor gebouwen en ruimten waar zwaardere lichamelijke inspanning wordt verricht, zoals in fabrieken, werkplaatsen of waar extreme fysische omstandigheden voorkomen, zoals zeer hoge lucht- en stralingstemperaturen of zeer hoge luchtvochtigheden.

1. Thermisch comfort

1.1. Comforttemperatuur:

- De *operatieve temperatuur* ligt binnen de aangegeven bandbreedte van figuur 1.
- De bandbreedte mag maximaal 5% van de tijd worden overschreden, omdat deze incidentele overschrijdingen, als gevolg van toevallige combinaties van factoren, niet of nauwelijks door de gebruikers zullen worden opgemerkt.



Figuur 1: Bandbreedte voor de operatieve binnentemperatuur, afhankelijk van de gewogen gemiddelde buitentemperatuur t_{rm} .

Toelichting op figuur 1:

- Op de verticale as is de operatieve binnentemperatuur weergegeven (gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur).
- Op de horizontale as is de gewogen gemiddelde buitentemperatuur weergegeven. De relatie tussen de door gebouwgebruikers verwachte en acceptabele binnentemperatuur (in niet-gekoelde gebouwen) en de buitentemperatuur wordt weergegeven met de 'running mean outdoor temperature', t_{rm} , waarbij de gemiddelde dagtemperaturen worden gewogen op basis van de tijd tot vandaag.

$${}_n t_{rm} = 0,2 \cdot t_{od-1} + 0,8 \cdot {}_{n-1} t_{rm} \quad (^\circ\text{C})$$

${}_n t_{rm}$ = de 'running mean outdoor temperature' op dag n, en ${}_{n-1} t_{rm}$ die van de dag ervoor.

t_{od-1} = gemiddelde van dagmaximum en dagminimum gisteren

- De bandbreedtes worden begrensd door de volgende vergelijkingen:
 - $\Theta_i \text{ max} = 0,33\Theta_{rm} + 21,8 \quad (^\circ\text{C})$

$$\cdot \Theta_{i \text{ min}} = 0,33\Theta_{m} + 15,8 \quad (^\circ\text{C})$$

2.2. Free Running modus:

Het klimaatsysteem (gebouw en installaties) is over een zo groot mogelijk gebied van de 'running mean outdoor temperature' (t_{m}) free running, dat wil zeggen dat er geen actieve verwarming of koeling¹ wordt toegepast.

Om dat mogelijk te maken wordt in onderstaande stappen het gebouwontwerp bouwfysisch geoptimaliseerd:

1. Het door de schil toelaten van zoveel mogelijk gewenste zoninstraling, koude en warmte en het weren van zoveel mogelijk ongewenste zoninstraling, koude en warmte. Hierbij wordt gebruik gemaakt van thermisch actieve massa (opslag/vertraagde afgifte).
2. Het ondersteunen van passieve klimaatbeheersing met regelbare (bij voorkeur door de gebruiker) te openen ramen, nachtventilatie, dwarsventilatie en zonwering.
3. Verder ondersteunen van passieve klimaatbeheersing bijvoorbeeld een actieve gevel, Phase Change Materials, betonkernactivering of variabele isolatie.

In de gebruiksfase worden de maatregelen bij voorkeur in de volgende volgorde toegepast.

- a. Wanneer bij een lage (t_{m}) de comfortgrenzen worden overschreden, wordt verwarmingsvermogen aangewend.
- b. Wanneer bij een hoge (t_{m}) de comfortgrenzen worden overschreden, wordt eerst door middel van het verhogen van de luchtsnelheid de comfortgrens verhoogd, conform figuur 2 (door middel van *door bewoners te bedienen* open ramen, ventilatoren of andere middelen waarmee de luchtsnelheid kan worden verhoogd).
- c. Wanneer bij een hoge (t_{m}) de comfortgrenzen worden overschreden en het toepassen van een verhoogde luchtsnelheid onvoldoende effect heeft, of niet mogelijk is, wordt actief koelvermogen aangewend.

2.2.1. Toelichting comforttemperatuur

In de huidige normen (NEN-EN15251, 2007, ASHRAE 55, 2010) is de adaptieve benadering een aanvullende mogelijkheid, wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast en beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is. In alle andere gevallen wordt het PMV-model voorgeschreven. In ISSO74 (ISSO, 2004) wordt onderscheid gemaakt tussen Alpha- en Bètaklimaten. Een Alphaklimaat kan worden ontworpen wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast, beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is en de kledingisolatie kan worden gevarieerd. Een Bètaklimaat kan worden ontworpen als er mechanische koeling is en er geen beïnvloedingsmogelijkheden zijn. Achtergrond hierbij is de aanname dat mensen adapteren aan hogere temperaturen als de buitentemperaturen ook hoger zijn. Wordt er koeling toegepast dat treedt deze adaptatie in mindere mate op. Omgekeerd geredeneerd blijken bewoners te wennen aan een gekoeld binnenklimaat. De tevredenheid in deze gebouwen is echter niet hoger en in de meeste gevallen lager dan in niet gekoelde gebouwen. Er wordt dus energie gebruikt om lagere temperaturen te realiseren, terwijl dat niet tot een comfortverhoging, maar eerder tot meer gezondheidssymptomen en een lager comfort leidt (o.a. Arens, 2010, Humphreys, 2010, Mendell, 2009, Nicol, 2009, Hellwig, 2006, Leaman, 2001).

¹ Koeling of verwarming wordt gezien als actief als er hiervoor externe energie wordt aangewend (elektriciteit, gas, langdurig opgeslagen warmte). Hulpenergie voor pompen, ventilatoren et cetera wordt gezien als een tussenstap.

Daarom ligt het voor de hand een gewenst binnenklimaat te definiëren dat is gebaseerd op uitsluitend een adaptieve benadering. Alle analyses van databases naar adaptief thermisch comfort hebben de zelfde overeenkomsten:

- Als er niet verwarmd of gekoeld wordt, dus in de free-running modus, is er een samenhang tussen de buiten- en binnentemperatuur.
- De comforttemperatuur neemt boven een gemiddelde buitentemperatuur van circa 10-12°C toe met de buitentemperatuur.
- Op de verticale as is de operationele binnentemperatuur weergegeven (gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur).
- Op de horizontale as is de gewogen gemiddelde buitentemperatuur weergegeven.

Er wordt hier daarom niet voor een binnenklimaat gekozen dat wordt gedefinieerd door het PMV-PPD-model of een bètabinnenklimaat zoals in ISSO-74 (ISSO, 2004). Er wordt hier uitgegaan van een binnenklimaat op basis van de Europese database, het SCATs-onderzoek, waarop ook de NEN-EN15251 is gebaseerd (NEN-EN, 2007, Nicol & Humphreys, 2010).

Er zijn verschillende manieren om adaptieve temperatuurgrenzen toe te passen:

- Drie kwaliteitsklassen met 90%, 80%, 65% acceptatie. Dit is gedaan bij de NEN-EN15251, de ASHRAE 55 en de ISSO-74. De ASHRAE-55 en de ISSO-74 zijn gebaseerd op de RP-884 database met gebouwen verspreid over de wereld, terwijl de NEN-EN15251 is gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek in Europese gebouwen. Recent onderzoek (Arens et al, 2010) laat zien dat in werkelijke omgevingen de gebruikers geen onderscheid ervaren tussen de verschillende klassen.
- Drie kwaliteitsklassen toepassen, maar dit afhankelijk laten zijn van de adaptieve mogelijkheden. Naarmate mensen meer adaptieve mogelijkheden hebben de omgeving aan te passen via te openen ramen, ventilatoren, zonwering, etc. en ook de kleding te variëren zijn ze beter in staat de comforttemperatuur en de heersende temperatuur met elkaar in overeenstemming te brengen. Daarom is het een mogelijkheid een ruimere bandbreedte te hanteren bij veel adaptieve mogelijkheden en een nauwere bandbreedte bij weinig adaptieve mogelijkheden. Er zijn echter geen onderzoeken waarin dit is getoetst en de beschrijving van de adaptieve mogelijkheden vereist zeer grote nauwkeurigheid om misinterpretaties te voorkomen (Nicol, 2010).
- Eén bandbreedte toepassen in plaats van drie. Minimaal 80% vindt het dan acceptabel. Naarmate er meer adaptieve mogelijkheden zijn en de temperatuur voorspelbaarder is zal het comfortniveau hoger worden. In de meeste gevallen is de voorspelbaarheid voor de gebruikers het grootst bij wanneer de klimaatregeling zoveel mogelijk passief plaats vind. Bij actieve regelingen is de kans groter dat de temperatuur door het systeem zodanig bijgeregeld wordt dat dit niet conform het (onbewuste) verwachtingsniveau van de bewoners aansluit.

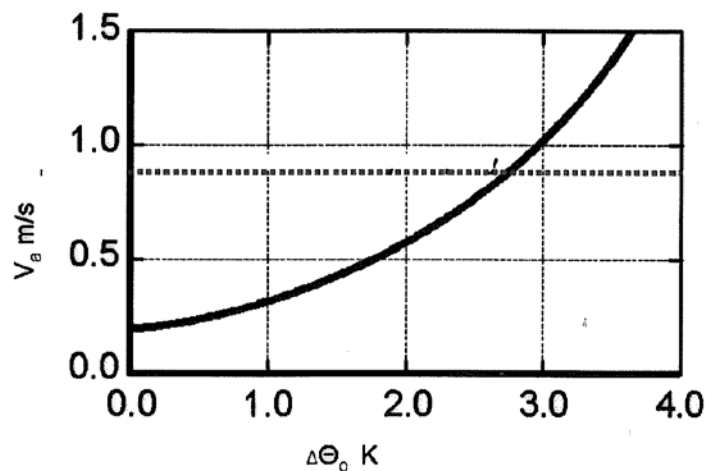
Daarom is hier gekozen om één bandbreedte te hanteren, gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek. Een bandbreedte zorgt voor minimaal 80% acceptatie.

2.2.2. Interpretatie temperatuuroverschrijdingsberekeningen

De resultaten van temperatuuroverschrijdingsberekeningen moeten met “gevoel” worden geïnterpreteerd, waarbij rekening wordt gehouden met de onzekerheden en de probabilistische verdelingen van de invoervariabelen en de invloed op de uitkomsten. Een overschrijding van 5% is toelaatbaar om te kunnen compenseren voor onzekerheden in de invoer en de modellen (NEN-EN15251). Overschrijdingen van de bandbreedte worden verminderd en weggenomen door bijvoorbeeld het vergroten de thermische massa, het beperken van interne en externe warmtelast, het bevorderen van persoonlijke beïnvloedingsmogelijkheden door goed bruikbare te openen ramen en het ontwerpen van installaties die overschrijdingen “vriendelijk” verminderen of een adaptieve gevoel.

2.3. Verhoogde lichtsnelheden bij $T_{op} > 25^{\circ}\text{C}$

Wanneer de $T_{op} > 25^{\circ}\text{C}$ kan door het verhogen van de lichtsnelheid de bovengrens van het comfortgebied enkele graden worden verhoogd conform onderstaande grafiek. De lichtsnelheid neemt toe met een hoeveelheid die voldoende is om dezelfde warmtestroom van de huid te realiseren.



Figuur 2: Toelaatbare verhoging van de bovengrens van het comfortgebied bij $T_{op} > 25^{\circ}\text{C}$, afhankelijk van de lichtsnelheid.

2.3.1. Toelichting verhoogde lichtsnelheden

Acceptatie van de hogere lichtsnelheden door de gebruikers vereist handmatig regelbare plafondventilatoren, tafelventilatoren, “deskjets” of andere “personal ventilation systems”. Figuur 2 geldt voor een metabolisme van circa 1 - 1,3 Met en kleding van circa 0,5 – 0,7 clo. De waarden gelden voor omstandigheden waar de lucht- en stralingstemperatuur niet meer van circa 2°C van elkaar verschillen. Wanneer de gemiddelde stralingstemperatuur laag is en de luchttemperatuur hoog, dan is de hogere lichtsnelheid minder effectief bij het verhogen van het warmteverlies van de huid. De verhoogde lichtsnelheid wordt effectiever bij het vergroten van het warmteverlies van de huis, wanneer de gemiddelde stralingstemperatuur hoog is en de luchttemperatuur laag.

Voor omstandigheden met grotere verschillen tussen lucht- en stralingstemperatuur wordt verwezen naar de meer gedetailleerde methode beschreven in ASHRAE standard 55, hoofdstuk 5.2.3 (ASHRAE, 2010).

2.4. Beïnvloeding van temperatuur

- De temperatuur dient via een te openen deel regelbaar en tochtvrij te kunnen worden beïnvloed.
- Per maximaal 4 werkplekken is er één bedienbare regelmogelijkheid waarmee de temperatuur door de werknemers met + en - 2,5°C bijgesteld kan worden ten opzichte van de berekende comforttemperatuur. Met deze regelmogelijkheid kan de temperatuur voldoende merkbaar en snel veranderd worden (feedback).

2.4.1. Toelichting beïnvloeding temperatuur

De gebruiker heeft bij voorkeur de mogelijkheid invloed uit te oefenen op lichtomstandigheden, temperatuur, luchtverversing en lawaai en kan afweging maken tussen invloed op lawaai of invloed op de temperatuur.

Om de bruikbaarheid van de bediening van de diverse voorzieningen te waarborgen moet aan de volgende uitgangspunten worden voldaan. Beïnvloedingsmogelijkheden moeten:

- worden aangebracht in de buurt van de systemen / in de ruimten die ermee bediend kunnen worden.
- goed zichtbaar en bereikbaar zijn.
- gebruiksvriendelijk vanuit het perspectief van de gebruiker (niet alleen de ontwerper).
- begrijpelijk zijn; liefst intuïtief / zonder uitleg, ook voor mensen die ze voor het eerst of sporadisch gebruiken.
- aangeven wat ermee beïnvloed kan worden.
- merkbaar effectief zijn.
- direct feedback geven als ze worden ingesteld.
 - Bij voorkeur is de verandering zelf direct merkbaar (bijvoorbeeld: het licht gaat uit).
 - als het langer duurt voor de regelactie merkbaar wordt (bijvoorbeeld verwarming) wordt feedback gegeven bijvoorbeeld d.m.v. een lampje.
- te allen tijde de status van het systeem aangeven.
- voldoende mogelijkheden geven om de instelling te verfijnen.
- niet absoluut zijn en geen nauwkeurigheid suggereren die er niet is.
- volledig in bedrijf gesteld worden bij oplevering.
- goed ingeregeld worden bij oplevering.

Ter verbetering van de energiebesparing kunnen de volgende mogelijkheden nog geïntegreerd worden:

- Automatische aanwezigheidssensoren gecombineerd met knoppen.
- Intervaltimers met uit/aan knoppen en andere noodzakelijke mogelijkheden om de automatische actie op te heffen door de gebruiker.
- Mogelijkheid van de interface tot het geven van niet bindend advies.

2.5. Temperatuurvariatie

2.6. Temperatuurvariatie binnen een dag

- De operationele temperatuur mag over de dag maximaal 2-3K variëren (Wagner, 2006, Nicol, 2009).

- Cyclische temperatuurvariaties met een periode van korter dan 15 minuten mogen maximaal 1,1K bedragen (ASHRAE, 2010)

2.7. Temperatuurvariatie tussen twee opeenvolgende dagen

Omdat mensen hun kledingisolatie van dag tot dag maar geleidelijk blijken te veranderen, mag het temperatuurverschil tussen twee opeenvolgende dagen maximaal 1K zijn en maximaal 3K over een week (Nicol, 2009).

2.7.1. Toelichting temperatuurvariatie

Temperatuurvariaties als gevolg van persoonlijk instelbare regelmogelijkheden zullen meestal door de bewoners worden geaccepteerd, zolang de temperaturen binnen het comfortgebied aangegeven in Figuur 1 blijft. Temperatuurvariaties die het gevolg zijn van actieve regelingen (installaties) zullen veel minder snel worden geaccepteerd.

2.8. Luchtsnelheid door mechanische ventilatie

De luchtsnelheid mag niet meer mag bedragen dan 0,11 en 0,15 m/s bij een luchttemperatuur van respectievelijk 20 en 24°C en een turbulentieintensiteit van 40%.

2.8.1. Toelichting luchtsnelheid mechanische ventilatie

Luchtstroming die niet door de werknemers beïnvloed kan worden, bijvoorbeeld ten gevolge van mechanische ventilatie, hybride ventilatie en/of koudeval, kan door de combinatie van luchttemperatuur, luchtsnelheid en turbulentie-intensiteit tot tocht leiden. Er is consensus dat het theoretisch percentage ontevreden ten gevolge van tocht maximaal 10% mag bedragen ($PD_{tocht} \leq 10\%$).

Het gaat hier *alleen* om tocht als gevolg van luchtstroming die niet door de gebruiker kan worden beïnvloed, dus *niet* als gevolg van te openen ramen of individueel regelbare systemen.

2.9. Stralingstemperatuurasymmetrie

Het verschil in stralingstemperatuur uit de drie tegenover elkaar liggende richtingen mag niet meer zijn dan:

- <5°C bij warm plafond (klimaatplafond)
- <10°C bij koud verticaal vlak (raam)
- <15°C bij koud plafond (koelplafond)
- <25°C bij warme wand (wandverwarming)

2.9.1. Toelichting stralingsasymmetrieverval

Het thermische stralingsveld rond het lichaam mag tot op zekere hoogte niet-uniform zijn als gevolg van warme en koude oppervlakken en direct zonstraling. Te grote asymmetrie kan plaatselijk discomfort veroorzaken en de acceptatie voor het binnenklimaat als geheel verlagen. Mensen zijn gevoeliger voor thermische straling veroorzaakt door een warm plafond dan voor straling veroorzaakt door koude of warme verticale vlakken. Bovengenoemde maximum waarden gaan uit van een PPD van ongeveer 5%.

2.10. Verticale temperatuurgradiënt

Het verschil in luchttemperatuur tussen 1,10 en 0,10 m boven de vloer mag niet meer bedragen dan 3°C.

2.10.1. Toelichting verticale temperatuurgradiënt

In de meeste ruimten neemt de luchttemperatuur vanaf de vloer tot aan het plafond toe. Als de toename te groot is zal de ruimte als onbehaaglijk worden ervaren: het hoofd is te warm en/of de voeten zijn te koud en dit kan de acceptatie voor het binnenklimaat als geheel verlagen. Als grenswaarde wordt uitgegaan van een PPD van maximaal 5%.

2.11. Maximale luchttemperatuur t.b.v. ervaren luchtkwaliteit

Gedurende het stookseizoen is de luchttemperatuur maximaal 21°C. Het verwarmingssysteem is zodanig ontworpen dat hieraan wordt voldaan terwijl gelijktijdig aan de andere criteria voor thermisch comfort wordt voldaan. Gebouwgebruikers die met hun thermostaat een hogere temperatuur instellen krijgen een hogere stralingstemperatuur aangeboden (en zodoende een hogere operationele temperatuur) terwijl de luchttemperatuur niet of nauwelijks hoger wordt dan 21°C .

2.11.1. Toelichting maximale luchttemperatuur t.b.v. ervaren luchtkwaliteit

Uit laboratoriumonderzoek blijkt dat tijdens het stookseizoen een hogere enthalpie (warmte inhoud) van de binnenlucht tot minder tevredenheid over de luchtkwaliteit leidt. De enthalpie kan beperkt worden door de luchttemperatuur te beperken tot 21°C. Uit veldonderzoeken blijkt dat in het stookseizoen bij een luchttemperatuur hoger dan 21°C de tevredenheid over de luchtkwaliteit afneemt en lichamelijke klachten toenemen. In het algemeen kan aan deze aanbeveling alleen voldaan worden wanneer stralingsverwarming (bijvoorbeeld radiatoren, stralingswanden, stralingsplafonds of vloerverwarming) wordt toegepast.

2. Luchtkwaliteit

2.1. Ventilatie

Er is voldoende ventilatie met verse buitenlucht, ofwel door mechanische ventilatie, ofwel door hybride of natuurlijke ventilatie.

2.2. Mechanische ventilatie

Mechanische ventilatie begint één uur vóór werktijd en eindigt één uur na werktijd.

Indien werknemers aanwezig zijn bedraagt deze $40 \text{ m}^3 / \text{uur} \cdot \text{persoon}$.

Indien in de ruimte geen werknemers aanwezig zijn, bedraagt deze $2,5 \text{ m}^3 / \text{uur} \cdot \text{m}^2$ vloeroppervlak.

Indien de ventilatie-effectiviteit (ϵ_v) lager is dan 1, moet de benodigde ventilatiehoeveelheid vermenigvuldigd worden met $1 / \epsilon_v$.

2.2.1. Toelichting mechanische ventilatie

Uit laboratoriumonderzoek blijkt dat een ventilatie van 36 m^3 verse lucht per uur per persoon het aantal ontevredenen 15% is, in een situatie waar personen de enige vervuilingbron zijn. In de praktijk kan het aantal ontevredenen lager zijn omdat bij luchtvervuiling afkomstig van personen er een zekere mate van adaptatie plaatsvindt. Omdat er in de praktijk meestal meer vervuilingbronnen zijn, is een zekere veiligheidsmarge gewenst.

Uit veldonderzoeken in kantoren blijkt dat bij een ventilatie lager dan 36 m^3 verse lucht per uur per persoon duidelijk meer klachten voorkomen dan bij een hogere ventilatie. In deze grens zit een spreiding, dus ook hier is een zekere veiligheidsmarge gewenst. Om deze veiligheidsmarge te scheppen, is een voorkeurswaarde van 40 m^3 verse lucht per uur per persoon gekozen. Dit veronderstelt dat zoveel mogelijk wordt voldaan aan de hieronder beschreven adviezen voor bronaanpak in het gebouw en in de installaties. Deze waarde wordt ook gehanteerd door de Rijksgebouwendienst, en komt bij gebruikelijke ruimteafmetingen overeen met 2-voudige ventilatie.

De waarden bij afwezigheid van personen, maar tijdens gebruikstijd, komen, op een kleine afronding na, overeen met de waarden in NEN 15251 voor *low polluting buildings*.

2.3. Hybride of natuurlijke ventilatie:

Gedurende verblijfstijd is er een ventilatie mogelijk (afhankelijk van de stand van de te openen ramen) van minimaal 30 m^3 verse lucht per uur per persoon, mits:

- geen vervuilingbronnen (bevochtiging, koeling, warmtewiel, recirculatie etc.) in het ventilatiesysteem
- minimalisering van vervuilingbronnen (inrichtingsmaterialen, kantoorapparatuur) in de werkruimten
- rookvrije werkruimten
- de luchttemperatuur in het stookseizoen is maximaal 21°C

2.3.1. Toelichting hybride of natuurlijke ventilatie

Uit laboratorium- en veldonderzoek blijkt dat wanneer de vervuilingbronnen minimaal zijn en de enthalpie (warmte-inhoud) van de lucht laag wordt gehouden, met een lagere ventilatie dezelfde luchtkwaliteit gerealiseerd kan worden (Fang et al,

2004). De eis aan de luchttemperatuur impliceert een keuze voor stralingsverwarming.

2.4. Ventilatie vergaderruimten

Vergaderruimten hebben 4-voudige ventilatie met *verse lucht*. Eventuele behoefte-afhankelijke ventilatie wordt gerealiseerd door aanwezigheidsmeting, niet door CO₂-meting. In het geval van behoefte-afhankelijke ventilatie is er vanaf 1 uur vóór openingstijd tot einde openingstijd minimaal 2-voudige ventilatie met *verse lucht*.

2.4.1. Toelichting ventilatie vergaderruimten

Het ventilatiehoeveelheid is aangepast aan de gemiddeld hogere bezetting dan in kantoorruimten. Bij behoefte-afhankelijke ventilatie op basis van CO₂-meting loopt de ventilatie achter op de behoefte. Minimaal 2-voudige ventilatie is nodig om bij aanvang van vergaderingen voldoende luchtkwaliteit te waarborgen.

Rookruimten voldaan aan het volgende:

- 6-voudige mechanische afzuiging
- afsluitbare deur
- luchttoevoer via voldoende brede spleet onder de deur
- te openen ramen
- zo weinig mogelijk textiele materialen
- de locaties en de omvang zijn afgestemd op het gebouw en de kenmerken van de gebruikers.

2.5. Verontreinigingen buitenlucht

Ongewenste verontreinigingen uit de buitenlucht moeten voorkomen of weggenomen worden. Om ongewenste verontreinigingen te voorkomen zijn de volgende maatregelen noodzakelijk:

De aanzuigopeningen voor verse buitenlucht zijn zo gesitueerd dat de lucht die binnenkomt zo zuiver mogelijk is. Daarbij wordt gelet op de afwezigheid van bronnen van vervuiling, zoals verkeer, sommige planten en bomen, en afvoeropeningen, schoorstenen, koeltorens, dakmateriaal en dergelijke van het eigen of van andere gebouwen.

Bij het wegnemen van ongewenste verontreinigingen gaat het in elk geval om verontreinigingen die (dodelijke) ziekte kunnen veroorzaken. Hierbij moet in de binnenlucht in elk geval worden voldaan aan het volgende:

Radon (Rn): maximaal 100 Bq/ m³
Koolmonoxide (CO): maximaal 2000 µg/ m³
Fijnstof: maximaal 20 µg/ m³
Ozon (O₃): maximaal 20 µg/ m³

Toelichting verontreinigingen buitenlucht

De waarden voor radon, koolmonoxide en fijnstof zijn de strengste waarden die voorkomen in richtlijnen, voor maximale bescherming van de gezondheid.

Voor ozon geldt dat het net alleen op zichzelf een schadelijk agens is, maar dat het in de binnenlucht reageert met VOC's (volatile organic compounds) en andere verontreinigingen. Hierbij worden nieuwe verbindingen gevormd, waaronder formaldehyde, waterstofperoxide en ook ultra-fijne deeltjes. Deze producten zijn niet alleen zelf irriterender dan de VOC's, maar staan ook aan het begin van een

langere reeks chemische reacties die tot nog irriterender producten leiden. Dit wordt *indoor smog* genoemd. (Weschler, 2004)

2.6. Verontreinigingen ventilatiesysteem

In het geval van mechanische ventilatie worden door het ventilatiesysteem geen verontreinigingen aan de ventilatielucht toegevoegd. In het geval van hybride of natuurlijke ventilatie worden door eventuele ventilatieroosters (met suskasten) in de gevel geen verontreinigingen aan de ventilatielucht toegevoegd.

2.7. Luchtinlaatfilters

De beste oplossing, die nog ontwikkeld moet worden:

Luchtinlaatfilter, waarbij geen opslag van de gefilterde vervuiling in de luchtstroom plaatsvindt, waarin geen microbiologische groei plaats kan vinden en waarbij zo weinig mogelijk ozon wordt doorgelaten of toegevoegd aan de ventilatielucht.

In elk geval uitgaande van bestaande techniek:

- De luchtinlaat en de filtersectie zijn zodanig dat het filter is afgeschermd tegen regen.
- Er is een druppelvanger.
- De filters zijn voorzien van voorverwarming.
- De hoofdfilters zijn minstens van filterklasse EU 7.
- Er is een koolstoffilter vóór en/of na het hoofdfilter of een hoofdfilter waarin koolstof verwerkt is.

2.7.1. Toelichtingluchtinlaatfilters

Gebruikte luchtinlaatfilters zijn een belangrijke bron van luchtverontreiniging (Bluyssen, 2001). Op de eerste plaats vormt een vervuild filter een groot chemisch reagerend oppervlak dat kan bijdragen aan de vorming van *indoor smog* (Weschler, 2002; Weschler, 2004; Clausen, 2004; Bekö et al., 2006). Daarnaast kan in een vervuild filter microbiologische groei plaatsvinden. Hansen (2004) geeft aanwijzingen voor de locatie en de dimensionering van de luchtinlaatsectie om dit te voorkomen.

Enkele recente publicaties laten het volgende zien:

Buchanan et al. (2008): veldonderzoek dat laat zien dat de combinatie van een hoge ozonconcentratie in de buitenlucht met het gebruik van een polyester/synthetisch filter i.p.v. een fiberglas filter tot meer lichamelijke klachten leidt. Apte et al. (2008) gebruikt dezelfde data en gaat verder in op het verband tussen de ozonconcentratie in de buitenlucht en lichamelijke symptomen. Hoewel uit deze onderzoeken geen causale conclusies getrokken kunnen worden, steunen zij de hypothese dat ozon uit de buitenlucht bijdraagt aan de vorming van *indoor smog*. Verder geeft het aan dat het filtermateriaal uit kan maken voor het optreden van symptomen.

Bekö et al. (2008) is een experimenteel onderzoek waarbij een aantal combinaties van hoofdfilters en eventuele voor en nafilters in nieuwstaat en na 5 maanden gebruik met elkaar worden vergeleken. De afhankelijke variabele is de *acceptability* van de gefilterde lucht beoordeeld door proefpersonen. In nieuwstaat zijn er weinig verschillen tussen de combinaties, maar na 5 maanden gebruik scoort de combinatie van een EU7 hoofdfilter met een koolstoffilter vóór en na het gunstigst. Een enkelvoudig fiberglasfilter waarin koolstof verwerkt is scoort relatief gunstig. Ook dit ondersteunt de hypothese dat ozon uit de buitenlucht bijdraagt aan de vorming van *indoor smog*.

2.8. Luchttoevoerkanalen

- Onderdelen voor kanalen worden vetvrij aan de binnenkant geleverd en tot montage geseald bewaard.
- Gedurende de montage van het luchtbehandelingssysteem wordt verontreiniging van het systeem voorkomen.
- Voor de ingebruikname wordt het luchtbehandelingssysteem waar nodig gereinigd van bouwstof en –afval.
- Alle onderdelen van het ventilatiesysteem zijn eenvoudig toegankelijk voor reiniging.
- De toevoerkanalen van de luchtbehandelingsinstallatie zijn niet aan de binnenzijde voorzien van isolatiemateriaal.

2.8.1. Toelichting luchttoevoerkanalen

Alle onderdelen van het ventilatiesysteem kunnen verontreinigd raken en daardoor zelf vervuilingbron worden. Inwendige isolatie van de kanalen kan leiden tot luchtverontreinigingen door het loslaten van vezels of andere delen uit de isolatie of door de groei van micro-organismen in het isolatie-materiaal.

2.9. Luchtbevochtiging:

- De ventilatielucht wordt niet kunstmatig bevochtigd.
- Indien luchtbevochtiging onvermijdelijk is in verband met bijzondere apparatuur of objecten wordt plaatselijk stoombevochtiging toegepast.
- Indien, om welke reden dan ook, voor een type luchtbehandeling wordt gekozen waarbij kunstmatige bevochtiging onvermijdelijk is, wordt een type bevochtiging toegepast dat niet leidt tot microbiologische vervuiling (stoom, infrason, ultrasoon). Bij gebruik is de RV in de werkruimten maximaal 30%.

2.9.1. Toelichting luchtbevochtiging

Uit wetenschappelijk onderzoek blijkt dat klachten over droge lucht niet samenhangen met de luchtvochtigheid. Verder blijkt uit veldonderzoek dat het toepassen van luchtbevochtiging de kans op klachten niet verkleint maar vergroot (Leijten en Kurvers, 2007). Uit recent laboratoriumonderzoek blijkt dat in het stookseizoen een hogere enthalpie (warmteinhoud) van de binnenlucht tot meer luchtkwaliteitsklachten leidt (Fang et al., 2003; Fang et al., 2004). Als bovengrens voor de RV in het stookseizoen wordt daarom 30% aanbevolen. Dit beperkt tevens de groei van huisstofmijten. Als ondergrens voor het voorkomen oogklachten van van 10 tot 15% aangehouden (Lagercrantz et al, 2003). Deze waarde wordt in het Nederlandse klimaat ook in het stookseizoen niet onderschreden, mede omdat de gebruikers en ook de gebouwconstructie blijvend vocht afgeven (Weschler et al., 1998). Hieruit wordt geconcludeerd dat kunstmatige bevochtiging van de lucht in de Nederlandse situatie niet nodig en ook niet gewenst is. Ook voor het vermijden van klachten over statische elektriciteit is kunstmatige bevochtiging niet noodzakelijk. Beter kan hiervoor antistatische vloerbedekking worden toegepast. De vloerbedekking moet voldoen aan DIN 54346 "Klassifikation des elektrischen und elektrostatischen Verhaltens von Bodenbelägen und Bodenbeschichtungen".

2.10. Koeling van de ventilatielucht

Koeling van de ventilatielucht dient te worden vermeden.

Indien koeling onvermijdelijk is, gebruik dan indien mogelijk stralingskoeling. Indien, bijvoorbeeld in een bestaande situatie, koeling van de ventilatielucht onvermijdelijk is, bestraal dan de koelsectie van binnen met UV licht.

2.10.1. Toelichting koeling

In epidemiologische onderzoeken hangen lichamelijke symptomen en klachten over het binnenmilieu zeer consistent samen met koeling van de ventilatielucht, ook als gecorrigeerd wordt voor versturende variabelen (Mendell en Smith, 1990; Seppänen en Fisk, 2002; Leijten en Kurvers, 2007). Er is geen zekerheid over het causale mechanisme. Een plausibel mechanisme is microbiologische groei door vocht bij de warmtewisselaars van de koelsectie (Byrd, 1996, Asikainen e.a., 2006). Menzies e.a. (2003) laat in een experimenteel onderzoek met een zeer sterke onderzoeksopzet (*double-blind multiple crossover trial*) zien dat bestraling van de koelsectie met UV licht leidt tot een significante vermindering van lichamelijke symptomen, wat microbiologische groei als mechanisme ondersteunt.

Het idee achter stralingskoeling is dat hierbij geen microbiologische verontreiniging van de ventilatielucht plaatsvindt. Verder is stralingskoeling naar verwachting robuuster door de scheiding tussen verwarming/koeling en ventilatie en door een relatief grote mate van transparantie (zie Leijten en Kurvers, 2007).

Aan de eisen voor thermisch comfort kan worden voldaan zonder mechanische koeling door:

- - minimalisering van de externe warmtelast
- - minimalisering van de interne warmtelast
- optimaal gebruik van de warmteaccumulerende bouwmassa
- nachtventilatie
- goed bruikbare te openen ramen
- gebruik maken van criteria voor adaptief thermisch comfort

2.11. Recirculatie

Vanaf 1 uur vóór werktijd tot einde werktijd wordt er niet gerecirculeerd.

2.11.1. Toelichting recirculatie

Recirculatie kort voor of gedurende werktijd vergroot de kans op luchtkwaliteitsproblemen doordat verontreinigingen die plaatselijk ontstaan over alle werkruimtes worden verspreid. Bovendien worden door recirculatie verschillende vervuilingen gemengd, waardoor door chemische reacties verbindingen ontstaan die schadelijker zijn dan de oorspronkelijke vervuilingen (Weschler, 2004). Tenslotte vergroot een recirculatievoorziening, door onvermijdelijke onnauwkeurigheden in de instelling van de kleppen, de kans dat de hoeveelheden verse lucht te laag worden (Bluyssen et al., 1995).

2.12. Warmtewiel

De installatie is niet voorzien van een warmtewiel.

2.12.1. Toelichting warmtewiel

Warmtewielen kunnen op drie manieren verontreiniging overbrengen van de afvoer naar de toevoerlucht :

- met lucht door het wiel meegenomen
- door lekkage tussen de rotor en de scheidingswand
- door adsorptie en desorptie aan het oppervlak van de rotor

Pejtersen (1996) laat zien dat *sensory pollution*, vastgesteld door een geurpanel, wordt overgebracht van de afvoerlucht naar de toevoerlucht. Ruud (1996) en Bluyssen (2001) laten zien dat VOC's worden overgebracht.

Recent wetenschappelijk onderzoek wijst erop dat op vervuilde oppervlakken chemische reacties voorkomen die *indoor smog* veroorzaken (Weschler, 2004). Waarschijnlijk gebeurt dit ook in warmtewielen. Hoewel er hierover geen literatuur is, is het a priori waarschijnlijk lijkt dat warmtewielen microbiologisch verontreinigd kunnen worden.

Ruud en Carlson (1996) adviseren om bij gebruik van een warmtewiel de toevoer van verse lucht met 20% te verhogen ten opzichte van de minimumwaarde bij gebruik van warmteterugwinning met volledig gescheiden luchtstromen. Twee reacties hierop:

- Hierdoor wordt een mogelijk energievoordeel t.o.v. warmteterugwinning met volledig gescheiden luchtstromen geheel of gedeeltelijk ongedaan gemaakt.
- Strøm-Tejsen et al. (2003) en Wargocki et al. (2003) laten zien dat bij een door gebruik verontreinigd luchttoevoerfilter de afgifte van verontreiniging aan de toevoerlucht hoger is bij hogere toevoer van verse lucht. Het kan niet uitgesloten worden dat een dergelijk effect zich ook bij warmtewielen voordoet.

De drie belangrijkste aanbevolen methodes om overdracht van verontreiniging te voorkomen zijn:

- juiste plaatsing ventilatoren
- spoelzone
- niet-hygroscopische rotor

Onderzoeksresultaten laten echter zien dat geen van deze methodes voldoende garantie biedt tegen verontreiniging:

- Ook bij juiste plaatsing van de ventilatoren kan lekkage van de afvoerlucht naar de toevoerlucht optreden (Ruud en Carlson, 1996).
- Een spoelzone kan de overdracht van VOC's wel verminderen maar niet wegnemen (Bluyssen, 2001).
- Niet-hygroscopische rotors kunnen net zo goed sensory pollution of VOC's overbrengen als hygroscopische rotors (Pejterson, 1996, Ruud en Carlson, 1996).

2.13. Bouw- en inrichtingsmaterialen

Gebruikte bouw- en inrichtingsmaterialen en apparaten zijn voldoende emissiearm als het gaat om chemische verontreinigingen, (fijn) stof en microbiologische verontreinigingen.

De vochtigheid in de gebouwconstructie en in microklimaten in het gebouw is, mede door detaillering en thermische isolatie, zo laag dat de groei van micro-organismen en huisstofmijten niet mogelijk is of zo veel mogelijk wordt voorkomen. Kwantitatieve grenswaarden voor verschillende situaties worden gegeven in "TFI-1996, Control of moisture problems affecting biological indoor air quality", een uitgave van de *International Society of Indoor Air Quality and Climate (ISIAQ)*, in Nederland verkrijgbaar bij *ISIAQ.nl*.

Toegepaste materialen, anders dan baksteen, natuursteen, keramische tegels, glas, metaal of anderszins relatief inert materiaal, en met name vloerbedekking en plafondbedekking, zijn voorzien van één van de onderstaande Europese materiaal-emissielabels. Dit geldt met name voor vloerbedekking en plafondbedekking.

- Der Blauwe Engel (www.blauer-engel.de)
- FiSIAQ M1 label (www.rts.fi)
- Danish Indoor Climate Labeling (www.dsic.org/princik-uk.pdf)

Glaswol, steenwol en slakkenwol zijn zodanig afgeschermd dat er geen vezels in de ruimtelucht kunnen komen. Asbest wordt niet toegepast.

In de inrichtingsmaterialen is ook zonder behandeling met chemicaliën geen groei van micro-organismen mogelijk. Indien dit bij waterschade wel mogelijk is, kunnen de materialen eenvoudig worden vervangen.

2.14. Enthalpie

Houdt de relatieve vochtigheid tijdens het stookseizoen aan de lage kant, bij voorkeur door niet te bevochtigen, of in elk geval bevochtigen tot maximaal 30% RV.

Houdt de luchttemperatuur tijdens het stookseizoen aan de lage kant, concreet: niet hoger dan 21°C. (Om dit te bereiken met gelijktijdig thermisch comfort, moet de stralingstemperatuur hoger zijn dan de luchttemperatuur, wat mogelijk is door stralingsverwarming toe te passen).

2.14.1. Toelichting enthalpie

Naast de hoeveelheid luchtverontreinigingen is er een andere factor die de ervaren luchtkwaliteit bepaald: de enthalpie van de lucht. De enthalpie is de hoeveelheid warmte die in de lucht opgeslagen is. De enthalpie is hoger als de temperatuur van de lucht hoger is en als de relatieve luchtvochtigheid (RV) hoger is. Hoe hoger de enthalpie, des te meer klachten over de luchtkwaliteit (Fang et al., 2004). Ook wordt in veldonderzoek gevonden dat in het gebied van 21,5 tot 25°C ontevredenheid met de luchtkwaliteit en Building Related Symptoms (BRS) toenemen met toenemende luchttemperatuur (Mendell et al., 2009). Ook leidt een hogere relatieve luchtvochtigheid tot meer klachten (Fang et al., 2003).

2.15. Beïnvloeding luchtkwaliteit

Geef de gebruikers invloed op de luchtkwaliteit (en het thermisch comfort) door middel van effectief te openen ramen (zie thermisch comfort).

2.15.1. Toelichting beïnvloeding luchtkwaliteit

Een te openen raam geeft de werknemer de mogelijkheid om het binnenklimaat (zowel temperatuur als luchtkwaliteit) snel, doeltreffend en naar eigen inzicht te beïnvloeden. Het gaat hierbij zowel om een continue beperkte luchtstroom als om de mogelijkheid tot spuien. Uit wetenschappelijk onderzoek blijkt dat werknemers die hun binnenklimaat kunnen beïnvloeden gemiddeld minder binnenklimaat- en lichamelijke klachten hebben dan werknemers die dat niet kunnen (Leijten en Kurvers, 2007). Ook bevindingen uit stress-onderzoek wijzen erop dat zinvolle mogelijkheden om de omgeving te beïnvloeden de gezondheid bevorderen (Vroon, 1990). Bovendien vergroten te openen ramen de tolerantie voor hogere temperaturen in de zomerperiode (DeDear et al., 1997).

De beïnvloedbaarheid van het binnenklimaat is maximaal wanneer de ramen traploos instelbaar zijn en wanneer er naast een groter raam ook kleiner raam hoger in de gevel is. Hiermee wordt de kans op toechthinder ten gevolge van het geopende raam geminimaliseerd. Ook vergroot het de mogelijkheid om een goed compromis te vinden tussen maximale ventilatie en bijvoorbeeld minimale hinder door geluid van buiten. De veel toegepaste draai-/kiepramen zijn in dit opzicht niet optimaal.

Argumenten tegen het toepassen van te openen ramen (windhinder, geluidshinder, thermisch comfort, buitenluchtkwaliteit, verstoring van de werking van de installaties, veiligheid) zijn in het algemeen niet steekhoudend (Boerstra et al., 1998).

Concept

3. Overige onderzoeksvragen

Hieronder worden de onderzoeksvragen uit de FACET projectbeschrijving nogmaals puntsgewijze beantwoord. De meeste vragen worden al expliciet of impliciet beantwoord in de vorige hoofdstukken en in de Literatuurstudie, maar voor de volledigheid worden de vragen hier ook beantwoordt. Tevens zijn hier de aanvullende vragen van Rien van der Voorden meegenomen. Deze vragen zijn niet letterlijk, maar meer 'naar de geest' geïnterpreteerd.

WP1: Programma van eisen thermisch comfort

- *Wat zijn de 'state of the art' eisen voor het binnenmilieu, onderscheiden naar kantoren, woningen en scholen. Dit betreft optimale eisen voor het thermisch comfort, luchtkwaliteit, visueel comfort en uitzicht.*
- *RvdV: Welke kwaliteitsaspecten met betrekking tot gezondheid en comfort zijn voor het FACET-onderzoek relevant?*

Zie:

- Hoofdstuk 1 en 2
- Rapport programma van eisen verlichting
- Rapportage literatuuronderzoek

WP4: Gebruikersaspecten

- *Wat zijn de effecten van een regelbare, dynamische gebouwschil op de beleving van comfort, op de gezondheid en op de productiviteit en leerprestatie en is er een verbetering mogelijk ten opzichte van een conventionele gebouwschil?*

WP4.1: Programma van eisen gebruikersaspecten

- *Welke aspecten zijn van belang voor gebruikersacceptatie van een regelbare, dynamische gebouwschil?*
- *Wat is het belang van gebruikersinvloed van regelbare systemen (zelfregelend en/of handmatig aangestuurd)?*

Het regelen van het binnenklimaat binnen een nauwe bandbreedte leidt niet tot een hoger niveau van comfort en gezondheid dan een binnenklimaat dat binnen ruimere grenzen wordt geregeld. Het tegendeel blijkt eerder het geval te zijn. Uit het literatuuronderzoek blijkt dat de kans op een comfortabel en gezond binnenmilieu in de praktijk wordt vergroot als aan een aantal regels wordt voldaan.

- Gebruikelijke en voorspelbare temperaturen. Gebouwen moeten gebruikelijke, voorspelbare temperatuurniveaus bieden, zodat gebruikers eenvoudig hun comforttemperatuur zo dicht mogelijk bij de heersende temperatuur kunnen brengen.
- Beïnvloeding door gebruikers. Er moeten eenvoudige, gemakkelijk bedienbare en effectieve beïnvloedingsmogelijkheden zijn. Een temperatuurbandbreedte van $\pm 2K$ (of equivalente bandbreedte van luchtsnelheden) is in de meeste gevallen voldoende.
- Veranderende temperaturen. De temperaturen zijn niet vast, maar bewegen door veranderingen die binnen en buiten optreden. Snelle veranderingen leiden tot discomfort en klachten, terwijl geleidelijke veranderingen over dagen acceptabel zullen zijn.

Verder hoeven mensen zich niet altijd 'thermisch neutraal' te voelen, maar vinden tijdelijk een overmaat van warmte of koude aangenaam als compensatie voor een oncomfortabele situatie (alliestesia).

Misschien nog van groter belang dan een exacte temperatuur is het kunnen gebruiken van beïnvloedingsmogelijkheden. Deze dienen aan een aantal regels te voldoen (zie FACET PvE).

Wanneer het binnenklimaat met een “regelbare, dynamische gebouwschil” kan worden ontworpen conform het FACET PvE en de bewoners het binnenklimaat kunnen beïnvloeden conform de aangegeven regels wordt verwacht dat er een hoger niveau van comfort en gezondheid kan worden bereikt dan in een binnenklimaat dat is ontworpen conform de huidige regels.

Er zijn op dit moment onvoldoende aanwijzingen dat er verschillende uitgangspunten moeten worden aangehouden voor kantoren, scholen en woningen. Wel zijn er aanwijzingen dat in scholen het comfort en energiegebruik kan worden verbeterd door een automatische regeling van ramen en ventilatie. Raampositie en regelalgoritme dienen goed te zijn ontworpen.

Voor zorgcentra en huisvesting voor ouderen gelden wel afwijkende uitgangspunten, maar deze vallen buiten het dit onderzoek.

Wat betreft luchtkwaliteit: De aanpak die hiervoor gekozen wordt in het FACET PvE legt de nadruk op voorkomen of beperken van binnenluchtverontreiniging aan de bron in plaats van hogere ventilatie. Ook wordt het belang van gebruikersinvloed door middel van effectief te openen ramen benadrukt. Indien deze aanpak wordt gerealiseerd bij de ontwikkeling van een adaptieve gebouwschil leidt tot hogere tevredenheid over de ervaren luchtkwaliteit, minder gebouwgerelateerde gezondheidssymptomen, hogere productiviteit, hogere leerprestaties en lager ziekteverzuim.

- *Is het zinvol en mogelijk om met behulp van de onderzochte criteria het binnenklimaat in kwaliteitsklassen in te delen?*

WP 4.4 Marktbehoefte en acceptatie (ECN)

- *Wat is het nut van kwaliteitsklassen voor het binnenklimaat?*

In de huidige normen zoals NEN-EN7730 en NEN-EN 15251 worden drie niveaus van comfort onderscheiden. “Class” of “Category” A, B, C of I, II, III en IV. Categorie II wordt gezien als het normale niveau, voor nieuwe ontwerpen, categorie III kan worden gebruikt voor bestaande gebouwen en categorie I is voor “een hoog niveau van verwachting voor gevoelige, zieke of oude mensen.

Op basis van deze literatuurstudie achten wij het voor een FACET PvE niet zinvol om het binnenklimaat in kwaliteitsklassen in te delen. Hiervoor zijn de volgende redenen gevonden.

- Op papier is het eenvoudig om klimaatklassen te definiëren door verschillende niveaus van acceptatie of tevredenheid vast te stellen en hiermee grenswaarden te bepalen voor een parameter, bijvoorbeeld PMV, luchtsnelheid of operationele temperatuur. In de praktijk blijken de kwaliteitsklassen in de gebruikerswaardering in reële gebruikte gebouwen niet terug te vinden (Arens, 2010).
- Een hoger theoretisch percentage tevreden (dus een bedoeld hogere kwaliteitsklasse) leidt tot een nauwere temperatuurbandbreedte in de praktijk. Dit leidt in veel gevallen juist tot een lager niveau van comfort en gezondheid (Humphreys, 2010, Nicol, 2009, Hellwig, 2006).
- De verschillen in comfortniveaus zijn in de normen gebaseerd kwantitatieve getalswaarden en niet op aspecten als beïnvloedbaarheid of de mate waarin bepaalde oplossingen robuust zijn (is het ontwerp ook in de praktijk

betrouwbaar?). Het impliceert hierdoor een nauwkeurigheid en zekerheid die in de praktijk niet wordt gerealiseerd (Mendell, 2009, Leaman, 2005).

Daarom is gekozen voor een aanpak waarin één optimaal niveau wordt gedefinieerd. Dit niveau is zo gekozen dat het een optimale combinatie geeft van een goede binnenmilieukwaliteit en reële kosten. Verdere aanscherping boven dit optimale niveau levert ofwel in de praktijk een lager comfort (zie het tweede punt hierboven), ofwel tot geen voor de gebruikers merkbare verbetering, of wel een geringe verbetering die niet opweegt tegen de extra kosten. Daar waar het optimale niveau niet wordt gehaald, en er ook niet een ontwerpvariant wordt gegeven die wat betreft binnenmilieukwaliteit equivalent is, leidt dit tot lagere tevredenheid over het binnenmilieu, meer gebouwgerelateerde gezondheidssymptomen, lagere productiviteit en leerprestaties en hoger ziekteverzuim. De mate waarin dit gebeurt kan wel door deskundigen geschat worden op grond van kennis van zaken betreffende binnenmilieu, maar niet algemeen in vaste lagere klassen worden ingedeeld.

WP4.1: Programma van eisen gebruikersaspecten

- *Wat zijn de uitgangspunten en randvoorwaarden op basis waarvan simulatieberekeningen kunnen worden getoetst op het gebied van gebruikerscomfort en op het inschatten van de effecten op de productiviteit en de leerprestaties?*

De uitkomsten van simulatieberekeningen kunnen worden getoetst aan het FACET PvE wat betreft comfortbandbreedte, temperatuurvariatie binnen een dag en temperatuurvariatie tussen twee opeenvolgende dagen. De comfortbandbreedtes moeten niet te absoluut (geen valbijcriterium) worden geïnterpreteerd, maar bijvoorbeeld 5% overschrijding is toelaatbaar. Een mogelijkheid is te kijken naar de *mate* van voorspelde afwijking t.o.v. de neutrale temperatuur, en de *kans* op die afwijking. Behaaglijkheid kan zodoende gekarakteriseerd worden in een histogram. Interpretatie vraagt inzicht en oefening.

WP 4.3: Effect thermisch comfort en visuele prestaties

- *Wat zijn de effecten van het beoogde, verbeterde comfort (t.o.v. standaard nieuwbouw) voor de eindgebruiker? Welke inzichten zijn hier up-to-date?*
- *Is een grotere mate van comfort haalbaar bij FACET-concepten in vergelijking met standaardconcepten?*

Het is moeilijk om een vergelijking te maken van een verbeterd comfort t.o.v. "standaard nieuwbouw", omdat het comfort in bestaande situaties van zeer uiteenlopende kwaliteit is. Voldoen aan de huidige normen en richtlijnen voor het binnenmilieu kan op vele manieren en het is juist de wijze waarop aan de criteria wordt voldaan dat het niveau van comfort bepaalt. De wijze waarop is echter niet in criteria verwerkt omdat criteria meestal in de vorm van prestatiespecificaties worden geformuleerd. De mate waarin de kwaliteit van het binnenmilieu in de praktijk aan de ontwerpdoelstelling voldoet wordt wel "robuustheid genoemd" (Leijten, 2007).

Het beoogde nieuwe of verbeterde comfort, zoals in het FACET PvE uiteen wordt gezet, is wel zodanig geformuleerd dat de kans op een robuuster binnenklimaat groter is en dus ook de kans op een beter binnenmilieu aanzienlijk wordt vergroot.

WP 4.3: Effect thermisch comfort en visuele prestaties

- *Indien de FACET concepten een verbeterd comfort kunnen leveren wat zijn dan de effecten op de beleving van gezondheid, productiviteit en leerprestaties?*
- *In hoeverre levert het FACET comfort een verbeterde arbeidsproductiviteit?*

WP 4.4 Marktbehoefte en acceptatie (ECN)

- *Welke invloed heeft een “nieuw comfort” voor eindgebruiker op gebied van leerprestatie en productiviteit?*

Een thermisch binnenmilieu dat wordt gerealiseerd conform het FACET PvE heeft een grotere kans om tot een verbeterd comfort te leiden vergeleken met huidige, gangbare richtlijnen. Uit diverse bronnen (Nishihara, 2007, Hanada, 2008, Jensen, 2009, Toftum, 2009, Leyten, 2010) blijkt dat productiviteit nauwer samenhangt met de perceptie van thermisch comfort, dan met de temperatuur alleen.

Wat betreft luchtkwaliteit: De aanpak die hiervoor gekozen wordt in het FACET PvE legt de nadruk op voorkomen of beperken van binnenluchtverontreiniging aan de bron en op het belang van gebruikersinvloed. Indien deze aanpak wordt gerealiseerd bij de ontwikkeling van een adaptieve gebouwschil leidt tot hogere productiviteit, hogere leerprestaties en lager ziekteverzuim.

WP 4.3: Effect thermisch comfort en visuele prestaties

- *In hoeverre kan van huidige comfortcriteria worden afgeweken zonder dat hierdoor de comfortbeleving nadelig wordt beïnvloed (toegestane marge)?*

In het FACET PvE wordt een bandbreedte aangegeven waarbinnen de operationele temperatuur minimaal 95% van de tijd moet liggen. Er is nog weinig ervaring met het ontwerpen en beoordelen op basis van deze uitgangspunten. Een manier om beter beoordelingen in de ontwerpfase mogelijk te maken is het weergeven van simulatieresultaten in de vorm van histogrammen waarbij de verdeling van de comforttemperaturen bij een bepaalde buitentemperatuur wordt weergegeven.

In praktijksituaties zal de acceptatie voor de breedte van de marge vooral afhangen van de adaptieve mogelijkheden die de bewoners hebben. Naarmate er meer adaptieve mogelijkheden zijn zullen afwijkingen van het comfortgebied beter geaccepteerd worden omdat de adaptieve mogelijkheden het mogelijk maken de omstandigheden dichterbij de comforttemperatuur te brengen.

Aanvullende vragen van Rien van der Voorden (niet letterlijk, maar meer 'naar de geest' te interpreteren).

1. *Welke kwaliteitsaspecten met betrekking tot gezondheid en comfort zijn voor het FACET-onderzoek relevant?*

De belangrijkste kwaliteitsaspecten worden beschreven in het FACET PvE en worden hierboven besproken. Het betreft hier vooral (adaptief) thermisch comfort, beïnvloeding, bronbeheersing,

2. *Welke (Nederlandse en/of Europese) voorschriften of wettelijke regels worden op dit moment met betrekking tot de onder 1 genoemde kwaliteitsaspecten gehanteerd?*

NEN-EN 15251, NEN-EN 7730, ASHRAE Standard 44-2010,

3. *Welk van de onderzoeken, die zijn verricht naar het welbevinden in gebouwen, zijn relevant (voor kantoren, scholen en woningen)?*

Deze vraag wordt in de literatuurstudie uitgebreid beantwoord.

4. *In hoeverre heeft recent onderzoek geresulteerd in nieuwe, aantoonbaar verbeterde inzichten over gezondheid en comfort en in hoeverre zijn deze inzichten ook daadwerkelijk toepasbaar op de in FACET bekeken gebouwcategorieën?*

Deze vraag wordt in de literatuurstudie en het FACET PvE uitgebreid beantwoord.

5. Welke discrepanties bestaan er tussen regelgeving en comfortbevindingen in de praktijk en in hoeverre zou met eventueel gevonden nieuwe inzichten deze discrepantie kunnen worden verklaard?

Er bestaat een redelijk grote discrepantie tussen regelgeving enerzijds en de eisen in het FACET PvE. De reden hiervoor is dat bestaande regelgeving vrijwel uitsluitend bestaat uit kwantitatieve criteria voor een zeer beperkt aantal factoren, die gebaseerd zijn op in laboratoriumonderzoeken gevonden kwantitatieve verbanden. Verder gaan zij er vanuit dat aanscherping van kwantitatieve criteria tot een hogere ervaren binnenmilieukwaliteit leidt. Bovendien worden deze criteria om tot consensus te komen op grond van lange overlegondes vastgesteld, waardoor veel recente relevante onderzoeksresultaten er niet in zijn verwerkt. In de praktijk leidt dit ertoe dat het mogelijk is dat een ontworpen omgeving volledig aan de regelgeving voldoet, maar de gebruikers de binnenmilieukwaliteit als onvoldoende ervaren, of zelfs dat kiezen voor een hogere klasse in werkelijkheid tot een lagere ervaren binnenmilieukwaliteit leidt. Het FACET PvE is gebaseerd op de meest recente onderzoeksresultaten, waaronder zowel laboratorium- als veldonderzoeken. Dit leidt tot een grotere ecologische validiteit. Bovendien geeft het FACET PvE naast kwantitatieve criteria ook kwantitatieve eisen, juist omdat uit veldonderzoeken blijkt dat kwantitatieve eigenschappen (bijv. bronaanpak, gebruikersinvloed) van de ontworpen omgeving minstens even belangrijk zijn voor de binnenmilieu als kwantitatieve eigenschappen.

6. Welke in het FACET-onderzoek te hanteren criteria dienen op grond van het literatuuronderzoek te worden gehanteerd?

Zie hiervoor het FACET PvE.

4. Literatuur

4.1 Literatuur thermisch comfort

NEN-EN 15251, Binnenmilieugerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek, NEN 2007.

ASHRAE standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2010, ANSI 1041-2336.

Thermische "Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen", publicatie 74, ISSO, Rotterdam, maart 2004.

Arens, E., Turner, S., Zang, H., Paliaga, G., "Moving Air for Comfort", in *ASHRAE Journal*, May 2009, pp 8-18.

Humphreys, M.A., Rijal, H.B., Nicol, J.F., Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors, Proceedings of conference: Adapting to Change: New thinking on Comfort, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 april 2010. London, Network for Comfort and Energy Use in Buildings.

Mendell M. J., Mirer A. G. "Indoor thermal factors and symptoms in office workers: findings from the US EPA BASE study", *Indoor Air* 2009; 19: pp. 291–302.

Nicol, J.F., Humphreys, M.A., "New standards for comfort and energy use in buildings", *Building Research & Information*, No 37(1) (2009), pp. 68-73.

Hellwig, R.T., Brasche, S., Bischof, W., "Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning", *Proceedings of Congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right*, Winsor 2006.

Leaman, A., Bordass, B., "Assessing building performance in use 4: the Probe occupant surveys and their implications", in *Building Research & Information*, Vol 29 (3/2001), pp. 129 – 143.

Nicol, F., Humphreys, M., "Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251", in *Building and Environment*, No 45 (2010), pp.11-17.

Nicol, J.F., Humphreys, M.A., "New standards for comfort and energy use in buildings", *Building Research & Information*, No 37(1) (2009), pp. 68-73.

Wagner, A., Moosmann, C., Gropp, T., Gossauer, E., "Thermal comfort under summer climate conditions – Results from a survey in an office building in Karlsruhe, Germany", *Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right*, Winsor 2006.

4.2 Literatuur luchtkwaliteit

Apte et al. (2008) Outdoor ozone and building-related symptoms in the BASE study, *Indoor Air*, Vol. 18, No. 2, 156 – 170.

Asikainen et al. (2006) The microbial contamination on the drip pans of the fan coils, *Proceedings Healthy Buildings 2006*, Vol. 2, 393 – 396.

Bekö et al. (2006) Initial studies of oxidation processes on filter surfaces and their impact on perceived air quality, *Indoor Air*, Vol. 16, No. 1, 56 – 64.

Bekö et al. (2008) Sensory pollution from bag filters, carbon filters and combinations, *Indoor Air*, Vol. 18, No. 1, 27 – 36.

Boerstra et al. (1998) Office building design in the Netherlands: Airconditioning and sealed windows, unavoidable or not?, in: Moschandreas (ed.), Design, construction and operation of healthy buildings – Solutions to global and regional concerns, 169-178.

Buchanan et al. (2008) Air filter materials, outdoor ozone and building-related symptoms in the BASE study, *Indoor Air*, Vol. 18, No. 2, 144 – 155.

Byrd (1996) Prevalence of microbial growth in cooling coils of commercial airconditioning systems, *Proceedings Indoor Air '96*, 3202 – 3207.

Bluyssen et al. (1995) European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings – Eindrapport, TNO.

Bluyssen et al. (2001) AIRLESS – Publishable Final Report, TNO

Clausen (2004) Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy, *Indoor Air*, 14 (Suppl 7), 202 – 207.

De Dear et al. (1997) Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Eindrapport ASHRAE RP-884.

Fang et al. (2003) Sick Building Syndrome symptoms caused by low humidity, *Proceedings Healthy Buildings 2003*, Vol. 3, 1 – 6.

Fang et al. (2004) Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance, *Indoor Air*, Vol. 14 (Suppl 7), 74 – 81.

Hansen (2004) HVAC – the importance of clean intake section and dry air filter in cold climate, *Indoor Air*, 14 (Suppl 7), 195 – 201.

Lagercrantz et al. (2003) Objective and subjective responses to low relative humidity in an office intervention study, *Proceedings Healthy Buildings 2003*, Vol. 3, 163 – 168.

Leijten en Kurvers (2007) Binnenklimaat kantoren – Onderzoek naar klachten. *Praktijgidsen Arbeidshygiëne*, Kluwer.

Mendell en Smith (1990) Consistent Pattern of Elevated Symptoms in Air-conditioned Office Buildings: A Reanalysis of Epidemiologic Studies, *American Journal of Public Health* 80 (10) (1990) 1193 - 1199.

Mendell et al. (2008) Risk factors in heating, ventilation and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: the US EPA BASE study, *Indoor Air* 2008, Vol 18, 301 – 316.

Mendell et al. (2009) Indoor thermal factors and symptoms in office workers: findings from the US EPA BASE study, *Indoor Air*, Vol. 19, No. 4, 291-302.

Menzies et al. (2003) Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation system on worker's health and well-being: double blind multiple crossover study, *The Lancet*, 362, 1785 – 1791.

Pejtersen (1996) Sensory air pollution caused by rotary heat exchangers, *Proceedings Indoor Air '96*, Vol. 3, 459 – 464.

Shields en Weschler (1998) How dry can a building get?, in: Moschandreas (ed.), Design, construction and operation of healthy buildings – Solutions to global and regional concerns, 241-250.

Seppänen en Fisk (2002) Association of system ventilation type with SBS symptoms in office workers, *Indoor Air* 11 (2) 98-112.

Strøm-Tejsten et al. (2003) Sensory pollution load from a used ventilation filter at different air flow rates, *Proceedings Healthy Buildings 2003*, Vol. 3, 257 – 261.

1. Bijlage 1: Achtergronden thermisch comfort

1.1. Inleiding

Tot begin jaren zestig werden de meeste gebouwen zonder mechanische koeling gebouwd. Airconditioning werd in de Verenigde Staten al voor de 2^e Wereldoorlog toegepast, maar in de meeste delen van de wereld werd de temperatuur beheerst met architectonische en bouwfysische oplossingen. Als het buiten warm werd dan was een hogere binnentemperatuur acceptabel (binnen bepaalde grenzen) en werd de temperatuur aangepast door zonwering neer te laten en ramen te openen (luchtbeweging). Ook pasten mensen de kleding aan of gingen ze in een koeler deel van het gebouw of buiten in de schaduw zitten. Als het te koud werd werden ruimtes bijverwarmd (meestal lokaal). Maatregelen om te voorkomen dat de binnentemperaturen te hoog opliepen waren een belangrijk onderdeel van het architectonisch ontwerp en de sociale structuur. Bij de keuze van de oriëntatie van gevels bijvoorbeeld hield men rekening met de zonbelasting, de ramen werden niet te groot te gekozen, de gevel bevatte neggen die schaduw op de ramen wierpen, er werd massa aan de constructie gegeven die de warmte kon opnemen en een doordachte natuurlijke ventilatie zorgde voor het afvoeren van de warmte en voor afkoeling in de nacht². Architecten begrepen dat een goed binnenklimaat grotendeels afhankelijk was van de keuzes die ze in hun ontwerp maakten. Ook hadden architecten kennis van de bouwfysische principes, waardoor architectuur en bouwfysica op een geïntegreerde manier werden benaderd en vaak tot innovatieve ontwerpen en oplossingen leidden.

Dit veranderde langzaam toen airconditioning zijn intrede deed. Door de mogelijkheden die het mechanisch koelen van de lucht bood kon iedere gewenste binnentemperatuur worden gerealiseerd, vrijwel onafhankelijk van architectonische keuzes. Lichte constructies, grote glasoppervlakken, vlakke, gesloten gevelconstructies, gebouwen boven snelwegen, bijna alles werd mogelijk op het gebied van vormgeving en functies, tot aan skibanen in de woestijn.

Architecten gingen zich meer en meer concentreren op de vormgeving van een gebouw en het binnenklimaat werd overgelaten aan gespecialiseerde adviseurs en installateurs. Deze adviseurs moeten hun werk in de meeste gevallen doen binnen de grenzen die de architect hun aanreikt. Door alle technologische ontwikkelingen ontstond de behoefte aan beter onderbouwde gegevens wat betreft comfortabele binnentemperaturen. In de volgende paragrafen wordt dieper ingegaan op normen en richtlijnen voor thermisch comfort, op de achtergronden hiervan en hoe de inzichten in de loop van de jaren zijn veranderd. Deze veranderingen hebben weer gevolgen voor het energiegebruik en het ontwerp van binnenklimaat en gebouw.

1.2. Vroege onderzoeken

Op verschillende locaties in de wereld werd onderzoek gestart naar het verband tussen de thermische omgeving en de perceptie hiervan door mensen. Het eerste onderzoek dateert van 1936 en werd in Groot Brittannië uitgevoerd door Thomas Bedford. In zijn boek "The warmth factor in comfort at work" onderzocht hij in een

² In het Midden Oosten zijn prachtige voorbeelden te vinden van eeuwenoude ontwerpen die in een heet klimaat toch behaaglijk binnenklimaat mogelijk maakt.

winter het thermisch comfort van 3085 vrouwen die in 12 fabrieken werkten. Er werden temperaturen gemeten en er werd met behulp van vragenlijsten gevraagd of de vrouwen zich thermisch gezien comfortabel voelden. De optimale comforttemperatuur bleek 18°C te zijn.

In de jaren vijftig en zestig werd door Charles Webb veldonderzoek gedaan in werkplaatsen en kantoren, in Singapore, Bagdad, India en Groot Brittannië. Hij vond dat mensen zich comfortabel voelden bij temperaturen die lagen tussen 16°C en 30°C. Webb concludeerde dat mensen *geadapteerd*³ waren aan de gemiddelde condities waaraan ze waren blootgesteld. Uit dit onderzoek bleek dat het thermisch comfort meer samenhangt met het verschil met de gemiddelde temperatuur in de betreffende ruimte dan van de temperatuur zelf.

In de jaren zestig en het begin van de jaren zeventig werden veel veldonderzoeken uitgevoerd in voornamelijk Groot Brittannië (zie figuur 5). Begin jaren zeventig werd door de onderzoekers Nicol en Humphreys een meta-analyse uitgevoerd op 35 onderzoeken die overal ter wereld verricht zijn in de periode 1938-1974. In totaal werden bij deze onderzoeken 200.000 "comfort votes" verzameld.

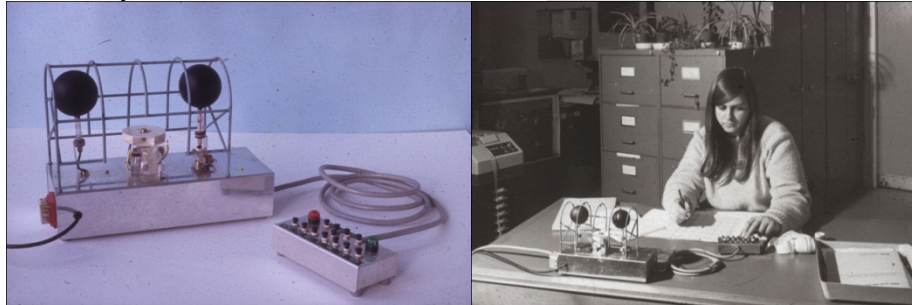


Figure 5: The data-logging monitor unit with which the indoor temperatures were measured and where the respondents could give their 'comfort-vote'. The ventilated wet and dry bulb temperatures, the temperatures of a heated and an unheated globe were measured.

De resultaten lieten zien dat de neutrale temperaturen sterk gecorreleerd zijn met de overeenkomstige buitentemperaturen en dat de relatie het sterkst was voor de "free running" gebouwen, dus de gebouwen zonder koeling.

³ Webb kan worden gezien als de grondlegger van de theorie van adaptief thermisch comfort. Hoewel zijn onderzoeken dateren van de jaren zestig, duurde het nog 30 jaar voordat de theorie geaccepteerd begon te raken.

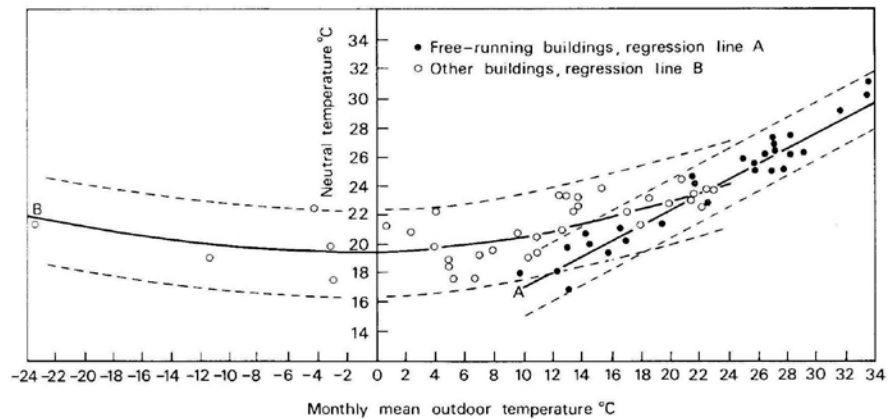


Figure 2
Scatter diagram for neutral temperature

Figuur 6: De neutrale temperatuur gerelateerd aan de gemiddelde maandtemperatuur.

Er werden twee vergelijkingen voor de comforttemperatuur afgeleid:

Voor free-running gebouwen: $T_{\text{comf}} = 0.33T_{\text{rm}} + 18.8 \quad (^\circ\text{C})$

Voor air conditioned gebouwen: $T_{\text{comf}} = 0.09T_{\text{rm}} + 22.6 \quad (^\circ\text{C})$

T_{comf} is de comforttemperatuur

T_{rm} is de "running mean outdoor temperature"

Nicol en Humphreys ontwikkelden ook een model, waarbij thermisch comfort een zelfregelend systeem in de mens is, waarin warmtestromen niet alleen fysisch en fysiologisch worden voorgesteld, maar waarbij bewust en onbewust menselijk gedrag, zoals het aanpassen van het activiteitsniveau, het aanpassen van kleding en aanpassingen aan de omgeving zeer belangrijk is voor het bereiken van thermisch comfort (zie figuur 7).

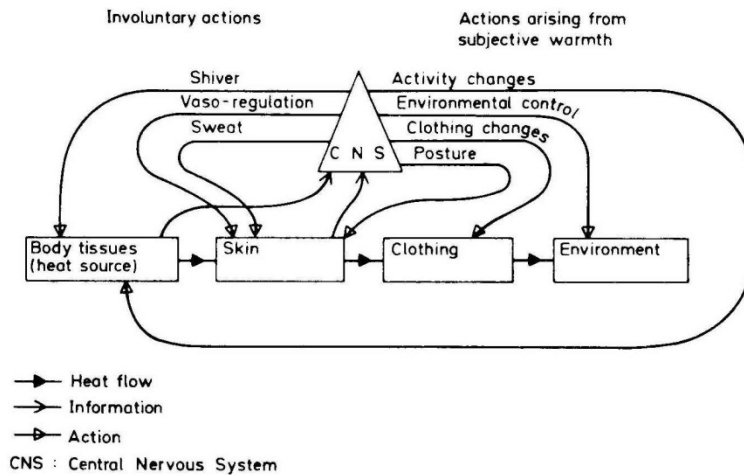


Figure 2. The thermal regulatory system.

Figuur 7: Het thermoregulatiesysteem van de mens volgens Nicol en Humphreys (1972).

Deze informatie leek zeer waardevol voor het ontwerpen van gebouwen, maar een andere ontwikkeling zorgde ervoor dat deze modellen gedurende lange tijd in de vergetelheid raakten en dat een andere benadering belangrijk werd, met verstrekkende gevolgen.

1.3. Klimaatkameronderzoek

Naast het veldonderzoek werd in de jaren zestig onderzoek naar thermisch comfort in klimaatkamers steeds populairder. In klimaatkamers zijn de fysische omstandigheden volledig beheersbaar en kunnen uitgebreide metingen aan mensen en poppen (manikins) worden uitgevoerd. Zo kunnen fysiologische reacties, zoals huiddoorbloeding, vasodilatatie en vasoconstrictie, gedetailleerd worden bestudeerd en ontstaat inzicht hoe de mens een thermische omgeving ervaart en hierop reageert. Pioniers op het gebied van modellen die zijn gebaseerd op fysiologische en fysische metingen zijn Stolwijk en Gagge (Stolwijk, 1970; Gagge, 1971). De Deense onderzoeker Fanger verwierf de grootste bekendheid met zijn onderzoek waarbij hij in een klimaatkamer het thermisch comfort onderzocht van 1300 studenten en later van andere mensen.

Het model gaat uit van de thermoregulatie van het menselijk lichaam, die de lichaamstemperatuur op circa 37°C probeert te houden (warmtebalans). Door middel van straling, convectie en geleiding wordt warmte met de omgeving uitgewisseld en door ademhaling en zweetverdamping wordt warmte aan de omgeving afgestaan. In de klimaatkamer werden experimenten uitgevoerd waarbij

- de warmte weerstand van de kleding,
 - de luchttemperatuur,
 - de gemiddelde stralingstemperatuur,
 - de luchtvochtigheid,
 - de luchtsnelheid
- werden gevarieerd én
- het activiteitsniveau (metabolisme) werden gemeten en vastgesteld,

Aan de proefpersonen werd gevraagd aan te geven hoe ze zich thermisch voelden, uitgedrukt op een 7-puntsschaal:

- +3 Heet
- +2 Warm
- +1 Enigszins warm
- 0 Neutraal
- 1 Enigszins koel
- 2 Koel
- 3 Koud

Zo ontstond een vergelijking die de gemiddelde thermische sensatie van een theoretische groep mensen in een homogeen binnenklimaat voorspelt, uitgedrukt in de PMV^4 -index.

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,031 \cdot M^*} + 0,028) \cdot [RM^* - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot RM^* - p_i) - 0,42 \cdot (RM^* - 58,15) - 17 \cdot 10^{-6} \cdot M^* \cdot (5867 - p_i) - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot M^* \cdot (34 - T_i) - 39,6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{kl} \cdot ((T_{kl} + 273)^4 - (T_s + 273)^4) - f_{kl} \cdot \alpha_c \cdot (T_{kl} - T_i)]$$

Hierin is:

M^* metabolisme M per m^2 lichaamsoppervlak in W/m^2

RM^* metabolisme per m^2 lichaamsoppervlak minus uitwendig verrichte arbeid in W/m^2

p_i dampspanning van de binnenlucht in Pa

T_i temperatuur van de binnenlucht in $^{\circ}C$

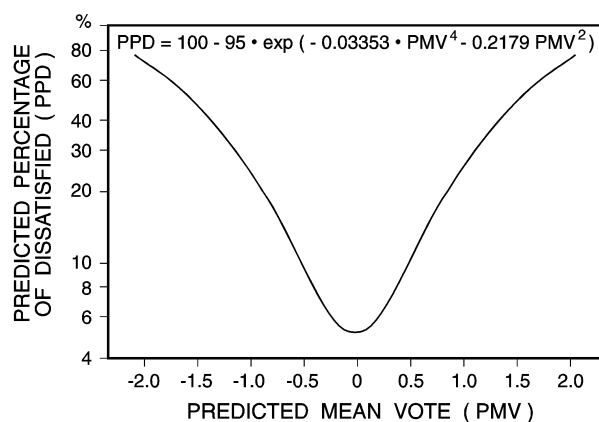
T_{kl} oppervlaktetemperatuur van de kleding in $^{\circ}C$

T_s gemiddelde stralingstemperatuur van de wanden in $^{\circ}C$

α_c warmte-overgangscoefficiënt voor convectie in W/m^2K

f_{kl} verhouding tussen de oppervlakte van het geklede en het ongeklede lichaam (-)

Door aan te nemen dat de proefpersonen die -2, -3, +2, +3 stemden "ontevreden" waren, kan ook het theoretisch voorspelde percentage ontevreden worden berekend, de PPD^5 . Figuur 9 geeft de onderlinge relatie weer.



Figuur 8: Relatie tussen de PPD-index en de PMV-index (NEN-EN-ISO 7730)

⁴ Predicted Mean Vote

⁵ Predicted Percentage Dissatisfied

De methode van Fanger werd vanaf 1970 populair en vormde de basis voor normen en richtlijnen die temperatuurgrenzen voor gebouwen aangeven waarmee, tot op de dag van vandaag, het binnenklimaat van gebouwen in grote delen van de wereld wordt ontworpen. De reden voor de populariteit was onder andere het verband dat Fanger legde tussen het percentage ontevredenen en de PMV-index. Door het metabolisme en de kleding weerstand aan te nemen kon het te verwachten thermisch comfort worden berekend. Dit is ook het grootste punt van kritiek dat in de loop der jaren in toenemende mate werd geuit. Omdat metabolisme en kledingisolatie zeer moeilijk nauwkeurig zijn te bepalen en in de tijd sterk variëren geeft de PMV-index een schijnnaauwkeurigheid.

1.4. Normen en richtlijnen

Op basis van het PMV-model zijn verschillende richtlijnen en normen ontwikkeld. Eind jaren zeventig is in Nederland (door de Rijksgebouwendienst en de toenmalige Rijks Geneeskundige Dienst) vastgelegd dat een “goed” binnenklimaat moet voldoen aan $-0,5 < PMV < 0,5$ (10% ontevredenen). Een overschrijding van deze grenzen mocht onder bijzondere omstandigheden⁶ plaatsvinden tot $-1,0 < PMV < 1,0$ (25% ontevredenen), gedurende maximaal 10% van de tijd (100 uur in de zomer). Later resulteerde dit in de zogenaamde temperatuuroverschrijdings (TO)-methode van de Rijksgebouwendienst waarin werd gesteld dat 25°C maximaal 100 uur per jaar mag worden overschreden en 28°C maximaal 10-20 uur. Dit werd berekend met een referentie klimaatjaar, meestal 1964. Dat jaar kan echter, in het licht van de zich tekenende klimaatverandering, niet meer worden aangemerkt als een representatief jaar. In warmere jaren zullen de overschrijdingen talrijker zijn. Er is daarom ook een nieuw referentiejaar ontwikkeld (NEN 5060) dat beter de huidige klimaatsituatie weergeeft.

Omdat in gebouwen met veel thermische massa minder hoge temperaturen voorkomen met minder fluctuatie in gebouwen met weinig massa en dit onvoldoende tot uitdrukking komt in de TO-methode ontwikkelde de Rijksgebouwendienst een methode waarbij de mate van overschrijding van de grens $PMV = 0,5$ wordt beoordeeld door middel van een ‘weegfactor’ die was afgeleid van de PMV/PPD-relatie. Grotere overschrijdingen worden strenger beoordeeld dan kleinere overschrijdingen. Dit werd de Gewogen Temperatuur Overschrijding (GTO) genoemd. Op basis van computersimulaties werd vastgesteld dat voor een “gemiddeld” gebouw de gemiddelde PMV bij een 100-urige overschrijding van de grenswaarde ($PMV = 0,5$), overeenkomt met 150 weeguren.

Later zijn verschillende nationale en internationale normen ontwikkeld:

- NEN-EN-ISO 7730: 2005 'Klimaatomstandigheden – Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV- en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid’.
- NEN-EN 15251: 2007 'Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek’.

⁶ Onder bijzondere omstandigheden werden onder andere verstaan sporadisch voorkomende hitte- of koudepieken en storingen aan klimaatinstallaties.

- NEN-EN-ISO 7726: 2001 'Ergonomie van de thermische omgeving - Instrumenten voor het meten van fysische grootheden'.
- NPR-CR 1752:1999 'Ventilatie van gebouwen - Ontwerpcriteria voor de binnenomstandigheden'.
- NEN-EN 13779:2007 'Ventilatie voor utiliteitsgebouwen – Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen'.
- ASHRAE standard 55: 2004 'Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy'. (in het Engels)

NEN-EN-ISO 7730 geeft onderstaande grenswaarden, gebaseerd op het PMV-model. Merk op dat de waarden voor activiteitsniveau en kledingisolatie niet nauwkeurig kunnen worden vastgesteld en in de praktijk sterk variëren, terwijl de temperaturen binnen nauwe grenzen gehouden dient te worden.

Tabel 1: Grenswaarden voor ruimtetemperatuur in zomer en winter voor 2 verschillende activiteitsniveaus

Activiteit	Ruimtetype	1.1.1.1 Kl	Operatieve temperatuur (°C)	
			Zomer (0,5 clo)	Winter (1,0 clo)
Voornamelijk zittend (1,2 met)	Kantoor, vergaderruimte, restaurant, klaslokaal	A	23-26 +IB	20-24 +IB
		B	23-26	20-24
		C	22-27	19-25
Voornamelijk staand (1,6 met)	Laboratorium, winkel	A	21-25 +IB	16-22 +IB
		B	21-25	16-22
		C	20-26	15-23

+IB = individuele beïnvloeding van de temperatuur (zomer en winter)

Tabel 2: Grenswaarden voor de luchtsnelheid

Activiteit	Ruimtetype	1.1.1.2 Kl	Maximale luchtsnelheid (m/s)	
			Zomer (0,5 clo)	Winter (1,0 clo)
Voornamelijk zittend (1,2 met)	Kantoor, vergaderruimte, restaurant, klaslokaal	A	0,12	0,10
		B	0,19	0,16
		C	0,24	0,21
Voornamelijk staand (1,6 met)	Laboratorium, winkel	A	0,16	0,13
		B	0,20	0,15
		C	0,23	0,18

Tabel 3: Grenswaarden voor verticale temperatuurgradiënt (1,1 en 0,1 m boven de vloer).

Klasse	Verticale temperatuurgradiënt (°C)
--------	------------------------------------

A	<2
B	<3
C	<4

Tabel 4: Grenswaarden voor stralingstemperatuurasymmetrie.

Klasse	Asymmetrie stralingstemperatuur (°C)			
	Warm plafond	Koude wand (glas)	Koud plafond	Warme wand
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

Tabel 5: Grenswaarden voor vloertemperatuur.

Klasse	Vloertemperatuur (°C)
A	19 - 26
B	19 - 29
C	17 - 31

In de tabellen wordt onderscheid gemaakt tussen 3 binnenklimaatklassen, waarbij klasse A beter is dan klasse B en klasse B weer beter is dan klasse C. Hoewel dit op het eerste gezicht een redelijke aanname lijkt, is er veel discussie over de betrouwbaarheid van de klassenindeling. In de praktijk blijkt dat het binnenklimaat uit zoveel variabele factoren bestaat dat de bandbreedte binnen de klassen groter blijkt te zijn dan de bandbreedte tussen de klassen en dat er nauwelijks significante verschillen tussen de klassen worden ervaren in een werkelijke omgeving. Uit een meta-analyse van databases met binnenklimaatonderzoek bleek dan ook dat de klimaatklassen in de praktijk niet worden waargenomen door gebouwgebruikers (Arens, 2009).

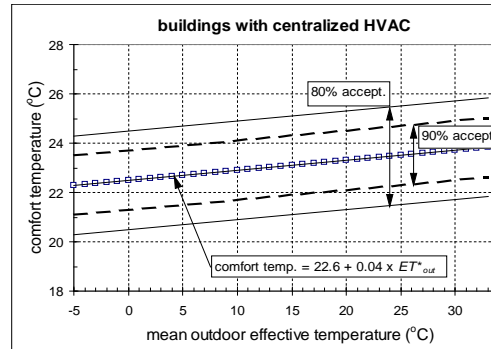
Wel wordt er in de praktijk verschil in comfort ervaren als gevolg van adaptieve mogelijkheden, zoals het openen van ramen, het kunnen instellen van de temperatuur en de mate waarin het binnenklimaat om een natuurlijke en voorspelbare manier in zekere mate het buitenklimaat volgt.

1.5. Nieuwe belangstelling voor veldonderzoek

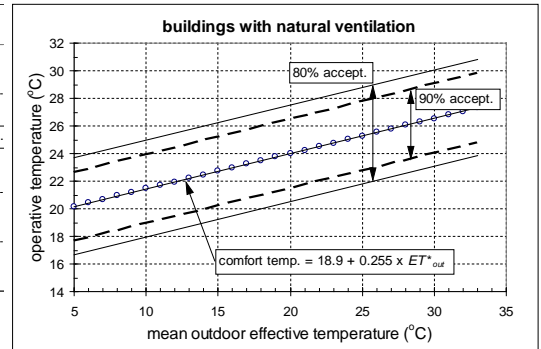
Halverwege de jaren negentig nam de kritiek op deze methode toe, toen uit veldonderzoeken steeds vaker bleek dat de comfortbeleving van mensen in veel gevallen niet altijd overeen kwam met de voorspellingen van het PMV-model of andere thermofysiologische modellen. De in paragraaf 3.2 beschreven veldonderzoeken kwamen opnieuw in de aandacht en het inzicht onstond dat thermisch comfort niet alleen af hangt van thermofysiologische factoren, maar dat bijvoorbeeld het gedrag van mensen, en de omstandigheden waarin ze zich bevinden ook zeer belangrijk blijken te zijn voor de acceptatie van en voorkeur voor temperaturen.

Een belangrijk onderzoek dat het denken over thermisch comfort sterk heeft beïnvloed is een onderzoek in 161 gebouwen verspreid over de wereld (de Dear, 1997). Figuur 8 en 9 zijn afkomstig uit dit onderzoek en laten zien dat de comforttemperatuur samenhangt met de gemiddelde buitentemperatuur: hoe

warmer het buiten is hoe hoger de comforttemperatuur. Ook is de comforttemperatuur in natuurlijk geventileerde, niet gekoelde gebouwen, hoger en hangt sterker samen met de buitentemperatuur dan in airconditioned gebouwen.



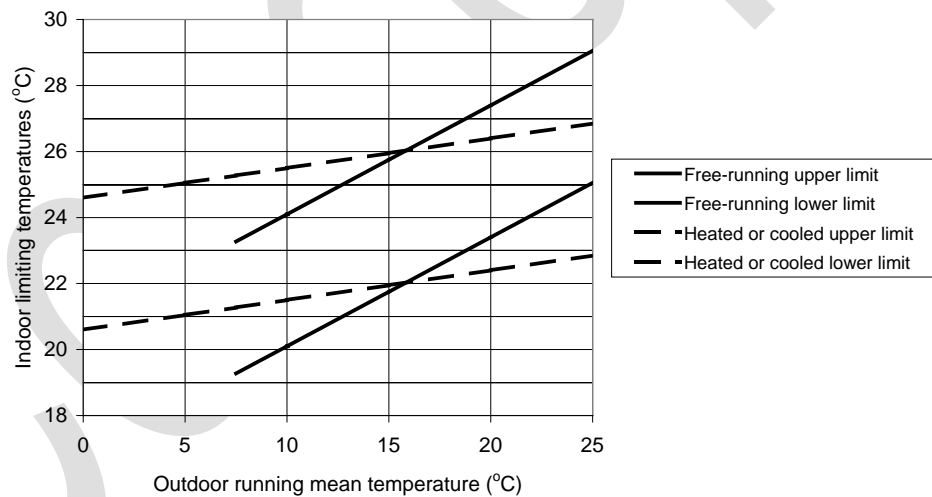
Figuur 8: Adaptive PMV method for predicting optimum comfort temperature and acceptable temperature ranges (80% and 90% general comfort criteria) in centrally-controlled HVAC buildings.



Figuur 9: Adaptive model for predicting optimum comfort temperature and acceptable temperature ranges (80% and 90% general comfort criteria) in naturally ventilated buildings.

In een onderzoek in 25 gebouwen in West-Europa (Nicol en Humphreys, 2006) werd onderscheid gemaakt tussen “free-running” en “verwarmde en gekoelde” gebouwen (figuur 10). Ook hier is goed te zien dat mensen in zekere mate wennen of *adapten* aan de gemiddelde temperaturen die in gebouwen voorkomen.

Adaptive comfort zones for buildings



Figuur 10: 80% comfort zones ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) voor “free-running” (getrokken lijnen) en verwarmde en gekoelde gebouwen (streepjes lijn), afhankelijk van de “running mean outdoor temperature”.

De effecten van *adaptatie* worden wel in veldonderzoeken gevonden, maar niet in laboratoriumonderzoeken. Er zijn verschillende vormen van adaptatie die met elkaar samenhangen en elkaar beïnvloeden (de Dear, 1997; Nikolopoulou, 2004; Ubbelohde, 2004):

- *Beïnvloeding van de omgeving.* Het gaat hierbij om merkbare beïnvloeding van de omgeving en niet alleen het idee dat mensen hebben dat ze iets kunnen

beïnvloeden. De omgeving kan worden beïnvloed door ramen en deuren te openen om de temperatuur te veranderen, de luchtsnelheid te verhogen en de luchtkwaliteit te verbeteren. Verder verhogen ventilatoren de luchtsnelheid, waardoor de huid wordt afgekoeld. Met zonwering kan de warmtestraling verminderd worden waardoor de temperatuur wordt verlaagd.

- *Gedragsmatige adaptatie*. Mensen passen hun gedrag aan om hun perceptie van warmte beter in overeenstemming te brengen met hun behoeften, door bijvoorbeeld kleding uit en aan te doen en de inspanning aan te passen (rustiger aan doen als het warm is).
- *Psychologische adaptatie*. Hieronder verstaan we een combinatie van niet fysische en niet fysiologische factoren die bij de mens bijdragen aan het streven naar thermisch comfort. Voorbeelden van psychologische adaptatie zijn:
 - *Ervaringen* met het binnenklimaat over korte en lange termijn beïnvloeden de verwachtingen en de hierop afgestemde gedragsmatige adaptatie.
 - De *context* is van invloed op het thermisch comfort. In een stationshal bijvoorbeeld wordt een ander niveau van thermisch comfort verwacht dan in een supermarkt, in de kerk of thuis.
 - Mensen prefereren een enigszins *variabel* klimaat boven een stabiel of monotoon klimaat.

Omstandigheden, gedrag, ervaringen, verwachtingen en beïnvloedingsmogelijkheden beïnvloeden het thermisch comfort op ieder moment.

1.6. Herziening normen en richtlijnen

Op basis van genoemde veldonderzoeken zijn adaptieve temperatuurgrenzen ontwikkeld. In Nederland zijn adaptieve temperatuurgrenzen opgenomen in de ATG-richtlijn (ISSO 74, 2004). Figuur 11 toont de temperatuurgrenzen voor een binnenklimaat zonder mechanische koeling (type Alpha genaamd) en figuur 12 geeft de grenzen voor een binnenklimaat met mechanische koeling.

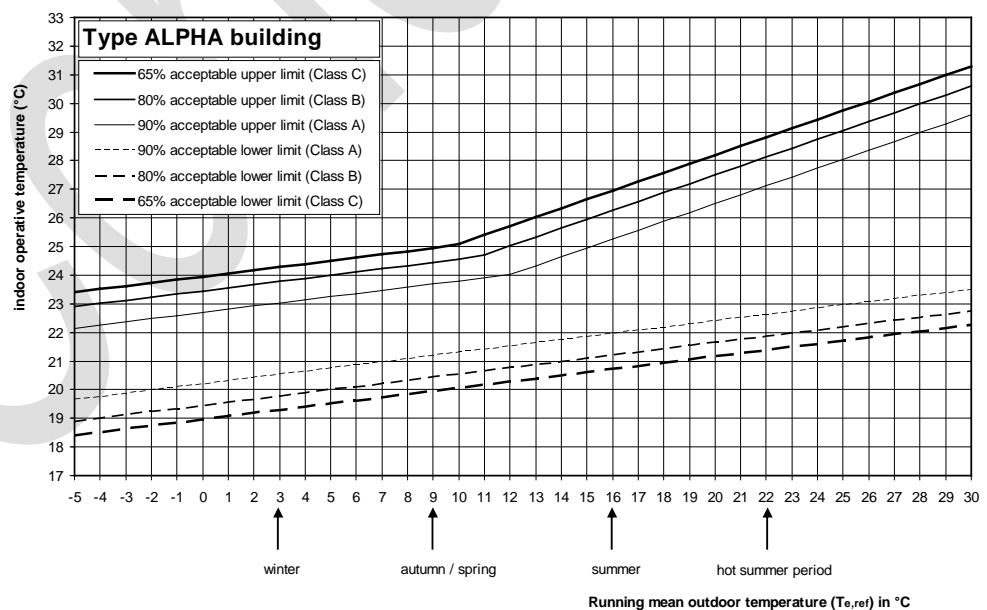


Figure 11: type Alpha building/climate. Limits of operative indoor temperatures for 90%, 80% and 65% acceptability, as a function of the weighted outdoor temperature $T_{e,ref}$.

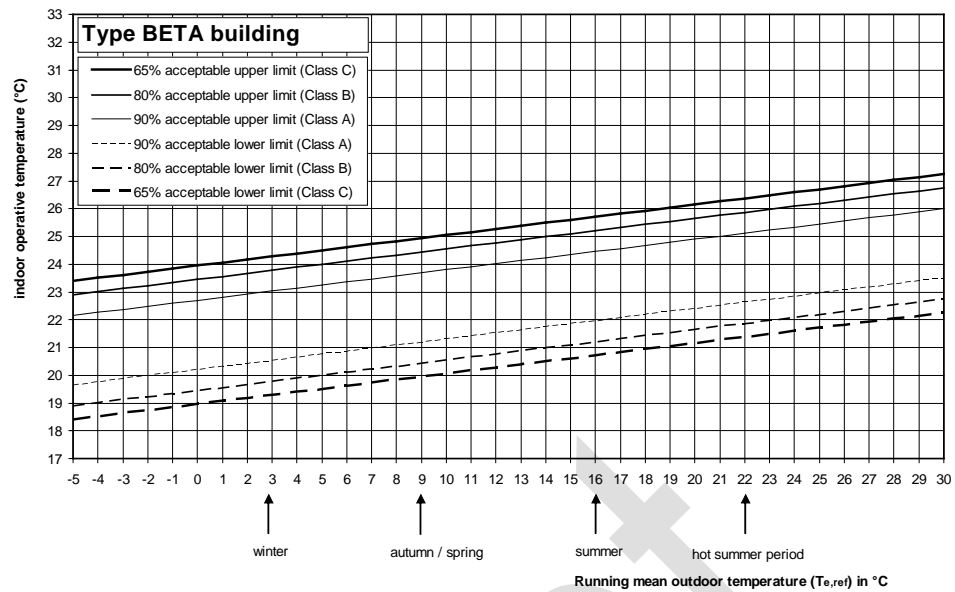


Figure 12: type Beta building/climate. Limits of operative indoor temperatures for 90%, 80% and 65% acceptability, as a function of the weighted outdoor temperature $T_{e,ref}$.

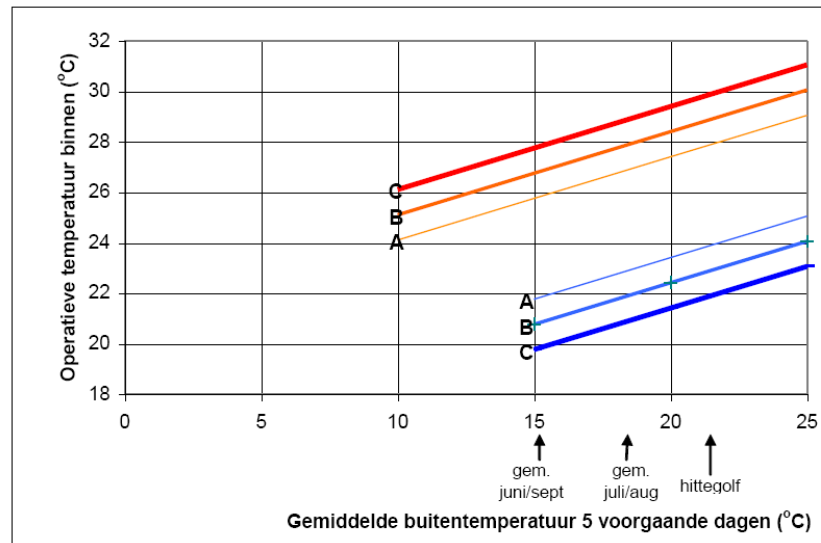
Het onderscheid tussen een Alpha- en Betaklimaat wordt in ISSO74 gemaakt met behulp van een keuzeschema, waarin keuzes moeten worden aangegeven over de mogelijkheden om de temperatuur te beïnvloeden door bijvoorbeeld te openen ramen, aanpassing van kleding en de aanwezigheid van mechanische koeling. Verder onderzoek is nodig om de hier meer duidelijkheid in te verkrijgen. Voor bovenstaande figuren geldt verder:

- De verticale as geeft de comforttemperatuur weer, uitgedrukt als de *operatieve temperatuur*, hier aangenomen als het rekenkundig gemiddelde van de luchttemperatuur en de stralingstemperatuur.
- Langs de horizontale as staat de $T_{e,ref}$, de Running Mean Outdoor Temperature. Deze wordt bij de ATG-methode berekend uit het gemiddelde van de maximale en minimale buiten(lucht)temperatuur van de beschouwde dag en de 3 dagen daaraan voorafgaand, volgens de onderstaande formule:

$$T_{e,ref} = \frac{(1 \cdot T_{vandaag} + 0,8 \cdot T_{gisteren} + 0,4 \cdot T_{eergisteren} + 0,2 \cdot T_{eer-eergisteren})}{2,4}$$

NEN ISO 15251 geeft aan dat onder bepaalde voorwaarden adaptieve temperatuurgrenswaarden kunnen worden aangehouden. De voorwaarden zijn:

- Er is voorzien in te openen ramen;
- Er is niet voorzien in een systeem voor actieve, mechanische koeling;
- Gebouwgebruikers mogen naar eigen inzicht hun kledingsisolatie aanpassen (geen "dresscode").



Figuur X: Maximum en minimum temperatuur in gebouwen met een hoge mate van gebruikersinvloed (geen dresscode, te openen ramen, geen actieve koeling) voor de zomerperiode zoals vastgelegd in NEN-EN 15251.

1.7. Keuze voor een “state of the art” richtlijn

Wanneer we de achtergronden van de veldonderzoeken naar adaptief thermisch comfort analyseren en concluderen wat de betekenis is voor een “state of the art” richtlijn voor thermisch comfort, dan komen we op de volgende overwegingen:

In NEN-EN15251, de ASHRAE 55 is de adaptieve benadering een aanvullende mogelijkheid, wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast en beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is. In alle andere gevallen wordt het PMV-model geadviseerd. In ISSO74 wordt onderscheid gemaakt tussen Alpha- en Bètaklimaten. De keuze tussen beide klimaten wordt gedaan via een (niet eenduidig) schema en komt er op neer dat een Alphaklimaat kan worden ontworpen wanneer er geen mechanische koeling wordt toegepast, beïnvloeding via te openen ramen mogelijk is en de kledingisolatie kan worden gevarieerd. Een Bètaklimaat kan worden ontworpen als er mechanische koeling is en er geen beïnvloedingsmogelijkheden zijn.

Achtergrond hierbij is de aanname dat mensen adapteren aan hogere temperaturen als de buitentemperaturen ook hoger zijn. Wordt er koeling toegepast dat treedt deze adaptatie in mindere mate op. Dit is echter een omgekeerde redenatie, de feitelijke situatie is dat mensen wennen aan een gekoeld binnenklimaat (...). De comforttemperaturen liggen lager dan in een binnenklimaat zonder mechanische koeling. Het percentage tevreden is echter niet hoger en in de meeste gevallen lager (...). Er wordt dus energie gebruikt om lagere temperaturen te realiseren, terwijl dat niet tot een comfortverhoging, maar eerder tot meer gezondheidssymptomen en een lager comfort leidt (...).

Daarom ligt het voor de hand een gewenst binnenklimaat te definiëren dat is gebaseerd op uitsluitend een adaptieve benadering. Alle analyses van databases naar adaptief thermisch comfort hebben de zelfde overeenkomsten:

- Als er niet wordt verwarmd of gekoeld, dus in de free-running modus, is er een koppeling tussen de buiten- en binnentemperatuur.

- De comforttemperatuur neemt boven een gemiddelde buitentemperatuur van circa 10-12°C toe met de buitentemperatuur.
- Op de verticale as is de operationele binnentemperatuur weergegeven (gemiddelde van de luchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur).
- Op de horizontale as is de gewogen gemiddelde buitentemperatuur weergegeven.

Wij kiezen dus niet voor een bètabinnenklimaat of een binnenklimaat dat wordt gedefinieerd door het PMV-PPD-model. Wij kiezen voor het definiëren van het binnenklimaat op basis van de Europese database, het SCATs-onderzoek, waarop ook de NEN-EN15251 is gebaseerd. De reden hiervoor is dat de gebouwen in dit onderzoek beter overeenkomen met de Nederlandse situatie dan de ASHRAE RP-884 database, waarin gebouwen in tropische streken voorkomen. Daarnaast maakt het SCATs-onderzoek gebruik van de 'running mean outdoor temperature' (RMOT). Deze parameter geeft de hoogste correlatie met de voorspelde comforttemperatuur in het binnenklimaat.

Er zijn verschillende manieren om adaptieve temperatuurgrenzen toe te passen:

- Drie kwaliteitsklassen met 90%, 80%, 65% acceptatie. Dit is gedaan bij de NEN-EN15251, de ASHRAE 55 en de ISSO-74. De ASHRAE-55 en de ISSO-74 zijn gebaseerd op de RP-884 database met gebouwen verspreid over de wereld, terwijl de NEN-EN15251 is gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek in Europese gebouwen. Recent onderzoek (Arens et al, 2010) laat zien dat in werkelijke omgevingen de gebruikers geen onderscheid ervaren tussen de verschillende klassen. Verdere overwegingen om de klassenindeling niet toe te passen zijn(Leijten, 2010).
- Drie kwaliteitsklassen toepassen, maar dit afhankelijk laten zijn van de adaptieve mogelijkheden. Naarmate mensen meer adaptieve mogelijkheden hebben de omgeving aan te passen via te openen ramen, ventilatoren, zonwering, etc. en ook de kleding te variëren zijn ze beter in staat de comforttemperatuur en de heersende temperatuur met elkaar in overeenstemming te brengen. Daarom is het een mogelijkheid een ruimere bandbreedte te hanteren bij veel adaptieve mogelijkheden en een nauwere bandbreedte bij weinig adaptieve mogelijkheden. Er zijn echter geen onderzoeken waarin dit is getoetst en de beschrijving van de adaptieve mogelijkheden vereist zeer grote nauwkeurigheid om misinterpretaties te voorkomen (Nicol, 2010).
- Een grensgebied toepassen in plaats van drie. Minimaal 80% vindt het dan acceptabel. Naarmate er meer adaptieve mogelijkheden zijn en de temperatuur voorspelbaarder is (minder actieve regelingen) zal het comfortniveau hoger worden.

We kiezen ervoor om een bandbreedte te hanteren, gebaseerd op het Europese SCATs-onderzoek. Een bandbreedte zorgt voor minimaal 80% acceptatie. Meer onderscheid tussen 90% en 70 of 65% zal in de praktijk niet worden ervaren door de gebruikers. De data van het Europese onderzoek zijn mogelijk maatgevender dan de data van de RP-884 database, waar ook data van zeer warme klimaten in verwerkt zijn. In Europese SCATs-onderzoek wordt voor de horizontale as de RMOT gebruikt die een nauwere correlatie geeft tussen de buitentemperatuur en de comforttemperatuur.