

CHILL WP7

R7.2 Literatuurstudie fysiologie

Wim Kornaat, Olav Vijlbrief, Linda Hoes

20 maart 2026



Inleiding en doel

- Door klimaatverandering, verstedelijking en beter geïsoleerde woningen neemt de vraag naar koeling in de gebouwde omgeving toe.
- In taak 7.2 van CHILL worden verschillende aanpakken voor het koelen van bestaande woningen onderzocht, met een onderscheid tussen condenserend en niet-condenserend koelen.
- De onderzoeksvraag hierbij is:
Hoe ervaren bewoners thermisch comfort onder verschillende binnenklimaatomstandigheden, en welke grenswaarden zijn relevant voor het ontwerpen van toekomstbestendige lage-temperatuur warmte- en koelsystemen?
NB. Hierbij ligt de focus op de zomersituatie, maar ook de wintersituatie wordt in beschouwing genomen.
- Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden is onderzocht:
 - Welke bestaande modellen/rekenmethodes/criteria beschikbaar zijn voor thermisch comfort en hittestress,
 - Wat belangrijke parameters zijn voor thermisch comfort,
 - Hoe gevoelig thermisch comfort is voor variatie in deze parameters.

Thermisch comfort

- Thermisch comfort en discomfort geven fysiologisch gezien de algehele staat van het thermoregulatiesysteem van een persoon aan.
- Volgens Fanger¹ wordt thermisch comfort bereikt als:
 - De warmtehuishouding in balans is,
 - De zweetproductie binnen comfortgrenzen ligt,
 - De gemiddelde huidtemperatuur binnen comfortgrenzen ligt.
- Naast de staat van het thermoregulatiesysteem spelen ook andere factoren een rol bij de beleving van thermisch comfort (o.a. sociale omgeving, verlichting, controle over de situatie).

¹ P. Fanger, Thermal comfort, Copenhagen: Danish Technical Press, 1970

Parameters thermisch comfort

- Luchttemperatuur
 - *Speelt een belangrijke rol voor de convectieve warmteoverdracht tussen het lichaam en de omgevingslucht.*
- Stralingstemperatuur
 - *Warmte-uitwisseling vindt plaats door straling tussen het lichaam en de omringende oppervlakken.*
- Luchtvochtigheid
 - *Heeft invloed op de warmteafvoer door verdamping van transpiratie aan het huidoppervlak.*
- Luchtsnelheid
 - *Luchtbewegingen rond het lichaam beïnvloeden de warmteoverdracht naar of van de huid.*
- Metabolisme (activiteitsniveau)
 - *De hoeveelheid warmte die in het lichaam wordt geproduceerd door lichamelijke activiteit.*
- Kleding (clo-waarde)
 - *Kleding vormt een thermische weerstand tussen lichaam en omgeving.*

Modellen/rekenmethodes/criteria thermisch comfort

- Methoden worden beschouwd, welke gericht zijn op:
 - Algeheel comfort
 - Lokaal comfort
 - Hittestress
- Wettelijke eisen voor thermisch comfort zijn beperkt:
 - Nieuwbouw:
 - TOjuli en GTO-uren vanuit de energieprestatiebepaling (NTA8800), zie slide 10
 - Eis aan tocht vanuit BBL voor nieuwbouw, zie slide 16
 - Bestaande bouw:
 - Geen eisen
- Wel zijn er verschillende normen/richtlijnen voor thermisch comfort die hierna worden toegelicht.

Algeheel thermisch comfort

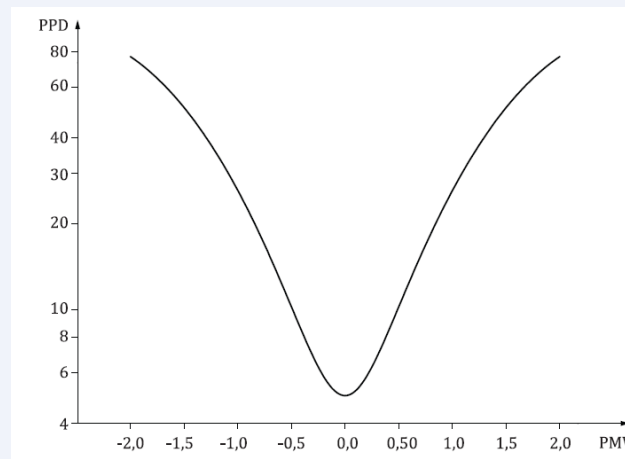
- Methoden voor het beoordelen van het algeheel thermisch comfort in een ruimte zijn:
 - Fanger (PMV/PPD) met grenswaarden volgens:
 - NEN-EN-ISO 7730:2025
 - TO-uren en GTO-uren (afgeleid van Fanger-model)
 - Adaptieve methode voor warme omstandigheden met grenswaarden volgens:
 - ISSO publicatie 74:2024,
 - Methodiek voor slaapkamers¹.

¹Peeters, L., de Dear, R., Hensen, J., D'haeseleer, W. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. Applied Energy, Vol. 86, Issue 5, 2009, pages 772-780, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.011>. 2009

Fanger methode (PMV/PPD)

- Begin jaren 1970 ontwikkeld door Fanger.
- Op basis van klimaatkamer onderzoek met proefpersonen.
- Gebaseerd op het warmtebalansmodel van het menselijk lichaam.
- Ontwikkeld voor kantoren, maar breed toegepast in diverse gebouwtypen, incl. woningen.
- Voorspelt voor een grote groep personen op basis van de lucht- en stralingstemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, luchtsnelheid, metabolisme en kleding:
 - Predicted Mean Vote (PMV),
 - Predicted Percentage Dissatisfied (PPD).

PMV(-)	Beoordeling
+3	Heet
+2	Warm
+1	Enigszins warm
0	Neutraal
-1	Enigszins koel
-2	Koel
-3	koud



Operatieve temperaturen volgens NEN-EN-ISO 7730:2025

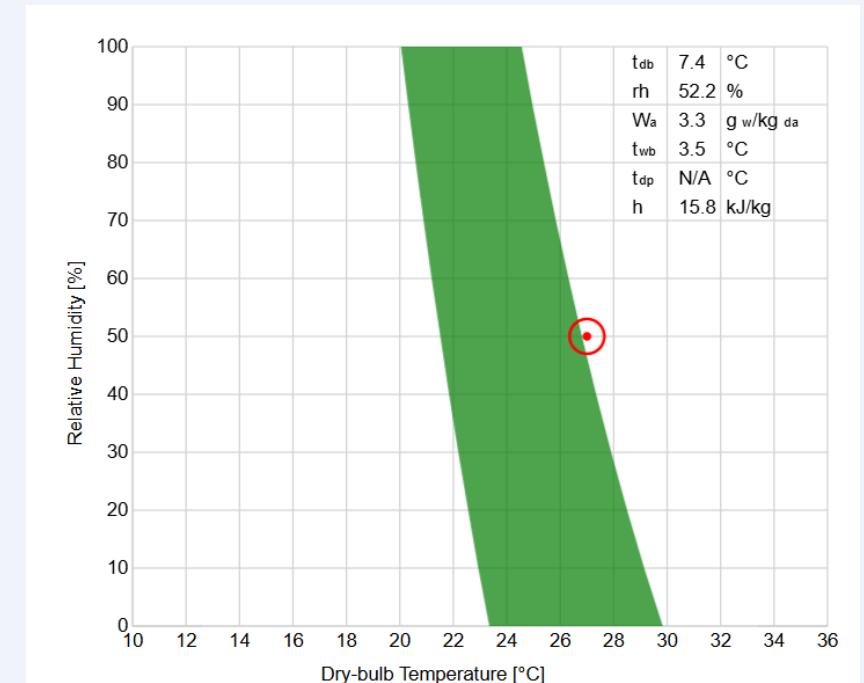
- Gebaseerd op Fanger model.
- Categorieën I, II, III en IV met respectievelijk PPD <6%, <10%, <15% en <25%.
- Woningen vergelijkbaar met activiteit 1,2 met
- Categorie II (PPD<10%):
 - Zomer: $T_{\text{operatief}}^1 = 22$ tot 26°C
 - Winter: $T_{\text{operatief}}^1 = 20$ tot 24°C

Type of building or space	Activity met W/m^2	Category	Operative temperature $^\circ\text{C}$	
			Summer (cooling season)	Winter (heating season)
Single office Landscape office Conference room Auditorium Cafeteria or restaurant Classroom	1,2 met	I	$24,5 \pm 1,0$	$22,0 \pm 1,0$
		II	$24,5 \pm 1,5$	$22,0 \pm 2,0$
	70 W/m^2	III	$24,5 \pm 2,5$	$22,0 \pm 3,0$
		IV	$24,5 \pm 3,5$	$22,0 \pm 4,0$
Kindergarten Standing or sedentary	1,4 met	I	$23,5 \pm 1,5$	$20,5 \pm 2,0$
		II	$23,5 \pm 2,0$	$20,5 \pm 3,0$
	81 W/m^2	III	$23,5 \pm 3,0$	$20,5 \pm 4,0$
		IV	$23,5 \pm 4,0$	$20,5 \pm 5,0$
Department store Standing or walking	1,6 met	I	$23,0 \pm 1,5$	$20,0 \pm 2,0$
		II	$23,0 \pm 2,0$	$20,0 \pm 3,0$
	93 W/m^2	III	$23,0 \pm 3,0$	$20,0 \pm 4,0$
		IV	$23,0 \pm 4,0$	$20,0 \pm 5,0$

¹ De operatieve temperatuur is het gemiddelde van de lucht- en stralingstemperatuur.

Effect relatieve luchtvochtigheid op algeheel comfort

- De temperatuureisen volgens NEN-EN-ISO 7730 gelden voor een relatieve luchtvochtigheid van 50%, waarbij wordt aangegeven dat het effect van relatieve luchtvochtigheid op comfort beperkt is.
- Dit volgt ook uit berekeningen met het Fanger-model: 10% stijging van de relatieve luchtvochtigheid wordt als even warm ervaren als circa 0,6°C stijging van de luchttemperatuur (bij ongewijzigde stralingstemperatuur).
- In de figuur hiernaast wordt met de begrenzingen van het groene veld een PMV van respectievelijk -0,5 en +0,5 aangegeven.



TO-uren en GTO-uren

- Het Rijksvastgoedbedrijf (destijds Rijksgebouwendienst) heeft richtlijnen ontwikkeld voor oververhitting in kantoren¹, gebaseerd op het comfortmodel van Fanger.
- Eind jaren '70: introductie van de temperatuuroverschrijding-methode (TO).
- TO = aantal uren boven 25°C, passend bij PMV van circa 0,5 (bovengrens neutraal kantoorcomfort).
- Richtwaarde: 100 uur/jaar (5% van 2000 werkuren/jaar).
- Eind jaren '80: introductie van de gewogen temperatuuroverschrijding-methode (GTO).
- Hogere weegfactor voor uren bij grotere overschrijding van PMV=0,5.
- Wordt in Nederland nog steeds toegepast.
- Richtwaarde: 150 uur te koud (PMV<-0,5) en 150 uur te warm (PMV>0,5).
- Voor woningen hanteert NTA 8800: GTO<450 uur in aanvulling op de TO_{juli}-eis, waarmee het risico op temperatuuroverschrijding in juli wordt aangegeven.

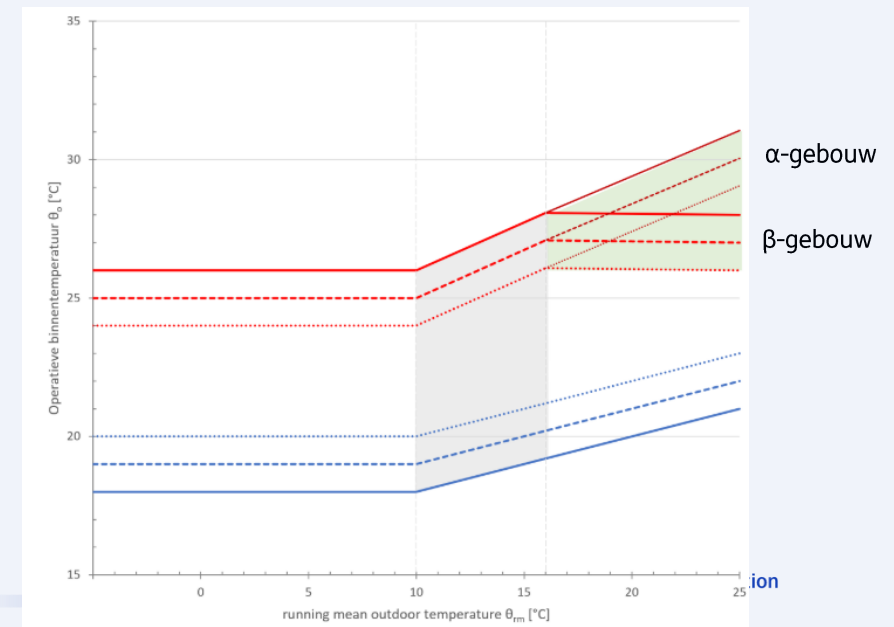
¹ ISSO publicatie 74 Thermische behaaglijkheid, December 2024

Adaptieve methode voor warme situaties

- Ontwikkeld rond de eeuwwisseling door de Dear en Brager¹.
- Gebaseerd op diverse veldmetingen en comfortstudies.
- Wetenschappelijk aangetoond dat in warme situaties comforttemperaturen variëren met recente buitenklimaat, mits gebruikers zelf invloed kunnen uitoefenen op comfort (bijv. via kleding, raamgebruik, zonwering).
- RMOT= Running Mean Outdoor Temperature = gewogen buitentemperatuur over afgelopen 7 dagen.
- Toepasbaar in woningen, kantoren en scholen mits het een α -gebouw betreft², d.w.z.:
 - geen mechanische koeling en
 - te openen ramen.

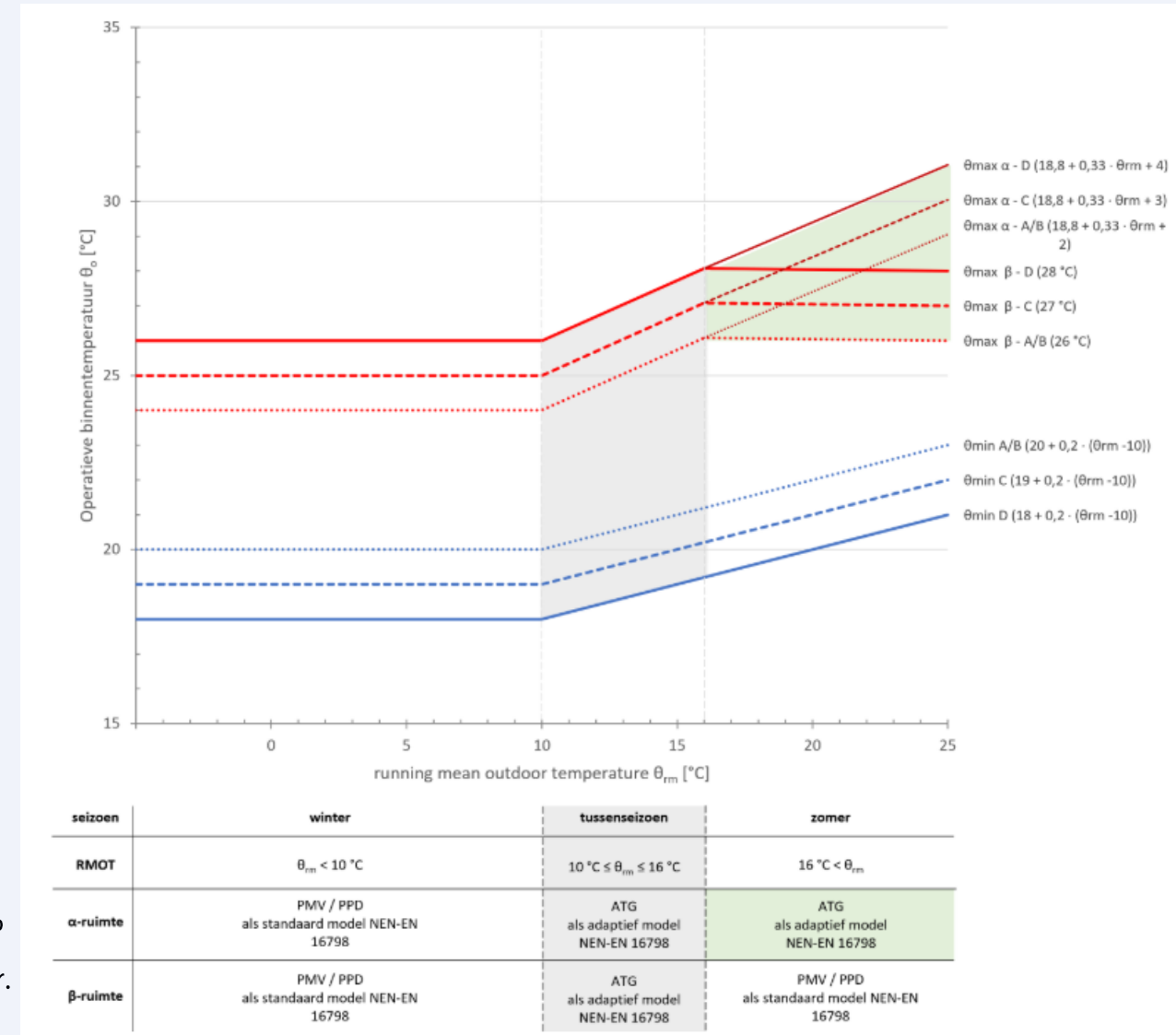
¹ de Dear, R.J., Brager, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, 104 (Pt 1A), pp. 145 - 167, 1998.

² Naast α -gebouwen worden ook β -gebouwen gedefinieerd, β -gebouwen hebben mechanische koeling en geen te openen ramen (zie ISSO 74; 2024). In β -gebouwen wordt een constante grenswaarde gehanteerd bij warme omstandigheden.



Operatieve temperaturen volgens ISSO 74:2024

- Gebaseerd op NEN-EN-16798-1 (adaptieve methode voor warme situaties en Fanger).
- Vier ambitieniveaus¹, te weten:
 - Klasse A: hoog (nieuwbouw),
 - Klasse B: gemiddeld (grootschalige renovatie),
 - Klasse C: matig (renovatie),
 - Klasse D: laag (bijzondere situaties).
- Klasse A/B:
 - Zomer:
 - α -gebouw: $T_{\text{operatief}}^2 = \max 29^\circ\text{C}$ bij $\theta_{\text{rm}}^3 = 25^\circ\text{C}$
 - β -gebouw: $T_{\text{operatief}}^2 = \max 26^\circ\text{C}$
 - Winter: $T_{\text{operatief}}^2 = 20$ tot 24°C



¹ Ambitienniveaus komen qua temperatuureisen overeen met resp. <5%, <10%, <15% en <25% ontevredenheid volgens ISSO 74:2014.

² De operatieve temperatuur is het gemiddelde van de lucht- en stralingstemperatuur.

³ Volgens KNMI klimaatscenario's is θ_{rm} maximaal 25°C in de huidige situatie (2020).

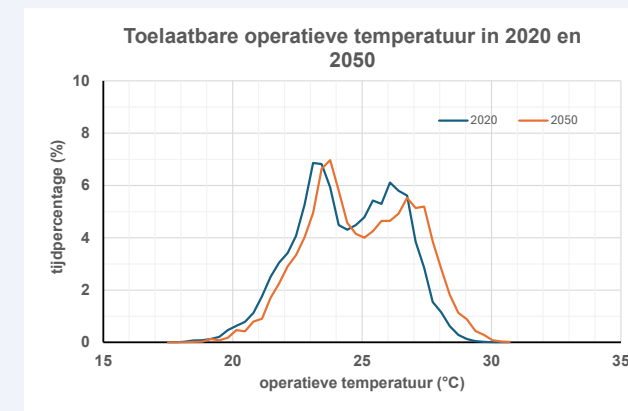
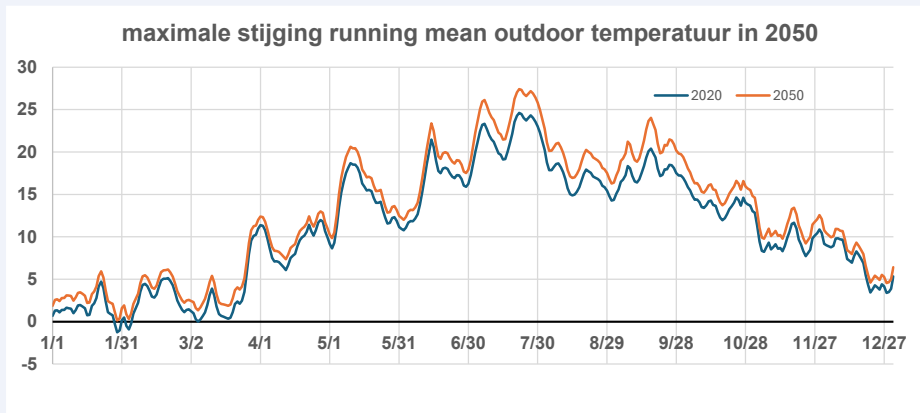
Opwarming volgens klimaatscenario's KNMI

- Onderstaande figuren zijn gebaseerd op KNMI klimaatscenario's¹ waarbij op basis van historische weerdata over de afgelopen 30 jaar (1991-2020) een voorspelling is gedaan voor de situatie in 2050.
- Hieruit volgt voor de situatie in 2050 ten opzichte van de historische data (aangeduid als 2020):
 - Een stijging van de running mean outdoor temperatuur (figuur links) voor een warm jaar (in dit geval 2006),

NB. Stedelijke hitte-eilanden kunnen leiden tot 1 á 5°C stijging van de buitentemperatuur met name gedurende de nacht² en dus een verdere verhoging van de running mean outdoor temperatuur.

- Een verschuiving in de toegestane operationele temperatuur op basis van de running mean outdoor temperatuur, berekend over de volledige 30 jaar (historische) data (figuur rechts).

NB. Deze operationele temperatuur is berekend o.b.v. de ISSO 74:2024 klasse A/B.

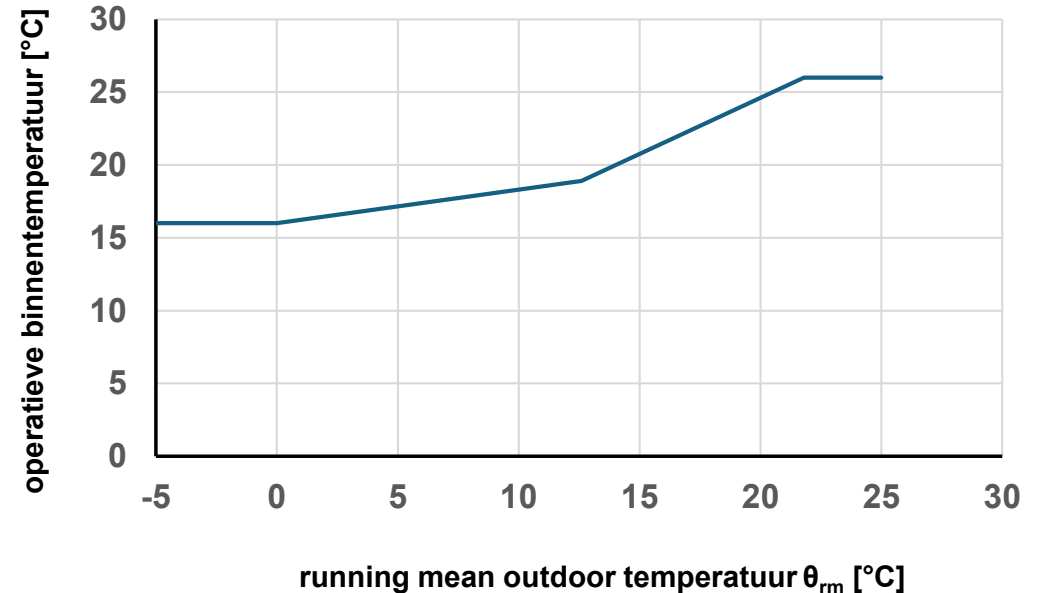


¹ [KNMI Klimaatscenario's](#)

² Klimaatadaptatie verduurzaming gebouwde omgeving, RVO/TKI Urban Energy, Nieman, 27 februari 2025

Algeheel comfort in slaapkamers

- Thermisch comfort in de slaapkamer is afwijkend door o.a. afwijkende clo-waarde en minder mogelijkheden voor adaptieve handelingen.
- Door Peeters et al. (2009)¹ zijn gewenste adaptieve operationele temperaturen afgeleid voor de slaapkamer (zie figuur hiernaast) waarbij gebruik is gemaakt van CIBSE, 2006:
 - maximum temperatuur < 26°C
 - bij gebruik ventilator verhoging met 3°C toelaatbaar (29°C)
 - in winter 17°C



¹Peeters, L., de Dear, R., Hensen, J., D'haeseleer, W. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. Applied Energy, Vol. 86, Issue 5, 2009, pages 772-780, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.011>. 2009

Lokaal (dis)comfort

- Lokaal thermisch (dis)comfort kan ontstaan door een ongewenste warmte of koude ervaring op een deel van het lichaam van een persoon.
- Oorzaken zijn:
 - Tocht: luchtbewegingen met relatief lage temperatuur en lage snelheid kunnen gevoeld worden als afkoelend en zorgen voor ongemak,
 - Verticale temperatuurgradiënt: verschil tussen de temperatuur bij het hoofd en de voeten vermindert het gevoel van behaaglijkheid,
 - Warme of koude vloeren: koude vloeren kunnen leiden tot koude voeten en warme vloeren tot een lokale warmtebelasting,
 - Stralingsasymmetrie: ongelijke oppervlaktetemperaturen rond een persoon veroorzaken lokale warmte- of koudebelasting en discomfort.
- Grenswaarden zijn gegeven in ISSO 74:2024 en NEN-EN-ISO 7730:2025 (beide geven identieke grenswaarden).

Toelaatbare luchtsnelheid in relatie tot tocht (ISSO 74:2024, NEN-EN-ISO 7730:2025)

Klasse / categorie ¹	Percentage ontevredenen (%)	Maximale luchtsnelheid (m/s)	
		winter	zomer
A / I	10	0,10	0,12
B / II	20	0,15	0,19
C / III	30	0,21	0,24

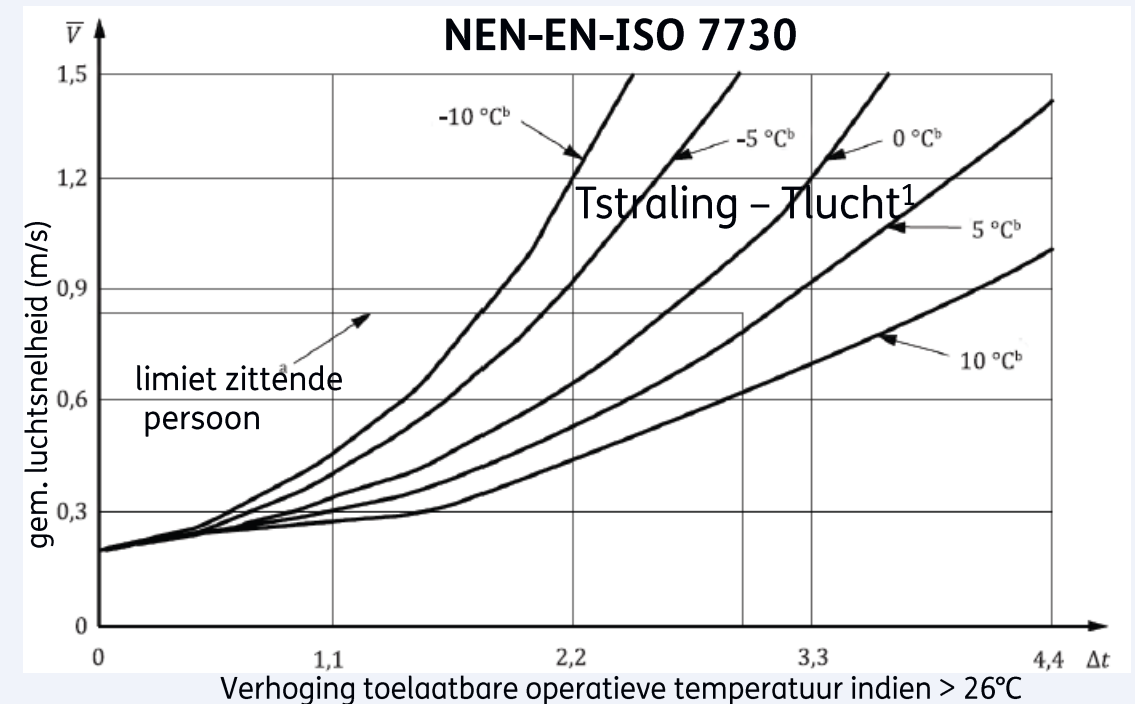
¹ Klasse/categorie aanduiding volgens respectievelijk ISSO 74 en NEN-EN-ISO 7730.

- Aanvullend geeft BBL voor thermische comfort bij nieuwbouw een toelaatbare luchtsnelheid van 0,2 m/s aan.
- Tocht vooral probleem bij:
 - natuurlijke toevoer in de gevel,
 - goed geïsoleerde woning waarbij verwarming veel uitstaat (geen koude-opvang onder het raam).
- Conclusie op basis van tabel: aandachtspunt vormt lage inblaastemperatuur bij koeling in combinatie met (geforceerde) luchtstroom.

Verkoeling door luchtsnelheid in warme situaties

- Onder zomerse omstandigheden kan een verhoogde luchtsnelheid, bijvoorbeeld met behulp van een ventilator, verkoeling geven.
- De beoordeling hiervan verschilt enigszins in ISO 74:2024 en NEN-EN-ISO 7730:2025.

ISSO 74	
Luchtsnelheids-range (m/s)	Verhoging toelaatbare operationele temperatuur indien > 25°C (°C)
0 – 0,6	1,2
0,6 – 0,9	1,8
0,9 – 1,2	2,2



¹ Effectiever bij lagere luchttemperatuur

Toelaatbare verticale temperatuurgradiënt (ISSO 74:2024, NEN-EN-ISO 7730:2025)

Klasse / categorie ¹	Percentage ontevreden (%)	Maximale verticale temperatuurgradiënt (K)
A / I	3	2
B / II	5	3
C / III	10	4

¹ Klasse/categorie aanduiding volgens respectievelijk ISSO 74 en NEN-EN-ISO 7730.

- Tabel geldt bij een met de hoogte toenemende temperatuur.
- Verschil in temperatuur bij enkels (0,1 m) en hoofd (1,1 m)
- Conclusie: aandachtspunt bij vloerkoeling.

Toelaatbare stralingsasymmetrie (ISSO 74:2024, NEN-EN-ISO 7730:2025)

Klasse / categorie ¹	Percentage ontevreden (%)	Max. temperatuurverschil bij plafond (K)		Max. temperatuurverschil bij wand/raam (K)	
		warm	koud	warm	koud
A / I	5	5	14	23	10
B / II	5	5	14	23	10
C / III	10	7	18	35	13

¹ Klasse/categorie aanduiding volgens respectievelijk ISSO 74 en NEN-EN-ISO 7730.

- Conclusie: stralingsasymmetrie vormt een aandachtspunt bij condenserende koeling aan de wand en in iets mindere mate bij koeling aan het plafond.

Toelaatbare vloertemperaturen (ISSO 74:2024, NEN-EN-ISO 7730:2025)

Klasse / categorie ¹	Percentage ontevredenen (%)	Oppervlaktetemperatuur vloer (°C)
A / I	10	19 tot 29
B / II	10	19 tot 29
C / III	15	17 tot 31

¹ Klasse/categorie aanduiding volgens respectievelijk ISSO 74 en NEN-EN-ISO 7730.

- Conclusie: te lage vloertemperaturen in geval van vloerkoeling zijn niet waarschijnlijk, omdat te lage temperatuur met oog op condensatie ongewenst is.

Beoordeling van hittestress

- Hittestress is de fysiologische belasting die ontstaat wanneer het lichaam warmte niet meer voldoende kan afvoeren, waardoor kerntemperatuur en/of zweetproductie gevaarlijke niveaus bereiken.
- Hittestress gaat dus niet primair om comfort, maar om gezondheidsrisico's bij blootstelling aan warme omstandigheden.
- Een aantal methoden voor de beoordeling van hittestress zijn:
 - Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)
 - Predicted Heat Strain (PHS)
 - Heat Index (HI)

Wet Bulb Globe Temperatuur (NEN-EN-ISO 7243:2017)

- WBGT is een fictieve temperatuur die de ervaren hittestress tijdens arbeid in warme binnen- en buitenomstandigheden weergeeft.
- WBGT combineert in één waarde de effecten van verdamping, straling en convectie op de warmtelast.
- $WBGT = 0,7 * \text{natte boltemperatuur} + 0,3 * \text{zwarte boltemperatuur}$.
- Bij 8 uur blootstelling, 115 W metabolisme en $clo=0,6$ (lange katoenen broek en shirt met lange mouwen) geldt voor een niet geacclimatiseerd persoon een WBGT-limiet van 32°C.
- In literatuur wordt voor kwetsbare ouderen een concept WBGT-limiet van 29°C genoemd¹.
- Voorgenoemde WBGT-limieten worden bereikt bij een operatieve temperatuur (zwarte boltemperatuur) van respectievelijk 31 en 34°C in combinatie met een relatieve luchtvochtigheid van 80% (of nog hogere operatieve temperaturen bij een lagere relatieve luchtvochtigheid).
- Conclusie: WBGT lijkt niet geschikt voor de beoordeling van de situatie in Nederlandse woningen gezien bovengenoemde extreme situaties, mede omdat bewoners bij warme situaties lichtere kleding dragen ($clo=0,3$ (korte broek en T-shirt)).

¹ Zuurbier, M., Kingma, B. Lekker warm of gevaarlijk heet? – Hitte in relatie tot de gezondheid en het gedrag van bewoners. ISIAQ symposium (T)huis in de toekomst: woning en welzijn in een opwarmend klimaat. 4 juli 2025.

Predicted Heat Strain (EN-ISO 7933:2023)

- Predicted Heat Strain (PHS) model:
 - Bepaalt de warmtebelasting in hete werkomgevingen,
 - Voorspelt de stijging van de kerntemperatuur én het totaal waterverlies per uur,
 - Berekent de maximaal toelaatbare blootstellingstijd (DLE) o.b.v. maximale kerntemperatuur of waterverlies (afhankelijk van hetgeen maatgevend is).
- Invoer:
 - Omgevingsdata (Tlucht, Tstraling, RV, luchtsnelheid),
 - Metabolisme,
 - Kledingisolatie en evaporatieweerstand.
- PHS-model is niet beschikbaar, maar code is beschreven in EN-ISO 7933.
- Conclusie: dit model lijkt niet geschikt voor Nederlandse woningen gelet op de extreme condities waarvoor het PHS-model bedoeld is.

Heat Index

- Heat Index: Geeft aan hoe warm het voor het menselijk lichaam aanvoelt door het combineren van luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid ([Heat Index Chart](#)).
- Ontwikkeld door National Weather Service voor buiten in de schaduw.
- Formule voor Heat Index HI(°F) als functie van luchttemperatuur T(°F) en RH(%):

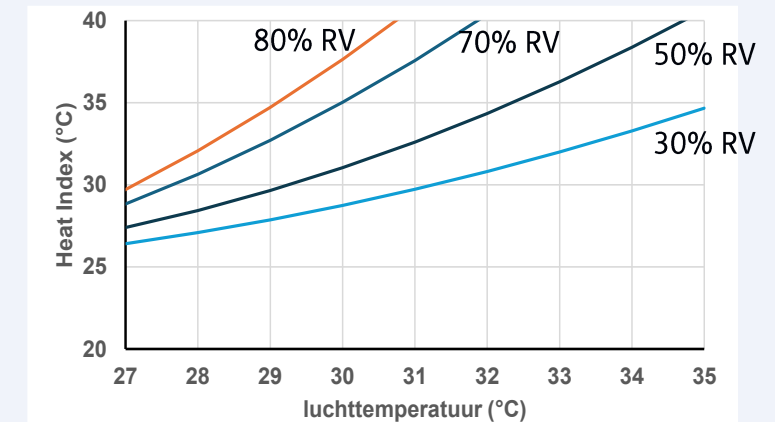
$$\begin{aligned} \text{HI}(\text{°F}) = & -42.379 + 2.04901523 * T + 10.14333127 * \text{RH} - 0.22475541 * T * \text{RH} - 0.00683783 * T^2 - 0.05481717 * \text{RH}^2 \\ & + 0.00122874 * T^2 * \text{RH} + 0.00085282 * T * \text{RH}^2 - 0.00000199 * T^2 * \text{RH}^2 \end{aligned}$$

- Geldig voor luchttemperatuur van 27 tot 45°C en relatieve luchtvochtigheid van 40 tot 100%.
- Grenswaarden volgens National Weather Station:

Categorie	HI-grenswaarde (°C)
Voorzichtigheid	27 tot 32
Extreme voorzichtigheid	32 tot 39
Gevaar	39 tot 51

- Conclusie: Toepasbaarheid voor Nederlandse woningen onduidelijk.

NB. De methode is ontwikkeld voor buitensituaties: door hogere lichtsnelheden buiten zal deze methode in woningen een onderschatting geven van wat acceptabel is, terwijl door meer zonstraling buiten in woningen juist een overschatting zal optreden van wat acceptabel is:



Bevindingen algeheel comfort

- Toelaatbare operationele temperatuur volgens:
 - Fanger bij 10% ontevredenen (NEN-EN-ISO 7730:2025)
 - Zomer: 22 tot 26°C
 - Winter: 20 tot 24°C
 - Adaptieve temperatuur grenswaarde (ISSO 74:2024, maximale waarde afhankelijk van maximaal optredende running mean outdoor temperatuur):
 - 29°C
 - 30°C mogelijk in 2050

NB. In de praktijk zien we dat bewoners lagere temperaturen al als oncomfortabel beoordelen. Daarom kan worden gesteld dat bovengenoemde grenswaarden aan de hoge kant lijken te zijn.

- Slaapkamer:
 - Zomer: < 26°C, of bij verhoogde lichtsnelheid <29°C
 - Winter: 17°C

Bevindingen lokaal (dis)comfort

- Tocht:
 - Aandachtspunt: lage inblaastemperaturen bij koeling in combinatie met (geforceerde) luchtstroom.
 - Onder zomerse omstandigheden kan verhoogde lichtsnelheid verkoeling gegeven (verhoging operationele temperatuur met 1,2°C , 1,8°C en 2,2 °C bij resp. 0,6 , 1,9 en 1,2 m/s)
- Verticale temperatuurgradiënt:
 - Maximaal 3 K bij 5% ontevredenen¹
 - Aandachtspunt bij vloerkoeling
- Stralingsasymmetrie:
 - Met wand maximaal 10 K bij 5% ontevredenen¹
 - Aandachtspunt: condenserende koeling aan wand
- Vloertemperatuur:
 - Toelaatbaar 19 tot 29°C bij 10% ontevredenen¹
 - Haalbaar bij goed ontwerp van vloerverwarming/-koeling

¹ Conform klasse B ISSO 74 en categorie II NEN-EN-ISO 7730.

Bevindingen hittestress

- Er is nog geen geaccepteerde methodiek voor de beoordeling van hittestress in woningen.
- Wet Bulb Globe Temperatuur (NEN-EN-ISO 7243:2017): lijkt niet geschikt voor Nederlandse woningen gezien de extreme situaties waarvoor WBGT bedoeld is.
- Predicted Heat Strain (EN-ISO 7933:2023): lijkt niet geschikt voor Nederlandse woningen gelet op extreme condities waarvoor PHS-model bedoeld is.
- Heat Index: toepasbaarheid voor Nederlandse woningen onduidelijk.
- Hittestress situaties zouden vermeden moeten worden. Binnen CHILL houden we de thermische comfortcriteria aan zoals beschreven op voorgaande slides.