

BOUWFYSICA

ir. C.F.M. de Vaan, ir. F.J.M. Wiedenhoff en prof.dr.ir. J.L.M. Hensen

Christa de Vaan is werktuigbouwkundig ingenieur en duurzaamheidsadviseur bij Arup in Amsterdam. Jaap Wiedenhoff is directeur van Arup in Amsterdam. Jan Hensen is hoogleraar Gebouwprestatiesimulatie binnen de 'unit Building Physics & Systems' aan de TU Eindhoven.

De bouwregelgeving spitst steeds meer toe op 'thermische massa'. Ook voor passieve gebouwen wordt thermische massa vaak afgeschilderd als een besparende maatregel op het energieverbruik van klimaatinstallaties. Maar de effectiviteit is van verschillende factoren afhankelijk en thermische massa kan zelfs averechts werken op het energieverbruik: een grotere massa moet immers opwarmen en afkoelen. In het tussenseizoen verbruikt een 'licht gebouw' meer energie, maar wanneer overwegend koeling of verwarming nodig is zal een 'zwaar gebouw' meer energie verbruiken. De 'massa-mythe' ligt genuanceerder.

In een hotel kan energie worden bespaard met een licht gebouw door de (klimaat)installaties pas te activeren wanneer een gast arriveert, bijvoorbeeld met een detectie aan zijn kamersleutel. Het systeem heeft in een licht gebouw een vrij korte reactietijd, waardoor deze het grootste deel van de dag – zonder gasten – kan worden uitgeschakeld. Ook houdt de ruimte minder warmte vast en is het 's nachts koeler.

Niet zomaar checklist

Duurzaamheid lijkt zoveel in te gaan houden als een checklist van maatregelen zoals natuurlijke ventilatie, grote ramen op het zuiden met overstekken, nachtventilatie, groene daken, hoge isolatiewaarden en meer gebouwmassa. Deze maatregelen kunnen

een gebouw, hoe langzamer de temperatuur in een gebouw stijgt of daalt. In het algemeen zijn er drie fysische processen waarop thermische massa van invloed is (afb. 1).

1) Vertraging in warmtetransport (warmtetransmissie) door ondoorzichtige gebouwomhullingen (gevels, daken, vloeren)¹⁾.

2) Vertraging in de omzetting van interne warmteproductie naar daadwerkelijk afgegeven warmte²⁾.

3) Vertraging in afkoeling en opwarming van een gebouw na een verandering in de insteltemperatuur (setpoint).

Dynamische vergelijking energieverbruik

Om het effect van thermische massa in rekening te brengen kan niet worden volstaan

Massa is genuanceerde ballast

Thermische massa wordt vaak in één zin genoemd met energiebesparing, zonder dat dit voor een specifieke situatie is geanalyseerd. Zo is in Nederland het effect van thermische massa in de nieuwe energieprestatienorm (epn) opgenomen. Daartoe moeten voor de bepaling van de effectieve thermische capaciteit in utiliteitsgebouwen twee eigenschappen worden aangegeven: de massa van de vloerconstructie per m² gebruiksoppervlak en het soort plafond (gesloten, geen of open). Daarbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat – bij bepaalde gebouwvormen en gebruiksfuncties – massa juist het energieverbruik negatief beïnvloedt.

echter voor verschillende klimaten, gebruiksfuncties en gebouwvormen niet onder één noemer worden geplaatst en daarom zal ieder gebouw moeten worden geanalyseerd. Daarbij moet de fysische achtergrond worden begrepen en niet in hokjes worden gedacht. Het technische gebouwconcept en -ontwerp moeten samen gaan. Klimaatinstallaties voor een zwaar gebouw moeten anders worden ontworpen dan voor een licht gebouw en zo zal bij een gebouwtype een lichte of juiste zware uitvoering passen. Een licht gebouw verbruikt in tussenseizoenen meer energie, maar wanneer overwegend koeling of verwarming nodig is, zal een zwaar gebouw meer energie kosten.

Wat is thermische massa?

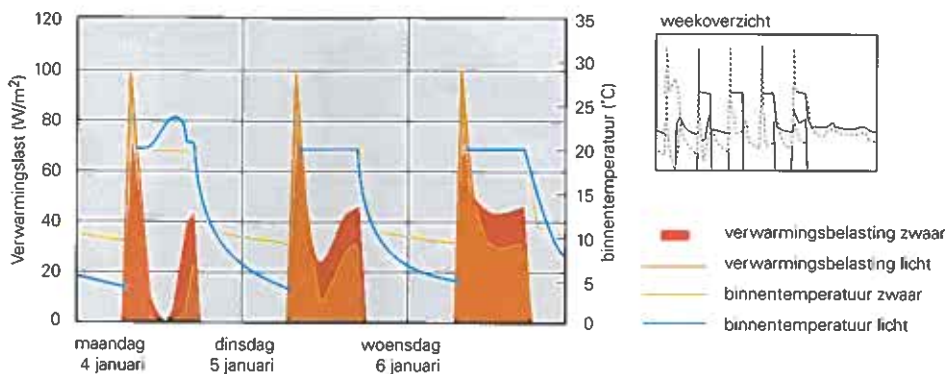
Thermische massa is de capaciteit voor het opslaan en afstaan van warmte. Het is over het algemeen afhankelijk van de massa van een materiaal; de massa is niet één-op-één hetzelfde als de opslagcapaciteit. In dit artikel wordt met thermische massa eenvoudigweg bedoeld: massa (of een zwaar gebouw) of het ontbreken daarvan bij een licht gebouw. Hoe hoger de thermisch massa van

met de berekening van de warmtestromen met de fysische parameters (temperaturen enzovoort) op één moment. Ook het effect van de voorgaande uren op dat specifieke moment moet worden ingecalculeerd. Het is bijvoorbeeld voor de werking van de thermische capaciteit van belang of dat het voorgaande uur 5 °C of 25 °C is geweest. Of er dus in het voorgaande uur al warmte is afgegeven of juist opgeslagen. Het in rekening brengen van dit effect is het kenmerk van de 'dynamische simulatie'.

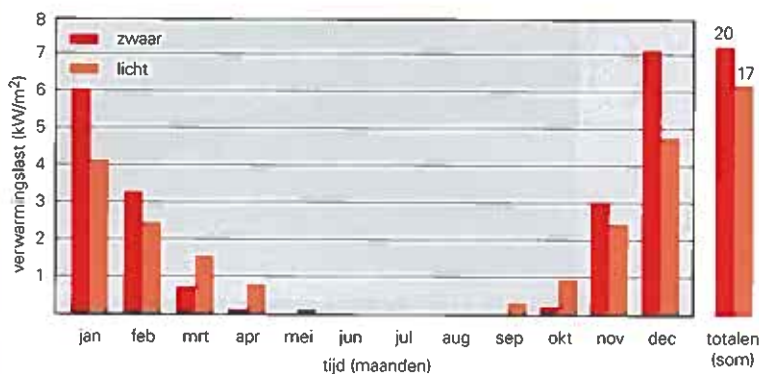
Om het totale effect van de thermische massa op de drie fysische processen te kunnen bepalen is een dynamische simulatie uitgevoerd op een zwaar en een licht kantoorgebouw via het programma IES Virtual Environment met dezelfde isolatiewaarde (R_e) van 3 m²K/W. Klimaatdata voor Amsterdam zijn gebruikt, waarbij de verwarmings- en koelinstallaties 's nachts zijn uitgeschakeld. In de volgende paragraaf wordt beschreven wat de gevolgen zijn van thermische massa in andere klimaten. De resultaten zijn niet rechtlijnig door te trekken naar andere situaties. Een ander klimaat, gebouwvorm, gebruiksfunctie of



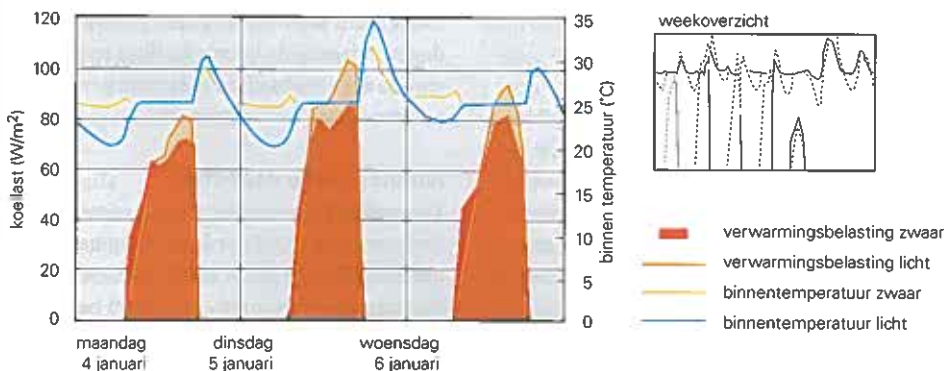
1. Drie fysische processen waarop de thermische massa van invloed is.



2. Vergelijking tussen de warmtevraag voor een zwaar en een licht gebouw voor enkele dagen in januari.



3. Vergelijking tussen de warmtevraag per maand voor een zwaar en een licht gebouw.



4. Vergelijking tussen de koellast voor een zwaar en een licht gebouw voor enkele dagen in juli.

stroomregeling zullen de resultaten beïnvloeden. Maar met de simulatie kunnen verschillen in het gedrag worden herleid, en doorbereideneerd naar andere situaties.

Verwarming

's Avonds koelt een licht gebouw meer af dan een zwaar gebouw. Gecombineerd met de snellere geleiding van warmte door de con-

structie, leidt dat tot een verhoogde verwarmingsvraag (piek) in de ochtend (afb. 2). Het zware gebouw heeft echter in totaal meer energie nodig om 's ochtends zijn gehele massa op te warmen. Dit betekent dat de curve voor de verwarmingsvraag voor het zware gebouw in de ochtend lager en breder is. De overdag geproduceerde warmte (personen, apparatuur, verlichting en zonne-

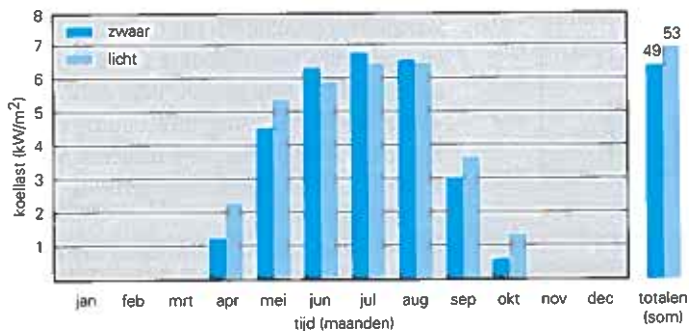
warmte) zal grotendeels pas in de nacht vrij komen bij een zwaar gebouw. Dit in tegenstelling tot een licht gebouw waar deze warmteproductie vrijwel direct nuttig zal zijn in het verlagen van de warmtelast, met als resultaat: een lager energieverbruik overdag (afb. 2).

In het tussenseizoen (herfst/lente) kan de snelle reactie van het lichte gebouw een negatief effect hebben op het energieverbruik voor verwarming (afb. 3). Als het in de nacht te ver afkoelt moet het 's ochtends worden opgewarmd tot de binnentemperatuur weer een graad of 20 is.

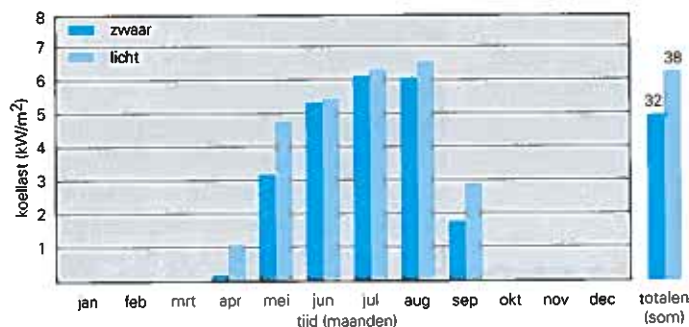
Koeling

Bij koeling kan de opslagcapaciteit van thermische massa voordelen bieden, aangezien een deel van de warmtelast en het warmte-transport door de gebouwmhulling pas vrij komt gedurende de nacht, als de koelinstallaties zijn uitgeschakeld. Dit resulteert in een lichte verlaging van de koelbehoefte in de nacht (afb. 4). Daarbij bestaat in het tussenseizoen het risico dat bij een licht gebouw 's ochtends een verwarmingsbehoefte ontstaat door afkoeling 's nachts terwijl op dezelfde dag door hoge buitentemperaturen en een hoge warmteproductie koelbehoefte is. Op zeer warme dagen wordt het verschil in energieverbruik tussen de twee concepten kleiner. Als de warmtelast verder toeneemt, wordt de thermische massa een ballast voor het gebouw. De massa raakt als 'verzadigd' waardoor het 's nachts moeilijker is alle warmte te verliezen en het gedurende de dag meer energie kost om te koelen. Op zulke momenten is ook de verhoogde afkoeling van het lichte gebouw tijdens de nacht een voordeel. Afbeelding 5 laat zien dat het verschil in energieverbruik voor koeling minder wordt in de maanden met hogere temperaturen en groter in de maanden met lagere temperaturen.

Nachtventilatie kan effectief zijn in de afkoeling van het gebouw gedurende de zomernacht (afb. 6). Een aantal aspecten speelt een rol bij de keuze voor nachtventilatie, zoals gebruikspatronen, veiligheid, windsnelheden, luchtvochtigheid, regen, systeemregeling en onderhoud. Ook dient bij natuurlijke ventilatie te worden onderzocht of deze (inclusief



5. Vergelijking tussen de koelbehoefte – zonder nachtventilatie – per maand voor een zwaar en een licht gebouw.



6. Vergelijking tussen de koelbehoefte – met nachtventilatie – per maand voor een zwaar en een licht gebouw.

eventueel later geplaatste tussenwanden) voldoende effectief is. Met andere woorden: zijn de luchtstroming en het temperatuurverschil voldoende om het gebouw 's nachts af te koelen? En in geval van mechanische ventilatie, weegt de energiebesparing voor koeling op tegen het extra energieverbruik voor ventilatie. Op sommige dagen en in sommige klimaatzones met een hoge luchtvochtigheid is het temperatuurverschil tussen de luchttemperatuur overdag en 's nachts niet groot. Dan zal bij een gebouw met een grote massa het langer duren voor deze massa is afgekoeld. Hoge lichtsnelheden zijn noodzakelijk en natuurlijke ventilatie is niet langer effectief. Met nachtventilatie kan een licht gebouw voordelen bieden.

Verschillende klimaten

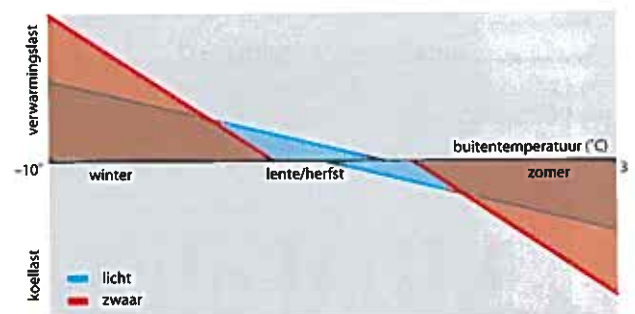
Het effect van de thermische massa op het energieverbruik van een gebouw is afhankelijk van het seizoen, maar ook van het klimaat. De bekendste klimaatclassificaties is die volgens Köppen-Geiger (afb. 9). Gebaseerd op de comfortbehoefte zijn daaruit voor gebouwontwerpen vier basis klimaat-

typen bepaald^[4]: 1) koude klimaten, 2) gematigd klimaat, 3) warm-droog klimaat en 4) warm-vochtig klimaat.

De klimaatzone van West-Europa ligt in een overlapgebied, doordat er een gematigd vrij vochtig klimaat heerst. Daarom kan niet eenduidig een voorkeur voor een licht of een zwaar gebouw worden uitgesproken. In veel gevallen is ontvochtiging nodig voor comfortabele niveaus. Dit gebeurt met actieve koeling (latente koeling, zie p. 46). Het klimaat is relatief koud in de vroege avond, maar de relatieve luchtvochtigheid van de buitenlucht blijft daarbij hoog. Later op de avond – zelfs wanneer de relatieve luchtvochtigheid zakt tot de bovengrens van het comfortgebied en de buitenluchttemperatuur en vochtigheid als comfortabel zal worden beschouwd – blijft de enthalpie (energie-inhoud) van de buitenlucht gelijk of zal groter zijn dan die van de binnenlucht. Dit betekent dat met buitenluchtventilatie weliswaar de temperatuur wordt verlaagd maar niet de enthalpie en daarmee de latente koellast. Dit kan zelfs leiden tot grotere



7. Indicatie van de invloed van thermische massa op het energieverbruik van een gebouw (- negatief, + positief).

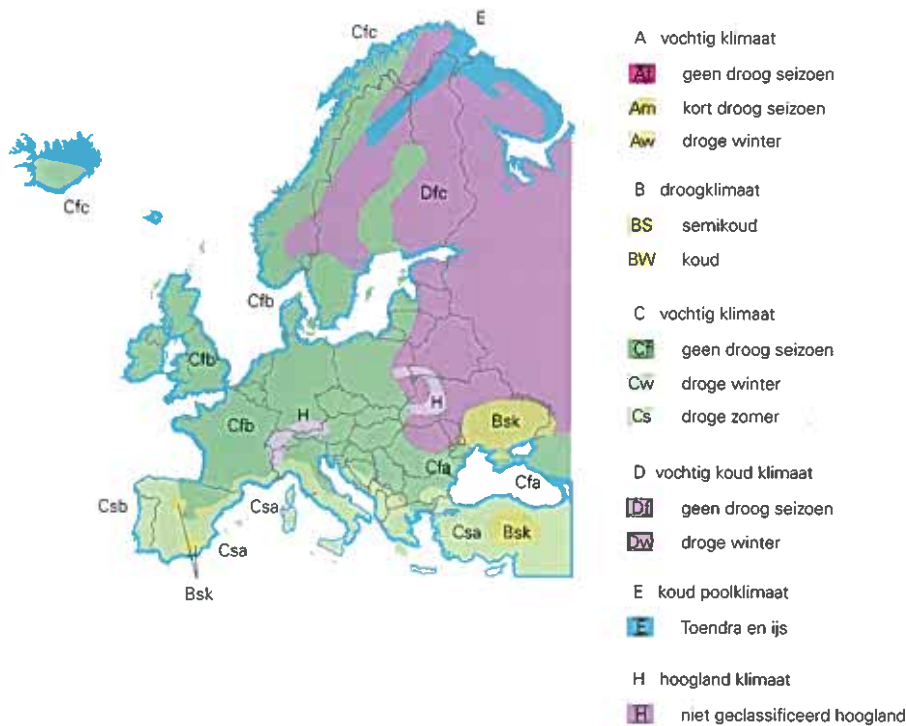


8. Schematische weergave van de warmtevraag en de koelbehoefte voor een zwaar en een licht gebouw ten opzichte van de buitentemperatuur.

vochtconcentraties in het gebouw, doordat gebouwmaterialen en meubels meer vocht uit de lucht absorberen. Later, gedurende de dag, zal daarbij de latente koellast nog verder stijgen door vocht en ventilatie van mensen, planten, machines enzovoort.

Nuancerende aspecten

De massa van een gebouw heeft soms positieve en soms negatieve invloed op het energieverbruik (afb. 7). In koude perioden heeft thermische massa overwegend een negatief effect. En in het tussenseizoen is thermische massa overwegend een voordeel. In afbeelding 8 staat dit seizoensafhankelijke effect grafische weergegeven. In het tussenseizoen verbruikt het lichte gebouw meer energie, maar wanneer overwegend koeling of verwarming nodig is zal een zwaar gebouw meer energie gaan verbruiken. Afhankelijk van de frequentieverdeling van de buitentemperatuur in een bepaald klimaat zal de effectiviteit van thermische massa ten opzichte van een licht gebouw veranderen. Zo zal een zwaar gebouw in een relatief koud klimaat minder energie verbruiken dan een



9. Klimaatclassificaties volgens Köppen-Geiger.

licht gebouw. Over het totale verschil in energieverbruik voor koeling en verwarming bij een zwaar gebouw en een licht gebouw kan geen algemene uitspraak worden gedaan, aangezien dit afhankelijk is van een aantal aspecten.

De functie

Afbeeldingen 7 en 8 gelden voor een kantoor en vergelijkbare functies. Echter in gebouwtypen waar een nachtverlaging of het volledig uitschakelen van het verwarmings- en koelsysteem niet wenselijk is, zal een licht gebouw overwegend minder positief zijn. Soms ligt dit nog iets complexer zoals bij een woning waarbij lagere nachttemperaturen voor de slaapvertrekken vaak comfortabel wordt gevonden, maar in de woonruimte juist niet.

De klimatisering

In een ongeklimatiseerd (zonder verwarming of koeling) gebouw of gebouwdeel zal het klimaat constanter zijn bij een gebouw met massa en heeft daardoor de voorkeur. In een zwaar gebouw worden de variaties in

dag- en nachttemperatuur uitgemiddeld over de tijd, bij een licht gebouw zullen de variaties in het binnenklimaat in grotere mate die van het buitenklimaat volgen.

Het klimaat

Het klimaat en met name de buitentemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid is sterk van invloed op het effect dat thermische massa op het energieverbruik heeft. In het gematigde en relatief vochtige klimaat van West-Europa ligt dit nog eens extra gecompliceerd.

Latente koeling

Vanwege de hoge luchtvochtigheid en vochtproductie wordt de lucht in de meeste nieuwe utiliteitsgebouwen ontvochtigd. Hoe groter het aandeel is van deze latente koellast in het totale energieverbruik, des te kleiner is het verschil tussen het totale energieverbruik voor koeling voor een licht en een zwaar gebouw. Daarbij zal het effect van nachtventilatie worden verlaagd en kan de vochtabsorptie door massa negatief werken op de latente koellast.

Literatuur

1. 'Residential Cooling and Heating Load Calculations', *ASHRAE Fundamentals Handbook*, ASHRAE, Atlanta 2005.
2. *Guide A, Environmental design*, CIBSE, Londen 2006.
3. S. Visitsak, *An evaluation of the bioclimatic chart for choosing design strategies for a thermostatically controlled residence in selected climates*, Texas University 2007.
4. S.V. Szokolay, *Introduction to architectural science, the basis of sustainable design*, Elsevier, Amsterdam 2008.
5. K. A. Dornelles en M. Roriz, 'Thermal Inertia, Comfort and Energy Consumption in Buildings: A Case Study in São Paulo State – Brazil', *International Journal for Housing Science and Its Applications* 28, deel 2, p. 153-162.
6. B. Givoni, 'Man, Comfort, climate analysis and building design guidelines', *Energy and Buildings* 18 (1992), p. 11-23.
7. B. Givoni, 'Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures', *Energy and Buildings* 28 (1998), p. 25-32.

Gebouwworm

Hoe groter de verhouding van gebouwomhulling en vloeroppervlak hoe gunstiger een licht gebouw. Dit komt doordat er meer warmte- en koudeverlies optreedt waardoor het seizoen met overwegend koeling of verwarming (en niet het tussenseizoen) leidend wordt in de bepaling van het totale verbruik.

De klimaatregeling

De regeling van de klimaatinstallaties is kritisch voor een lichtgewicht gebouw. Het klimaat in een zwaar gebouw is constanter. Een slim regelsysteem voorkomt dat in het tussenseizoen (mede door nachtventilatie) zowel koeling als verwarming nodig is. Dit is ook de reden dat een licht gebouw lastiger is te simuleren en de resultaten daardoor vaak ten onrechte negatief worden beoordeeld.

Isolatie waarde

Door extra isolatie zullen lichte gebouwen meer voordelen krijgen. Het tussenseizoen wordt minder belangrijk voor het energieverbruik van het lichte gebouw en de koeling van zware gebouwen wordt kritischer. De

interne warmte door verlichting, mensen, apparatuur en door zonnewarmte, blijft in het gebouw en zal in vele gevallen moeten worden afgevoerd (koeling). In de nacht koelt een goed geïsoleerd zwaar gebouw weinig af.

Hoge interne warmtelast

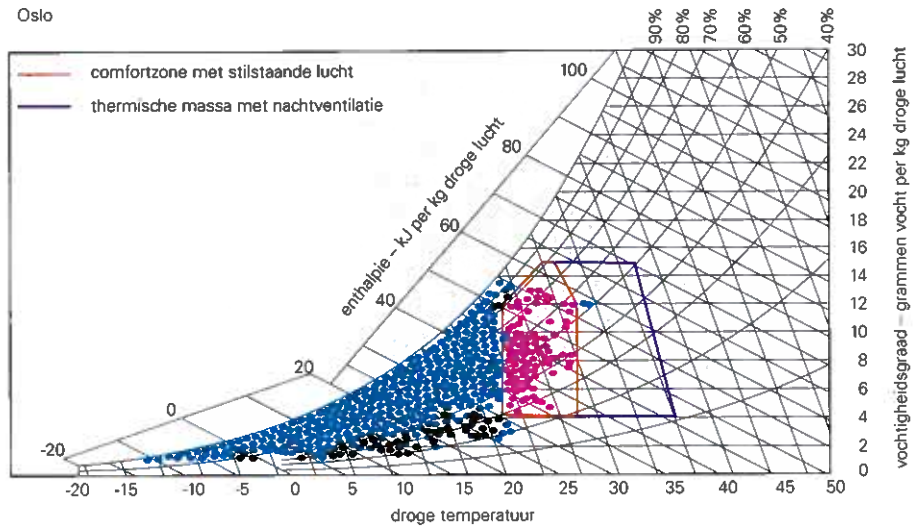
Bij een hoge interne warmtelast treedt een vergelijkbaar effect op als bij het verhogen van de isolatiewaarde. De massa verzadigt sneller omdat er meer warmte wordt gegenereerd, en de benodigde koelenergie is hoger.

Uitleg: latente koeling

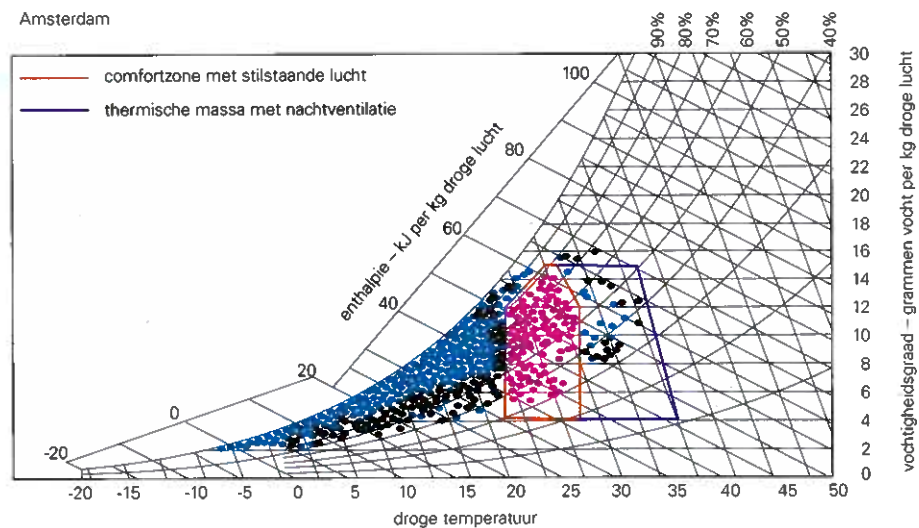
Uit een Mollier-diagram (afb. 10) kunnen de eigenschappen van vochtige lucht bij verschillende temperaturen worden afgelezen. Lucht van een bepaalde temperatuur kan een maximaal aantal grammen waterdamp bevatten. De lucht is verzadigd, de relatieve luchtvochtigheid (RV) is 100%. Als bijvoorbeeld via verdamping blijvend waterdamp wordt toegevoerd, zal deze condenseren tot vloeibaar water. Bij elke temperatuur en vochtigheid hoort een bepaalde energie-inhoud of enthalpie. In het diagram zijn toestanden van gelijke enthalpie aangegeven als lijnen van linksboven naar rechtsonder. De mens kan boven een bepaalde temperatuur en vochtigheid (enthalpie) zijn warmte moeilijker kwijt via verdamping (zweeten). Hierdoor zal de lucht moeten worden ontvochtigd. Dit wordt latente koeling genoemd. •

10. Mollier (h-x)-diagram met daarin de uur-gemiddelde buitentemperaturen voor een geheel jaar voor Oslo, Amsterdam en Rome. Het oranje kader geeft de condities aan waarbinnen het buitenklimaat als 'comfortabel' wordt ervaren. In het oranje kader is theoretisch geen koeling of verwarming nodig. Het paarse gebied is een uitbreiding op het comfortgebied door toevoeging van thermische massa met nachtventilatie. De zwarte stippen zijn de uren waarop de luchtsnelheid van de lucht te hoog is om het gebouw natuurlijk te kunnen ventileren: de effectiviteit van de thermische massa met nachtventilatie is vrij laag voor Amsterdam en Oslo. Zo'n inschatting van het potentieel van passieve maatregelen enkel met de buitentemperatuur wordt 'Bioclimatic design' genoemd^[6, 7].

Oslo



Amsterdam



Rome

