KLIMAATBEHEERSING 2

LUCHTBEHANDELING, VENTILATIE EN KOELING

KLIMAATBEHEERSING 2

LUCHTBEHANDELING, VENTILATIE EN KOELING

Fred de Lede
Rob van den Berge
Jan Koopmans

BIM MEDIA

Colofon

Klimaatbeheersing 2 Luchtbehandeling, ventilatie en koeling is een uitgave van BIM Media B.V.

Meer informatie over deze en andere uitgaven kunt u verkrijgen bij:
BIM Media Klantenservice
Postbus 16262
2500 BG Den Haag
Telefoon: (070) 304 67 77
E-mail: klantenservice@bimmedia.nl
Internet: www.bimmedia.nl

Uitgever: Johan Schot
Eindredactie: Kora Kremer, Patty van der Sar en Nanda van Dijk

Omslagontwerp: Anita Amptmeijer, www.agraphics.nl, Apeldoorn
Ontwerp binnenwerk: Anita Amptmeijer, www.agraphics.nl, Apeldoorn
Opmaak: AlphaZet prepress, Waddinxveen

© 2016 BIM Media B.V., Den Haag

ISBN 978 98 624 5096 7
NUR 959

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een databestand en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, opnamen of anderszins, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
Samenstellers en uitgever zijn zich volledig bewust van hun taak een zo betrouwbaar mogelijke uitgave te verzorgen. Niettemin kunnen zij geen aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele in deze uitgave voorkomende onjuistheden. Wij stellen het op prijs wanneer u aanvullingen, onjuistheden en verbeteringen aan ons wilt doorgeven.

WOORD VOORAF

Door de grote zorg en aandacht voor het ontwerp en de detaillering van een gebouw (en dus voor het bouwfysische gedrag) wordt de behoefte aan warmte en koude tot een minimum teruggebracht. Wel blijven in de meeste situaties klimaatinstallaties nodig om te voldoen aan de behaaglijkheideisen. Bij een minimale warmte- of koudevraag van een gebouw bieden eenvoudige klimaatinstallaties soms al uitkomst. Meestal gaat dit samen met een laag energie- en grondstoffenverbruik. Een behaaglijk gebouw is niet per definitie een gebouw vol complexe installaties.

Klimaatinstallaties hebben als taak de berekende tekorten of overschotten aan warmte, vocht en ventilatie te compenseren tot het niveau waarbij de behaaglijkheid in een gebouw gedurende de gebruiksperiode wordt gegarandeerd. In een vroeg stadium van het ontwerp kan met behulp van bouwfysische berekeningen een voorspelling worden gedaan over bijvoorbeeld de te verwachten warmtevraag van een gebouw (transmissieberekening), de optredende binnentemperaturen, de ventilatiebehoefte, de vochthuishouding, de akoestiek, de daglichttoetreding, enzovoort. Als ontwerpers onvoldoende zorg besteden aan het ontwerp en de detaillering van een gebouw (en dus ook aan de fysische vertaling), dan zal met klimaatinstallaties veel warmte en/of koude, vocht en/of droogte en ventilatielucht moeten worden aangevuld om aan de behaaglijkheideisen te voldoen. Dit heeft weer tot gevolg dat het energie- en grondstoffenverbruik veel hoger is dan nodig.

De laatste decennia wordt er steeds meer aandacht besteed aan het terugdringen van het energieverbruik door het verwarmen of koelen van gebouwen. Dit gebeurt enerzijds voor een kostenbesparing op de lange termijn, anderzijds om het verbruik van fossiele brandstof en de uitstoot van CO_2 terug te dringen. Fossiele brandstof is schaars, maar uiteraard geldt dit voor de meeste, zo niet alle, grondstoffen. Energiebesparing is een belangrijk thema geworden in de hedendaagse bouw, binnen een breder kader van duurzaam bouwen. Denk aan de vele toetsingsmodellen die momenteel worden gebruikt, zoals Cradle to Cradle, BREEAM, GreenCalc, GPR en BIM. Wettelijk geldt in Nederland bij nieuwbouw de Energieprestatienorm, waarin het energiegebruik van gebouwen wordt begrensd. Deze norm is weer verplicht binnen Europees verband.

Technische installaties kunnen een grote invloed hebben op de bouwkundige planvorming en de architectuur van een gebouw. De architect moet om deze reden al in een vroeg stadium de consequenties overzien van de beslissingen die hij gedurende het ontwerpproces neemt.

Klimaatinstallaties hebben binnen het ontwerpproces van gebouwen een zeer sterke wisselwerking met enerzijds het gebouwontwerp (de integratie), anderzijds de bouwfysica (de rekentechnieken).

Dit praktijkboek hebben wij geschreven om de theorie van luchtbehandeling, ventilatie en koeling te verduidelijken en de toepassingen hiervan praktisch uit te leggen. De rode draad in dit boek loopt vanaf de theoretische behandeling van het binnenklimaat tot en met de praktische toepassing van warmtepompen in de luchtbehandelingstechniek. Verder schenken we de nodige aandacht aan diverse luchtbehandelingssystemen voor ventilatie, verwarming, koeling en bevochtiging.

Luchtbehandeling, ventilatie en koeling is fraai vormgegeven door uitgebreid kleurgebruik, overzichtelijke tabellen en functionele tekeningen. Wij hopen dat dit boek een onmisbaar naslagwerk wordt voor iedereen die in de praktijk met luchtbehandeling, ventilatie en koeling bezig is.

Februari 2016

Fred de Lede
Rob van den Berge
Jan Koopmans

INHOUD

INLEIDING 31

HOOFDSTUK 1 THERMISCH BINNENKLIMAAT 19
1.1 THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID 20
1.2 CRITERIA THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID EN FYSISCHE VOORWAARDEN 23
1.3 PREDICTED MEAN VOTE EN PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED 25
1.4 EISEN VOOR KANTOREN 29
1.5 ANDERE INVLOEDEN OP BEHAAGLIJKHEID IN EEN RUIMTE 29
1.6 VENTILATIEBEHOEFTEN 31

HOOFDSTUK 2 VOCHTIGE LUCHT EN HET MOLLIER-HX-DIAGRAM 35
2.1 VOCHTIGE LUCHT 36
2.2 MOLLIER-HX-DIAGRAM VOOR VOCHTIGE LUCHT 40

HOOFDSTUK 3 LUCHTBEHANDELINGSKASTEN 59
3.1 OMKASTING 60
3.2 EUROPESE NORM EN 1886-1998 65
3.3 AANZUIG-/MENGSECTIE 68
3.4 FILTERSECTIE 72
3.5 WARMTEWISSELAARS 82
3.6 KOELER/DRUPPELVANGER 85
3.7 GELUIDDEMPERS 87
3.8 ROOFTOP UNITS 88

HOOFDSTUK 4 WARMTETERUGWINNING 89
4.1 WARMTETERUGWINNING 90
4.2 KRUISSTROOMWISSELAARS 91
4.3 TWINCOILSYSTEEM 92
4.4 WARMTEWIELEN 93
4.5 BUFFERSYSTEMEN 95
4.6 HEATPIPESYSTEMEN 97
4.7 WTW MET ADIABATISCHE KOELING 97
4.8 WTW EN MOLLIER-DIAGRAM 100

HOOFDSTUK 5 BEVOCHTIGEN EN ONTVOCHTIGEN 101
5.1 ALGEMEEN 102
5.2 STOOMBEVOCHTIGERS 105
5.3 WATERBEVOCHTIGERS 109
5.4 ONTVOCHTIGEN 115

HOOFDSTUK 6 VENTILATOREN 119
6.1 VENTILATOREN VOOR INBOUW IN LBK'S 120
6.2 WERKING VAN VENTILATOREN 121
6.3 VENTILATORTHEORIE 124
6.4 Q/H-KROMME VENTILATOREN 126
6.5 CENTRIFUGAAL- EN AXIAALVENTILATOREN 127
6.6 DEBIETREGELINGEN 130
6.7 RENDEMENTEN 132
6.8 VERTOERENVENTILATOREN 133
6.9 VENTILATORKEUZE 134

HOOFDSTUK 7 LUCHTKANALEN 137
7.1 ONTWERP 138
7.2 KANALEN 138
7.3 KANAALKEUZE 140
7.4 KANALEN VAN MINERALE WOL 143
7.5 RONDE KANALEN VAN VERZINKT STAAL 145
7.6 RONDE KANALEN VAN ALUMINIUM 145
7.7 INSTORTKANALEN VAN VERZINKT STAAL 146
7.8 KUNSTSTOF RONDE KANALEN 146
7.9 TEXTIELE KANALEN 148
7.10 FLEXIBELE SLANGEN 148
7.11 LUCHTDICHTHEID 149

HOOFDSTUK 8 GELUID IN LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIES 155
8.1 THEORIE 156
8.2 GELUIDSDRUK EN GELUIDSVERMOGEN 158
8.3 WET GELUIDHINDER 160
8.4 DB-SCHALEN EN OCTAAFMIDDENFREQUENTIES 160
8.5 FORMULE VAN BERANEK 162
8.6 GELUIDSUITBREIDING IN VRIJE VELD 164
8.7 SPIEGELBRONNEN 165
8.8 BEPALEN GELUIDSVERMOGEN VENTILATOR 165
8.9 GELUIDDEMPING IN LUCHTKANALEN 167
8.10 GELUIDHINDER 174

HOOFDSTUK 9 BRANDWERENDE VOORZIENINGEN 181
9.1 DAKBRAND BIJ GEBRUIK KUNSTSTOF KANALEN 182
9.2 BRANDWERENDE VOORZIENINGEN 184
9.3 NORMERING VAN BRANDKLEPPEN 185
9.4 HANDINSTELBARE BRANDKLEPPEN 187
9.5 GEMOTORISEERDE BRANDKLEPPEN 196
9.6 BRANDWERENDE OMKLEDING 196
9.7 GEVAAR VAN ROOK 198

HOOFDSTUK 10 COMPONENTEN LUCHTBEHANDELING 201
10.1 REGELKLEPPEN EN REGISTERS 202
10.2 REINIGINGSLUIKEN 203
10.3 LUCHTTOEVOERROOSTERS 205
10.4 LUCHTAFVOERROOSTERS 220
10.5 VENTILATORCONVECTOREN 224
10.6 INDUCTIE-UNITS 226
10.7 GELUIDDEMPERS 238

HOOFDSTUK 11 LUCHTBEHANDELINGSSYSTEMEN 241
11.1 OVERZICHT LUCHTBEHANDELINGSSYSTEMEN 242
11.2 EENKANAALSSYSTEEM 244
11.3 MULTIZONESYSTEEM 245
11.4 VARIABELVOLUMESYSTEEM 246
11.5 CONSTANTVOLUMESYSTEEM 248
11.6 TWEEKANAALSSYSTEEM 249
11.7 INDUCTIE-UNITS 251
11.8 VENTILATORCONVECTOR (‘FANCOIL’) 254
11.9 VERDRINGINGSVENTILATIE 256
11.10 KOELPLAFONDS 262
11.11 RIJE KOELING 264

HOOFDSTUK 12 MECHANISCHE VENTILATIESYSTEMEN 267
12.1 SYSTEEMKEUZES 268
12.2 NATUURLIJKE VENTILATIE 270
12.3 VENTILATIESYSTEMEN 270
12.4 VENTILATIE VAN APPARTEMENTEN 278
12.5 VENTILATIE EN WETGEVING 278
12.6 VENTILATIESYSTEMEN IN SCHOLEN EN KINDERDAGVERBLIJVEN 279
12.7 SAMENHANG TUSSEN LUCHTSTROOM EN CO_2 282

HOOFDSTUK 13 REGELTECHNIEK 285
13.1 REGELKRINGTHEORIE 287
13.2 REGELEN EN STUREN 289
13.3 VEELVOORKOMENDE PROCESSEN IN KLIMAATREGELINSTALLATIES 290
13.4 DISCONTINUREGELAARS 302

HOOFDSTUK 14 EENVOUDIGE KOELLASTBEREKENING 307
14.1 VERAC-METHODE 308
14.2 VOORBEELDBEREKENING 308

HOOFDSTUK 15 WARMTEPOMPEN 313
15.1 WERKING WARMTEPOMP 314
15.2 WARMTEPOMP LUCHT/WATER 316
15.3 WARMTEPOMP DX/WATER 317
15.4 WARMTEPOMP BRINEWATER/WATER (ETYLEENGLYCOL-WATER) 319
15.5 WARMTEPOMP GRONDWATER 321
15.6 GEAVANCEERDE LUCHT/WATER-WARMTEPOMP 322
15.7 BEREKENEN WARMTEPOMPINSTALLATIE 324
15.8 WARMWATERVOORZIENING 326
15.9 BEPALING BRONVERMOGEN 328
15.10 THEORETISCHE ENERGIEKOSTENBEREKENINGEN 329

HOOFDSTUK 16 KOELTECHNIEK VOOR KLIMAATTECHNICI 335
16.1 HOE WERKT KOELING? 336
16.2 TOEPASSING H-LOG P-DIAGRAM 339
16.3 DIVERSE TYPEN COMPRESSOREN EN HUN WERKING 340
16.4 REGELBAARHEID VAN COMPRESSOREN 346
16.5 SOFTSTARTERS 353
16.6 THERMOSTATISCHE EXPANSIEVENTIELEN 354
16.7 PRINCIPE DIRECTE EN INDIRECTE KOELING 358
16.8 CONDENSORS 359
16.9 VERDAMPERS 360
16.10 KOELMACHINES 361
16.11 VERDEELREGELING 363
16.12 BUFFERVATEN 363
16.13 KOELTORENS 364
16.14 ADIABATISCHE KOELING 368

HOOFDSTUK 17 VRF- EN VRV-SYSTEMEN 371
17.1 EU-REGELGEVING 372
17.2 DIVERSE SYSTEMEN 378
17.3 BUITENUNITS 383
17.4 BINNENUNITS 392
17.5 ADDITIONELE SYSTEMEN 396
17.6 INSTALLATIEONTWERP VRF-SYSTEEM 402
17.7 REGELTECHNISCHE INSTALLATIES 405
17.8 NIEUWE ONTWIKKELINGEN 407

HOOFDSTUK 18 VOORSCHRIFTEN VOOR KLIMAATINSTALLATIES 409
18.1 BOUWBESLUIT 2012 410
18.2 ErP-RICHTLIJN 412
18.3 F-GASSENVERORDENING 417
18.4 BRL 6000-21 418

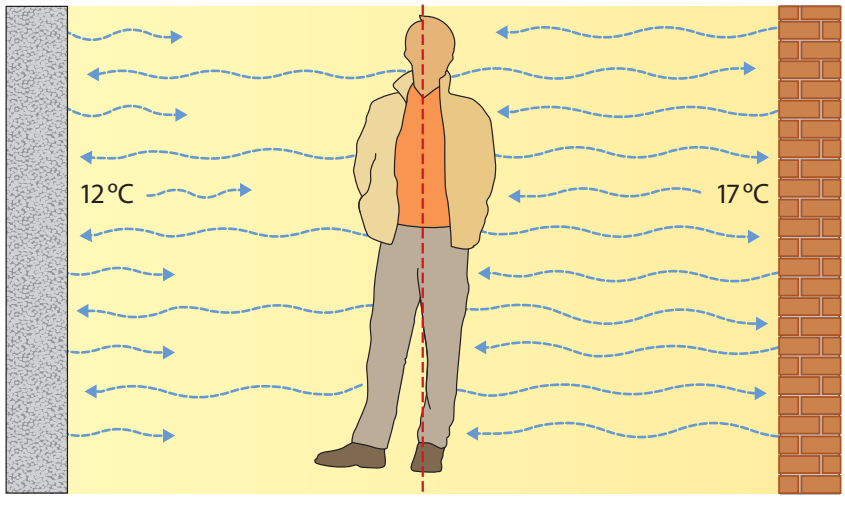
HOOFDSTUK 19 ONDERHOUD EN BEHEER 423
19.1 UITBESTEDING ONDERHOUD EN BEHEER 424
19.2 ONDERHOUD WARMTEPOMPEN 427
19.3 ONDERHOUD LBK'S 429

BIJLAGE A 433
A.1 GROOTHEDEN EN EENHEDEN 434
A.2 TEKENSYMBOLEN 436

REGISTER 439

HOOFDSTUK 1

THERMISCH BINNENKLIMAAT

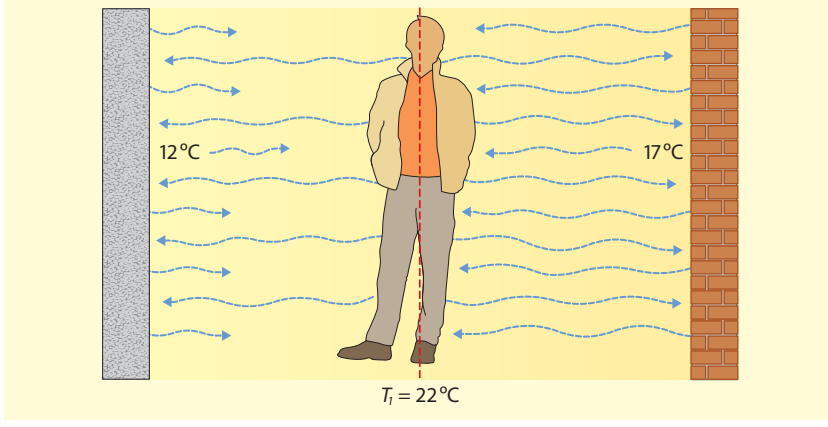


In dit hoofdstuk behandelen we het binnenklimaat. We gaan in op het model van Fanger en de warmtehuishouding en het metabolisme van de mens. Ook schenken we aandacht aan de ruimtelucht en temperatuur van het binnenklimaat en beschouwen we de relatie met de ISO 7730. De volgende onderwerpen komen aan de orde:

- thermische behaaglijkheid;
- criteria thermische behaaglijkheid en fysische voorwaarden;
- de predicted mean vote en predicted percentage of dissatisfied;
- eisen voor kantoren;
- andere invloeden op behaaglijkheid in ruimte;
- ventilatiebehoeften.

1.1 THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID

De thermische behaaglijkheid is een startpunt voor het installatietechnische en het bouwkundige ontwerp. De architect is dus ook verantwoordelijk voor de thermische behaaglijkheid (zie afbeelding 1.1). Een gebouw kan dusdanig worden ontworpen dat het met een minimale klimaatinstallatie in een behaaglijk binnenklimaat voorziet.



Afbeelding 1.1: Stralingsuitwisseling tussen mens en omgeving. Bron: Intechnium.

Bij de belangrijkste aspecten voor het thermische binnenklimaat zijn twee soorten variabelen te onderscheiden:

- persoonsafhankelijke variabelen: onder andere metabolisme en kleding. Toename van een van beide zal leiden tot een mogelijke verlaging van de behaaglijke temperatuur;
- binnenklimaatafhankelijke variabelen: de luchttemperatuur, de gemiddelde stralingstemperatuur, de luchtsnelheid en de relatieve vochtigheid. In een thermisch behaaglijke situatie speelt het waterdampgehalte van het binnenklimaat een veel kleinere rol van betekenis. De resulterende temperatuur (T_r) is alleen een functie van de luchttemperatuur (T_l), de gemiddelde stralingstemperatuur (T_s) en de luchtsnelheid (v).

In deze paragraaf gaan we in op:

- behaaglijkheid;
- de warmtehuishouding en het metabolisme van de mens;
- de warmteweerstand van kleding.

1.1.1 BEHAAGLIJKHEID

Behaaglijkheid wordt vaak geassocieerd met het gevoel van een aangename temperatuur, maar omvat naast thermisch comfort ook akoestisch en lichttechnisch comfort. Net als gezelligheid is behaaglijkheid een moeilijk te omschrijven begrip. Een behaaglijke omgeving is een omgeving waarin de mens zich geestelijk en lichamelijk welbevindt. Behaaglijkheid wordt dan ook vertaald als de mate van welzijn en heeft te maken met het 'zich op z'n gemak voelen', door het ontbreken van negatieve waarderingen van de omgeving als geheel.

In tabel 1.1 wordt een aantal factoren weergegeven die de behaaglijkheid beïnvloeden. Deze factoren worden door mensen al dan niet bewust waargenomen. De gemoedstoestand is de laatste schakel die bepaalt in welke mate de mens zijn omgeving als (on)behaaglijk ervaart. Eenzelfde omgeving wordt dan ook zelden door iedereen hetzelfde gekwalificeerd.

Architectonische factoren	Fysisch-fysiologische factoren	Psychologische factoren	Sociologische factoren
Vorm: ● inhoud ● oppervlakte ● structuur	Klimaat: ● temperatuur ● vochtigheid ● luchtsnelheid	De mens intern: ● motivatie ● politieke ● achtergrond ● ervaring ● aandacht ● prestatie ● activatieniveau	De mens extern: activiteit in groter verband, zoals: ● functie ● hiërarchie ● promotiekans
Esthetica: ● kleur ● textuur	Geluid: ● nagalmtijd ● geluidsdrukniveau ● frequentieverdeling ● variatie in tijd		De medemens, zoals: ● ras ● nationaliteit ● aantal
Inrichting: ● plaats ● groot meubilair ● klein meubilair	Verlichting: ● lichtkleur ● luminantie-verhouding ● vormkwaliteit ● verlichtingssterkte		
	Zuiverheid van lucht: ● CO_2-concentratie ● geurtjes ● gewenste hoeveelheid verse lucht		

Tabel 1.1: Het welzijn van de mens opgesplitst in factoren.

Uit het voorgaande blijkt dat het begrip 'behaaglijkheid' een complex van factoren omvat, waaronder behaaglijkheid. Een thermisch behaaglijke omgeving is een omgeving waarbij de mens bij zijn betreffende activiteit geen voorkeur heeft voor een warmere of een koudere omgeving.

De mens wisselt warmte uit met zijn directe omgeving, zo ook met het binnenklimaat. Voor het goed functioneren van het menselijk lichaam is het een vereiste dat het een temperatuur bezit van ongeveer 37 °C. Tijdens het uitoefenen van zware lichamelijke arbeid kan deze temperatuur tijdelijk oplopen tot 38 à 39 °C en zal deze na het beëindigen van de activiteit weer dalen tot ongeveer 37 °C. De warmteproductie vindt hoofdzakelijk plaats in de kern van het lichaam en de warmteverliezen vinden vooral plaats aan het huidoppervlak.

1.1.2 WARMTE-HUISHOUDING EN METABOLISME

Zoals gezegd, wisselt de mens steeds warmte uit met zijn omgeving. Aangezien de temperatuur van deze omgeving bijna altijd lager is dan de oppervlaktetemperatuur van het lichaam, de huidtemperatuur, zal de mens steeds warmte verliezen aan zijn directe omgeving. De warmteverliezen kunnen plaatsvinden door:

- convectie (stroming); deze vindt plaats aan het buitenoppervlak van de kleding en de huid en bovendien via de ademhaling;
- straling; deze is, onder bepaalde omstandigheden, gelijk aan convectie. Het gezamenlijke aandeel van deze twee posten op de totale balans kan variëren van 0% (zeer warme omgeving) tot 100% (zeer koude omgeving);
- verdamping; deze varieert ook van 0 tot 100%, maar dan wel andersom: bij een zeer koude omgeving 0% en bij een zeer warme 100%.

Het warmteverlies door geleiding, bijvoorbeeld via de voeten naar een koude vloer, is hierbij te verwaarlozen.

De mens verliest dus meestal warmte en zal dat verlies weer moeten aanvullen om de lichaamstemperatuur op 37 °C te handhaven. Dit gebeurt doordat er bij het vervullen van de levensfuncties warmte vrijkomt in de kern, namelijk door verbranding van voedingsstoffen (koolhydraten en vetten) in de spieren. Bij deze verbranding wordt maximaal 20% van de chemische energie omgezet in uitwendige arbeid; de rest komt vrij als warmte. We zullen deze warmtebalans uitwerken voor een stationaire situatie. Een stationaire situatie wordt bereikt wanneer er geen verandering meer plaatsvindt in de temperatuur van het menselijk lichaam en van de omgeving, met andere woorden: ontwikkelde warmte = afgevoerde warmte.
In formule:

$$M - a = \varphi_s + \varphi_c + \varphi_v \qquad \text{(W)}$$

waarbij:
- M = het metabolisme;
- a = de uitwendige arbeid;
- φ_s = de warmteoverdracht door straling;
- φ_c = de warmteoverdracht door convectie;
- φ_v = de warmteoverdracht door verdamping.

Het is het gedeelte van het metabolisme, *a*, dat niet bijdraagt aan de warmteafgifte van de mens, maar wordt gebruikt voor bijvoorbeeld het overwinnen van potentiële energie. Bij liggen of zitten verricht de mens geen uitwendige arbeid; bij wandelen over een horizontale weg wordt eigenlijk ook geen uitwendige arbeid verricht. Bij het tillen en verplaatsen van voorwerpen en het tegen een helling oplopen wordt wel uitwendige arbeid verricht. De hoeveelheid uitwendige arbeid is dus afhankelijk van de activiteit en wordt dan ook uitgedrukt als een fractie van het metabolisme (zie tabel 1.2). Het metabolisme wordt uitgedrukt in W/m^2 of in MET-eenheden (1 MET = 58 W/m^2).

Rustig		Wandelend		Stijgend wandelen in %			Werk en sport	
	Watt	Km/u	Watt	%	Km/u	Watt		Watt
Slapend	70	3,2	205	5	1,6	245	Kantoorwerk	120
Wakker liggend	80	4,0	245	15	1,6	295	Tekenwerk	120
Zittend	100	5,6	325	5	3,2	305	Winkelen	160
Staand	120	6,4	385	5	4,8	405	Afwas doen	< 200
		8,0	445	15	3,2	465	Gymnastiek	305
				15	4,8	710	Dansen	405
							Tennis	465
							Schermen	710
							Basketbal	770
							Worstelen	885

Voor vrouwen geldt een reductiefactor van 0,85 en voor kinderen van 0,75.

Tabel 1.2: Metabolisme van de mens van 1,8 m^2 naakt oppervlak in watt.

Afbeelding 1.2: Inspanning levert arbeid. Bron: www.pixabay.com.

1.1.3 WARMTEWEERSTAND VAN KLEDING

Bij de warmteoverdracht door straling en convectie speelt de kleding een belangrijke rol. In de literatuur wordt de warmteweerstand van de kleding uitgedrukt in een 'clo'-eenheid:

1 clo = 0,155 m^2 K/W (zie tabel 1.3)

Zo betekent 1 clo voor mannenkleding: katoenen ondergoed, overhemd, een pantalon met colbert, wollen sokken en een katoenen regenjas. De kleding van een eskimo daarentegen vertegenwoordigt ongeveer 3 clo. Neemt de isolatiewaarde van de kleding toe, dan raakt de huid moeilijker warmte kwijt.

Soort kleding	Clo-waarde $m^2 \cdot K/W$
Alleen een korte broek	0,1
Tropisch kostuum	0,3-0,4
Zomerjurkje	0,4
Zomerkostuum	0,5
Compleet zomerkostuum en schoenen	0,7
Idem met katoenen regenjas	1,0
Wintermantelpak	1,0
Compleet winterkostuum	1,4
Poolkleding	3,0-4,0

Tabel 1.3: Warmteweerstand van kleding.

1.2 CRITERIA THERMISCHE BEHAAGLIJKHEID EN FYSISCHE VOORWAARDEN

Naar de thermische voorwaarden voor de behaaglijkheid van de mens in een ruimte (ook wel fysische voorwaarden) is door tal van personen onderzoek gedaan. Het bleek namelijk dat elk van deze factoren zijn eigen specifieke invloed heeft op het binnenklimaat, waarin de mens het grootste deel van zijn leven verblijft. Tot de fysische voorwaarden behoren de volgende parameters:

- de luchttemperatuur: van belang bij de warmteafgifte door convectie;
- de gemiddelde stralingstemperatuur: beïnvloedt het warmteverlies door straling;
- de relatieve luchtvochtigheid: van belang bij het warmteverlies door zweetverdamping;
- de luchtsnelheid: van belang bij het warmteverlies door convectie en zweetverdamping.

Op de fysische voorwaarden tot een behaaglijk binnenklimaat is door middel van verwarmings-, ventilatie- en luchtbehandelingssystemen een zeer duidelijke invloed uit te oefenen.

De vele resultaten van berekeningen, metingen en proeven naar bovenstaande voorwaarden voor een optimaal binnenklimaat zijn in grafieken en tabellen verwerkt en gepubliceerd. In veel grafieken worden dan twee parameters tegen elkaar uitgezet. De andere parameters worden daarbij constant gehouden.

We behandelen hierna de volgende combinaties van twee parameters:

- de ruimteluchttemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid;
- de ruimteluchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur;
- de ruimteluchttemperatuur en de luchtsnelheid.

1.2.1 RUIMTELUCHT-TEMPERATUUR EN RELATIEVE LUCHTVOCHTIGHEID

De vochtuitwisseling tussen de mens met zijn omgeving komt tot stand door de verdamping aan het huidoppervlak. De voor de verdamping benodigde warmte wordt daarbij door het lichaam geleverd. De mate waarin deze verdamping optreedt, hangt dan onder meer af van het verschil in dampdruk tussen het vocht op de huid en de dampdruk in de luchtlaag grenzend aan de huid. Er is daardoor een samenhang tussen de relatieve luchtvochtigheid in een ruimte en de thermische behaaglijkheid voor de mens in de ruimte.

Uit onderzoekingen is nu gebleken dat de betekenis van de relatieve vochtigheid voor de mens in veel gevallen sterk wordt overschat. Uit onderzoek blijkt duidelijk dat binnen het temperatuurgebied 18-24 °C de relatieve luchtvochtigheid mag variëren tussen 35 en 70%

zonder dat de thermische behaaglijkheid wordt beïnvloed. Wordt echter de relatieve vochtigheid in een ruimte lager dan 35% – dit komt vooral voor bij centraal verwarmde ruimten in de winter – dan zullen er klachten komen over 'te droge lucht'. De klachten ontstaan dan vooral doordat de stofdeeltjes in de ruimte bij te 'droge lucht' de ademhalingsorganen veel sterker irriteren dan bij 'vochtige lucht' het geval zou zijn.

De eisen die moeten worden gesteld aan de relatieve luchtvochtigheid binnen een ruimte blijken uit het oogpunt van behaaglijkheid voor de mens van ondergeschikt belang te zijn. Toch zijn er ruimten waar hogere eisen moeten worden gesteld aan de relatieve vochtigheid. Voorbeelden:

- offsetdrukkerijen: vooral onder invloed van fluctuaties in de relatieve vochtigheid zal het papier gedurende het drukproces krimpen of uitzetten, zodat de beelden elkaar niet meer exact overlappen;
- computerruimten: bij een te lage relatieve vochtigheid zal statische elektriciteit ontstaan, waardoor storingen kunnen optreden;
- ziekenhuizen: bij een te lage relatieve vochtigheid in bijvoorbeeld operatiekamers, zal statische elektriciteit kunnen ontstaan, met direct gevaar voor de patiënt. Rv < 40%;
- bejaardentehuizen, ziekenkamers van ziekenhuizen, enzovoort: veelal is een bepaalde relatieve vochtigheid gewenst in verband met het juist functioneren van de stofwisseling van de bejaarden en/of patiënten.

Invloed van technische klimaatinstallaties

De luchtvochtigheid in een ruimte kan worden verhoogd door er bijvoorbeeld plantenbakken in op te stellen, door er speciale luchtbevochtigers in te zetten of door de ventilatielucht (centraleventilatie- of luchtbehandelingssystemen) in de luchtbehandelingsunit te bevochtigen. Anderzijds kan de luchtvochtigheid in een ruimte worden verlaagd via vochtabsorptie met een hygroscopisch materiaal (bijvoorbeeld silicagel): de absorptiemethode. Veel beter is het zodanig koelen van lucht door middel van een gekoeld oppervlakte, dat het vocht uit de lucht condenseert: de onderkoelingsmethode (dauwpunt van de lucht).

1.2.2 RUIMTELUCHT-TEMPERATUUR EN GEMIDDELDE STRALINGS-TEMPERATUUR

Slechts een tiental jaren geleden gold alleen de ruimteluchttemperatuur als het belangrijkste criterium voor de beoordeling van het thermische binnenklimaat van een ruimte. Doordat de woon-, voedings- en vooral de kledinggewoonten van de moderne mens sterk zijn gewijzigd, bleek dat naast de ruimteluchttemperatuur ook de stralingstemperaturen (dus de oppervlaktetemperaturen van de wanden, ramen, radiatoren, vloer en plafond) in de ruimte een zeer sterke invloed hebben op het thermische binnenklimaat. De stralingsuitwisseling van de mens met zijn omgeving is daardoor veel belangrijker geworden:

- de relatieve vochtigheid rv = 35-70%;
- de luchtsnelheid v = 0,10-0,20 m/s.

De 'gemiddelde stralingstemperatuur' binnen een ruimte is als volgt te bepalen:

$$T_{gem} \cdot s = \frac{(A_n - T_{opp.n})}{\Sigma A_n} - (°C \ of \ K)$$

waarbij:

- A_n : de zichtbare oppervlakken die de ruimte omsluiten in m² (wanden, plafond, vloer, verwarmingslichamen);
- $T_{opp.n}$: de bij A_n behorende oppervlaktetemperatuur in °C.

Gecombineerd met de ruimteluchttemperatuur T_l geeft deze gemiddelde stralingstemperatuur T_s met de warmteovergangsweerstanden voor het menselijk lichaam α_c (convectie) en α_s (straling), de 'effectieve' temperatuur (Amerikaans) T_{eff} of 'resulterende' temperatuur (Europees) T_{res}.

$$T_{res} = \frac{a_c \ Tl + a_s \ Ts}{a_c + a_s} \ (°C \ of \ K)$$

Voor beide warmteovergangsweerstanden kunnen we bij benadering dezelfde waarde nemen:

$\alpha_c = \alpha_s$

als de 'proefpersoon':
- de gemiddelde stralingstemperatuur ondergaat;
- normale kleding draagt: 1 clo;
- zich zittend in de ruimte bevindt: 1 MET.

De bovenstaande vergelijking wordt dan:

$$T_{res} = \frac{Ti + Ts}{2} \; (°C \; of \; K)$$

1.2.3 RUIMTELUCHT-TEMPERATUUR EN LUCHTSNELHEID

Een belangrijke factor voor een optimale behaaglijkheid in een ruimte is ook de luchtbeweging. Er zijn slechts enkele onderzoeken naar luchtbewegingen in ruimten uitgevoerd. De resultaten zijn dan ook minder betrouwbaar dan de resultaten van de vorige punten.

Een zeer belangrijk gegeven voor een goed functioneren van een klimaatinstallatie is de luchtverdeling in een ruimte. Door thermische effecten (schoorsteeneffect bij radiatoren en verlichting) en door impulseffecten (inblazen van lucht, verstoringen van de luchtverdeling door obstakels, bijvoorbeeld balken, verlichtingsornamenten) kan de luchtverdeling in een ruimte sterk worden beïnvloed.

Er kunnen plaatsen in een ruimte zijn waar 'tocht' gaat optreden (dus de luchtsnelheid ter plaatse is dan te hoog), maar ook plaatsen in een ruimte waar het 'muf' gaat worden (de luchtsnelheid ter plaatse is dan te laag). Met een installatie moet nu worden bereikt dat er in de winter lage luchtsnelheden en in de zomer veel hogere luchtsnelheden optreden.

1.2.4 ZOMERSITUATIE

In paragraaf 1.2 is voornamelijk gesproken over de invloed van diverse fysische voorwaarden op de behaaglijkheid in de ruimte in de wintersituatie en de rol van de klimaatinstallaties. Dit geldt uiteraard ook voor de zomersituatie:
- de hoge binnenoppervlaktetemperatuur van absorberende beglazing, de zogeheten 'overtemperatuur' van het glas, die optreedt als de zon op het glas schijnt (zonwerende beglazing);
- de hoge oppervlaktetemperatuur van binnenjaloezieën (40-50 °C);
- de invloed van gekoelde plafonds (tot circa 15 °C) op het binnenklimaat;
- de invloed van de lagere oppervlaktetemperatuur van zware wanden op het binnenklimaat.

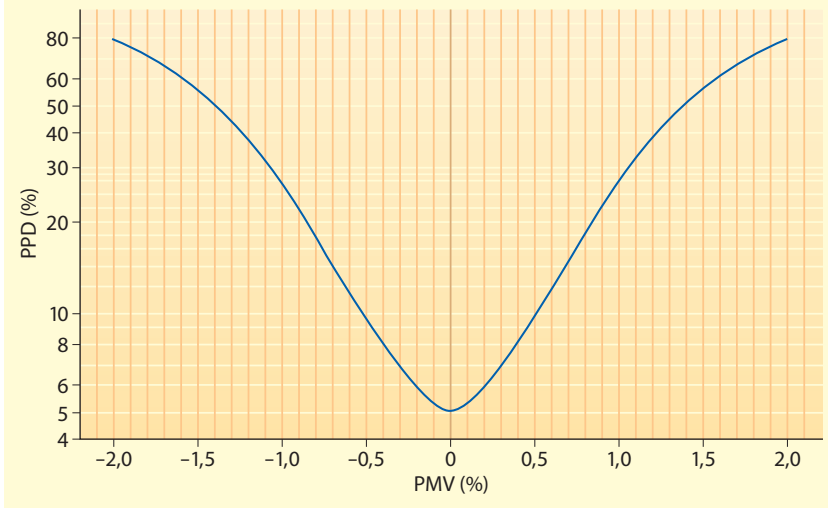
1.3 PREDICTED MEAN VOTE EN PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED

In deze paragraaf gaan we nader in op de begrippen *predicted mean vote* en *predicted percentage of dissatisfied*. Twee begrippen die beide bij de beoordeling van het binnenklimaat worden betrokken. Deze begrippen zijn vastgelegd in de Europese norm ISO 7730:2005 en worden ook in Nederland veelvuldig toegepast. De Deense professor P. Ole Fanger en anderen hebben veel onderzoek gedaan naar het thermisch comfort .
Proefondervindelijk heeft onder anderen Fanger de relatie weten te leggen tussen het gemiddelde waardeoordeel (PMV = *predicted mean vote*) over een omgeving vastgesteld op een zevenpuntsschaal (zie tabel 1.4) en de afwijking ten opzichte van het optimale binnenklimaat. Deze PMV-schaal is gebaseerd op de warmtebalans van het menselijk lichaam.

Heet	Warm	Beetje warm	Neutraal	Beetje koel	Koel	Koud
+3	+2	+1	0	−1	−2	−3

Tabel 1.4: PMV-schaal.

Daarnaast bestaat er een verband tussen het aantal potentiële klagers (PPD = *predicted percentage of dissatisfied*) in een gegeven situatie en het waardeoordeel. Ongeacht het binnenklimaat zal toch altijd minimaal 5% van de aanwezigen klagen. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in temperatuurgewaarwording tussen de mensen onderling, maar ook door het feit dat één persoon ook niet helemaal consistent is in dezen.
Wanneer de PMV-waarde is vastgesteld, kan de PPD-waarde worden berekend met behulp van afbeelding 1.3.



Afbeelding 1.3: Voorspeld aantal ontevredenen (PPD). Bron: Intechnium.

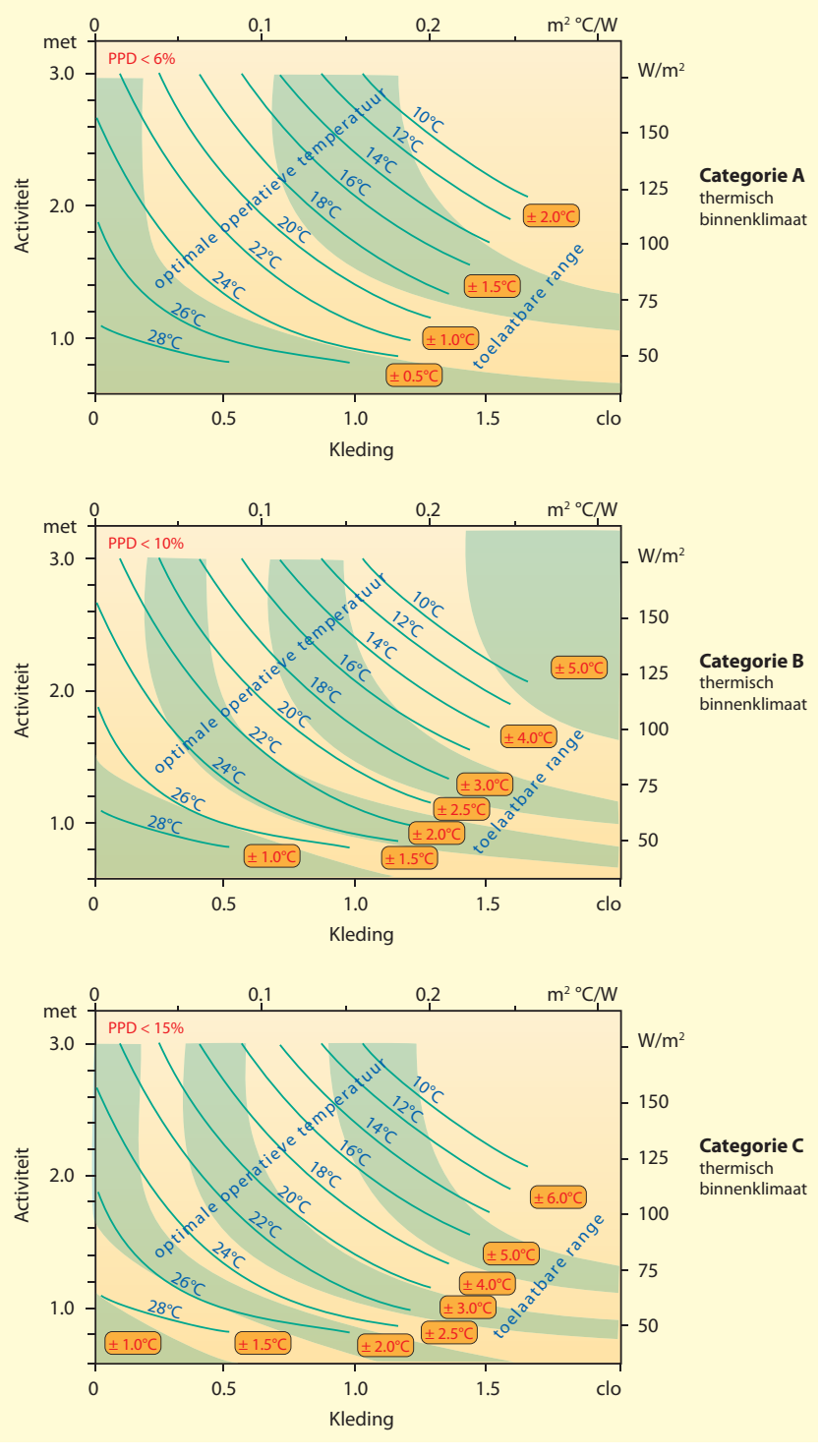
In de ISO 7730 worden berekeningsvoorbeelden gegeven om het PPD te kunnen berekenen voor warme en koude vloeren en de stralingsasymmetrie. Elke categorie omschrijft een maximumpercentage ontevredenen voor het gehele lichaam (PPD) en een PD voor elk van de vier typen onbehaaglijk gevoel. Sommige eisen zijn moeilijk in de praktijk te meten, terwijl andere gemakkelijk te meten zijn. De verschillende percentages drukken het evenwicht uit tussen de doelstellingen van enkele ontevredenen en wat mogelijk is met de bestaande technologie. Vanwege de nauwkeurigheid van instrumenten voor het meten van de invoerparameters is het moeilijk te controleren of de PMV voldoet aan de klasse A-categorie (−0,2 < PMV +0,2). In plaats daarvan kan de verificatie worden gebaseerd op de operatieve temperatuurrange zoals weergegeven in tabel 1.5.

	Behaaglijkheidsgevoel van gehele lichaam		Onbehaaglijk gevoel (PD)			
Categorie	Voorspeld percentage ontevredenen PPD %	Voorspeld percentage tevredenen PMV %	Percentage ontevredenen door tocht DR %	Verticaal temperatuur-verschil %	Percentage ontevredenen door warme of koude vloer %	Percentage ontevredenen door stralings-asymmetrie %
A	< 6	−0,2 < PMV < +0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	0,5 < PMV < +0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	0,7 < PMV < +0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

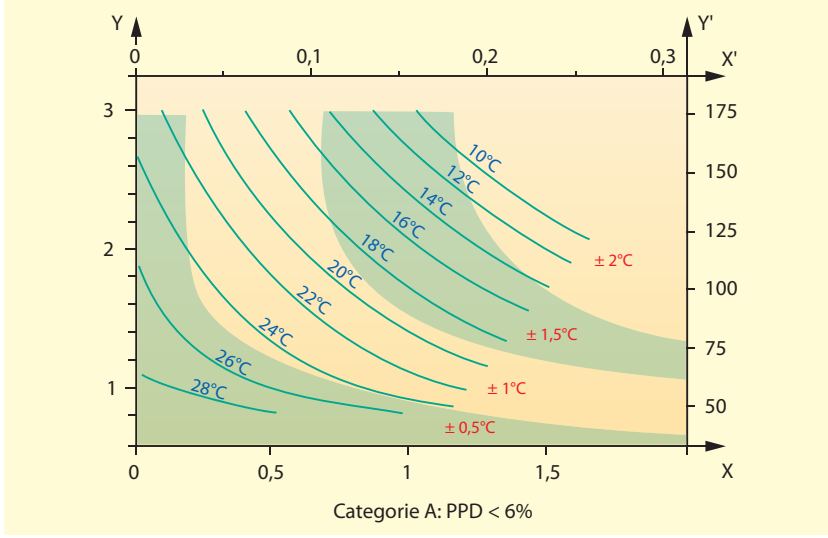
Tabel 1.5: Thermische omgeving van de drie categorieën.

1.3.1 OPERATIEVE TEMPERATUUR

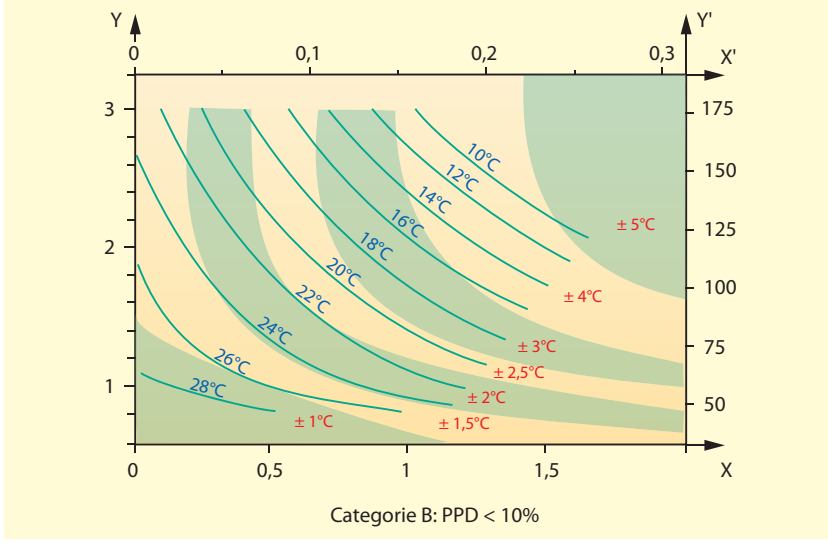
Voor een gegeven ruimte bestaat er een optimale operatieve temperatuur, corresponderend met een PMV = 0. Dit afhankelijk van de activiteit en de kleding van de aanwezige personen. Tabel 1.5 geeft de optimale operatieve temperatuur en de toelaatbare temperatuurrange als functie van kleding en activiteit voor elk van de drie categorieën. De optimale operatieve temperatuur is gelijk voor alle drie de categorieën, terwijl het toegestane bereik rond de operatieve temperatuur varieert. De operatieve temperatuur bij alle locaties binnen de leefzone van een ruimte moet te allen tijde binnen het toelaatbare bereik liggen.
In afbeelding 1.4 zijn voor de categorieën A, B en C de operatieve temperaturen aangegeven. Op de horizontale lijn onder is de *clothing*-factor aangegeven. Op de verticale lijn aan de linkerzijde is het activiteitenniveau aangegeven in MET. De verticale lijn aan de rechterzijde geeft de warmteafgifte aan.



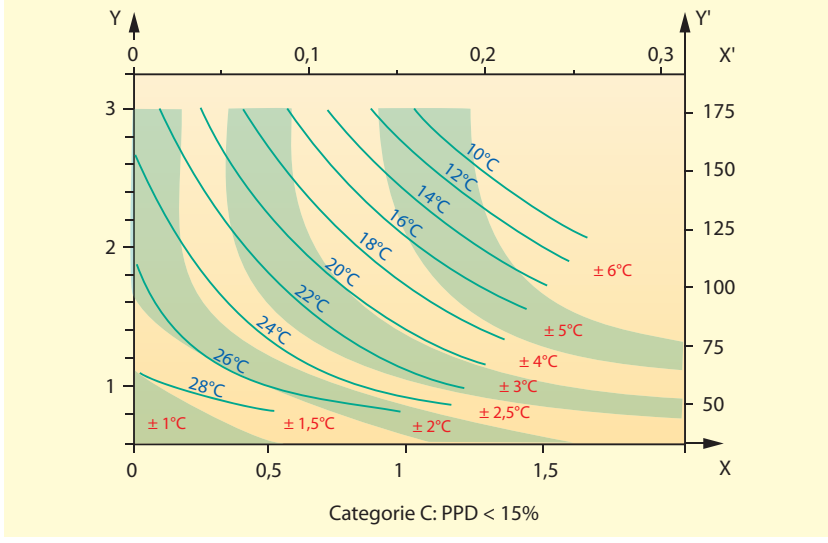
Afbeelding 1.4: Optimale operatieve temperatuur als functie van kleding en activiteiten voor de drie categorieën van het behaaglijkheidsgevoel. De drie grafieken geven ook de toegestane temperatuurrange rond de optimale operatieve temperatuur voor de drie categorieën. Bron: NEN-EN 12831.



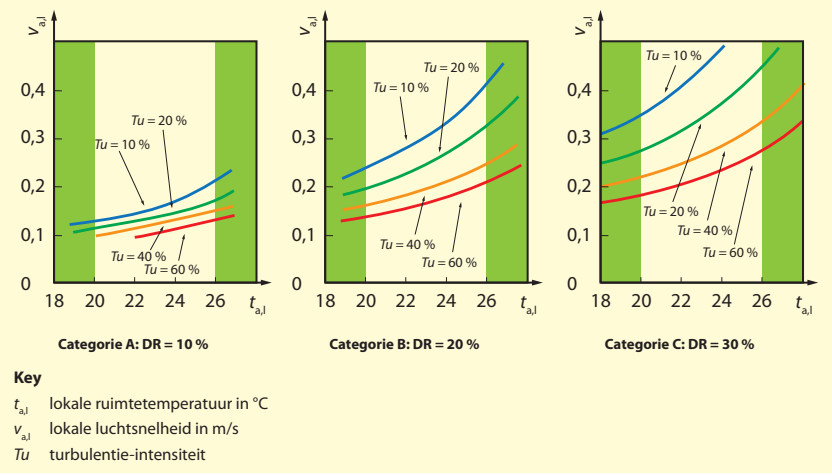
Afbeelding 1.5: De PPD categorie A weergegeven in relatie tot de ruimtetemperatuur bij een PPD van 6%. Bron: NPR-CR 1762.



Afbeelding 1.6: De PPD categorie B weergegeven in relatie tot de ruimtetemperatuur bij een PPD van 10%. Bron: NPR-CR 1762.



Afbeelding 1.7: De PPD categorie C weergegeven in relatie tot de ruimtetemperatuur bij een PPD van 15%. Bron: NPR-CR 1762.



Key

$t_{a,l}$ lokale ruimtetemperatuur in °C
$v_{a,l}$ lokale luchtsnelheid in m/s
Tu turbulentie-intensiteit

Afbeelding 1.8: De drie categorieën bij verschillende draft-factoren. Bron: NPR-CR 1762.

1.4 EISEN VOOR KANTOREN

Voor kantoren wordt met betrekking tot het thermische binnenklimaat vaak verwezen naar de richtlijnen van de Rijksgebouwendienst (RGD). Deze zijn gebaseerd op aanbevelingen van de Rijksbedrijfsgezondheidsdienst (RBGD) en hebben in beginsel betrekking op de mate en de tijd waarin bepaalde klimaatgrenzen in gebouwen mogen worden overschreden. De richtlijnen komen op het volgende neer:

- Het thermische klimaat moet ten minste 90% van de bewoners ten minste 90% van de tijd tevreden stellen, dus:
  - maximaal 5% van de tijd (ongeveer 100 u/jaar) 'te warm';
  - maximaal 5% van de tijd (ongeveer 100 u/jaar) 'te koud'.
- Het thermische klimaat mag maximaal 1 à 1,5% van de tijd (ongeveer 20 à 30 u/jaar) meer dan 25% ontevredenen geven.

Uitgaande van de in een vertrek plaatsvindende activiteiten en rekening houdend met een zo goed mogelijk geschat kledingpakket, kunnen we bepalen welk klimaat in dat vertrek is vereist.

De voornaamste voorwaarde voor een goed binnenklimaat is dat de aanwezigen zich er thermisch behaaglijk voelen. Daarnaast kunnen er echter klachten optreden die worden veroorzaakt door plaatselijke onbehaaglijkheid, bijvoorbeeld door tocht, asymmetrische straling, koude of warme voeten. Onderzoek op dit gebied is echter nog niet zo vergevorderd dat er eensluidende adviezen ten aanzien van het vereiste binnenklimaat zijn te geven. Het bouwkundige ontwerp kan aanleiding geven tot tochtklachten (oorzaak: slechte detaillering) of asymmetrische straling (oorzaak: bijvoorbeeld grote glasvlakken in de gevel). Hierdoor wordt de warmteafgifte van het naar het glas toe gekeerde deel van het lichaam groter dan naar de zijde van de ruimte.

Daarnaast zullen er, door bijvoorbeeld toepassing van veel glas in de gevels, veel grotere temperatuurverschillen optreden tussen glas en wanden onder invloed van wisselingen in de buitentemperatuur en de zonnestraling. Onderzoekingen op het terrein van de behaaglijkheid zijn dan ook nog lang niet afgesloten. Recente publicaties zoals van de Deense onderzoeker Fanger zijn hier het bewijs van.

1.5 ANDERE INVLOEDEN OP BEHAAGLIJKHEID IN EEN RUIMTE

De ontwerper van een luchtbehandelingsinstallatie moet zich realiseren dat hij met veel factoren rekening moet houden. Zo kunnen ontwerpen met grote glasoppervlakken en vides grote problemen veroorzaken door onvoldoende rekening te houden met de gebouwindeling. Hier zijn in het verleden veel fouten mee gemaakt. De bouwkundige schil is van groot belang voor het bereiken van een goed binnenklimaat. Vooral kantoorgebouwen uit de jaren 80 springen hier in negatieve zin boven uit.
Momenteel worden veel van deze gebouwen gerenoveerd en de installaties aangepast aan een energiezuinig en goed geklimatiseerd gebouw met een hogere EPC-waarde (energieprestatiecoëfficiënt).

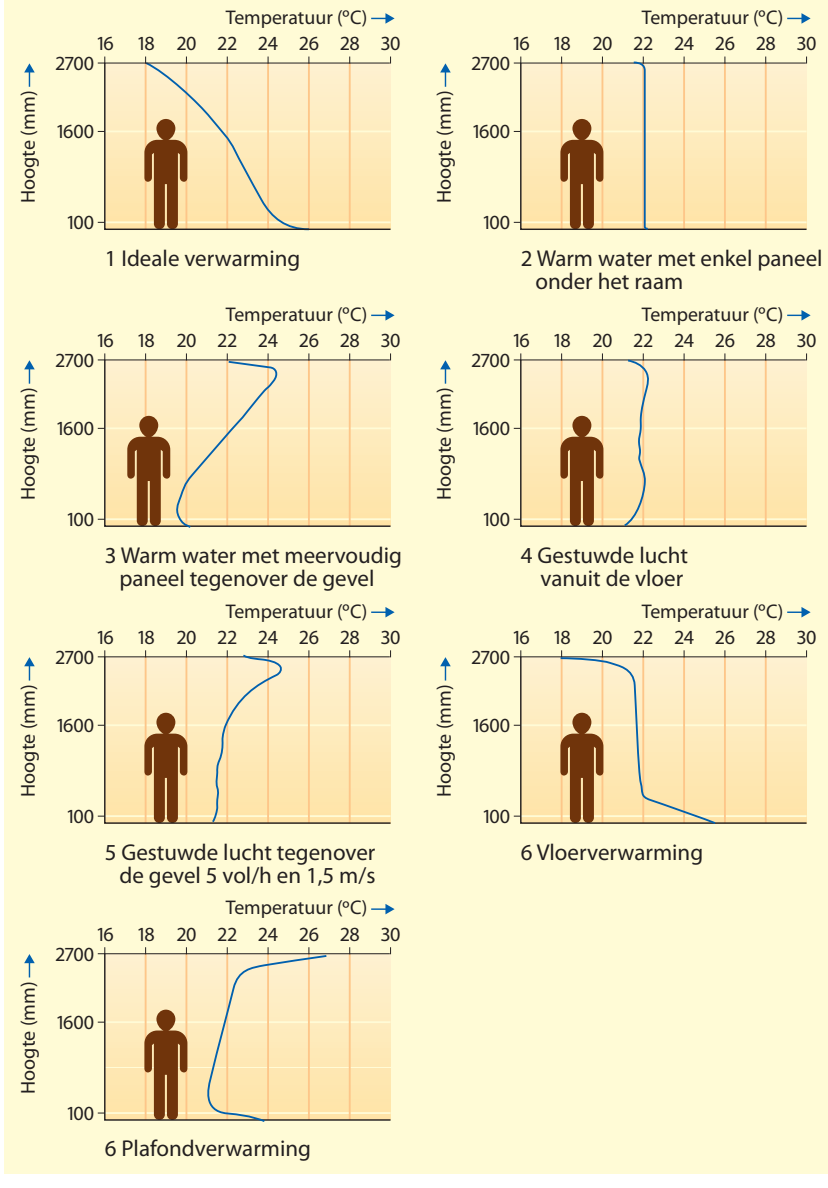
De mate van behaaglijkheid in een ruimte wordt mede bepaald door de volgende twee factoren, die in deze paragraaf aan bod komen:

- de luchttemperatuurgradiënt;
- de luchtsamenstelling.

1.5.1 LUCHTTEMPERATUURGRADIËNT

In principe behoort dit punt bij de gemiddelde luchttemperatuur. Te sterke temperatuurafwijkingen van de gemiddelde luchttemperatuur tussen diverse plaatsen in een ruimte kunnen ongewenst zijn. Deze temperatuurverschillen kunnen optreden in verticale richting (van vloer tot plafond) en/of in horizontale richting (van bijvoorbeeld binnenwand tot het raam). In verticale richting spreekt men dan over de verticale temperatuurgradiënt (dit is het temperatuurverschil dat per strekkende meter in verticale richting optreedt) en in horizontale richting spreekt men van de horizontale temperatuurgradiënt (dit is het temperatuurverschil dat per strekkende meter in horizontale richting optreedt).

In bijvoorbeeld de Duitse norm DIN 1946 staat aangegeven dat de temperatuurverschillen in de leefzone in het horizontale vlak niet groter mogen zijn dan 3 °C. De verticale temperatuurgradiënt mag niet meer dan 1 °C zijn in de leefzone. Grotere temperatuurverschillen worden als onaangenaam ervaren. Een gelijkmatige temperatuurverdeling in een ruimte wordt in de eerste plaats bepaald door de kwaliteit van het gebouw (dubbelglas, isolatie, luchtdichtheid, enzovoort), waarbij vooral het voorkomen van tocht een belangrijke factor is. Installatietechnisch is een zo permanent mogelijk verwarmingsbedrijf noodzakelijk.



Afbeelding 1.9: Verticale temperatuurgradiënt.
Bron: Jellema 6b.

1.5.2 LUCHTSAMENSTELLING

Om te voorkomen dat de vertreklucht al te zeer wordt verontreinigd wordt schone lucht toegevoerd. De gewenste mate van luchtverversing hangt af van het aantal personen, de verblijfsduur, de bezigheid van de personen en het bouwkundige volume van het vertrek. In volkomen rust kan, voor wat betreft de zuurstofvoorziening, de mens volstaan met een luchtverbruik van minimaal 0,5 m^3 lucht per uur, terwijl bij grote lichamelijke inspanning ongeveer 5 m^3 lucht per uur benodigd is.

Voert men de noodzakelijke luchthoeveelheden per uur aan een vertrek toe, dan impliceert dat nog niet dat de in dat vertrek verblijvende personen zich behaaglijk voelen. Aangezien door de mens aan de vertreklucht CO_2 (kooldioxide), H_2O (waterdamp), CO (koolmonoxide), reukstoffen, bacteriën, virussen, stof en dergelijke worden toegevoegd, moet de aldus verontreinigde lucht worden vervangen door zuivere lucht. Verder kunnen aan de ruimtelucht schadelijke stoffen van buitenaf worden toegevoegd, bijvoorbeeld atmosferische ionen, en van binnenuit, bijvoorbeeld radongas.

Mogelijke stoffen in de lucht zijn:

- kooldioxide: hoge concentraties in de lucht van meer dan 5% zijn dodelijk. Een concentratie van 3% is schadelijk voor de mens;
- waterdamp: de hoeveelheid vocht die mensen in de vorm van waterdamp aan de lucht afstaan, is afhankelijk van de temperatuur en de vochtigheid van de lucht en van de inspanning. Hoe groter de inspanning en de luchttemperatuur, hoe hoger de vochtafgifte;
- stof: de menselijke stofproductie bestaat uit huidschilfers, haar, kledingstof en dergelijke en is afhankelijk van de lichaamsbewegingen, wat uiteindelijk kan leiden tot allergische reacties bij de mens;
- reukstoffen: afhankelijk van de persoonlijke hygiëne produceert de mens meer of minder reukstoffen. Deze stoffen worden als typische lichaamsgeuren waargenomen, waardoor de lucht als onfris, benauwd en bedompt wordt ervaren.

Radonconcentratie in lucht

In bijna alle steenachtige materialen komt radongas vrij. Op zich is radongas (een edelgas) niet schadelijk voor de gezondheid. Het is een vervalproduct, wat wil zeggen dat de radioactiviteit van radon langzamerhand vermindert tot deze helemaal verdwenen is.
De afbraak van radon levert radioactieve metaalionen en vrije atomen, die zich aan stofdeeltjes uit de lucht hechten. Door inademing kunnen de radioactieve deeltjes in de longen terechtkomen, met de daaraan verbonden radioactieve straling. Men brengt een deel van de longkankergevallen in verband met de straling uit deze radonconcentraties.
Radon uit de kruipruimten en bouwmaterialen is beheersbaar door bijvoorbeeld het te isoleren (folie en verven) of af te voeren door ventilatie. Gewapend beton geeft relatief veel straling af en baksteen relatief weinig.

1.6 VENTILATIE-BEHOEFTEN

Gaf men in het verleden als richtlijn aan dat de luchtverversing 17 m^3/u per persoon moest bedragen, tegenwoordig rekent men met 30 à 35 m^3/u per persoon als er niet wordt gerookt en 45 à 50 m^3/u per persoon voor het geval er wel wordt gerookt. De wijze en mate van ventilatie hangen sterk af van het gebruik van de betrokken ruimte. Een grote hoge ruimte kan bijvoorbeeld zeer goed gedurende een kortere tijd worden gebruikt zonder dat er geventileerd hoeft te worden (grote hoge kerk met in verhouding veel lucht per persoon = luchtkubus).

Vroeger was de bouwtraditie in Nederland van dien aard, dat er via kieren in de gebouwen een natuurlijke ventilatie plaatsvond (infiltratie), die vaak meer was dan de benodigde minimale ventilatie. In de praktijk wordt veel met het zogeheten ventilatievoud (*n*) gewerkt; dat is de hoeveelheid toe te voeren 'verse' lucht per uur gedeeld door de vertrekinhoud (aantal verversingen per uur). Dit ventilatievoud is dan gerelateerd aan de grootte van de ruimte.

De luchtverslechtering wordt ook veroorzaakt door de processen die in de ruimte plaatsvinden. Denk hierbij aan lichtdrukmachines, kookprocessen, parkeergarages, enzovoort. Een bekend gegeven is dat het in ruimten die niet worden geventileerd 'muf' gaat ruiken en dat er schimmelvorming door de slechte vochtregulatie zal optreden.

Enkele ventilatiebehoeften in woningen:

- voor afvoer van vocht: $n = 0{,}5\text{-}2$;
- voor afvoer van CO: $n = 1$;
- voor afvoer van CO_2: $n = 1{,}5$;
- voor afvoer van radongas: $n = 0{,}5\text{-}2$.

In deze paragraaf gaan we verder kort in op:

- de ontwerpcriteria voor de binnenomstandigheden;
- de relatie tussen interne belasting en kantoormodulen.

1.6.1 ONTWERP-CRITERIA VOOR BINNEN-OMSTANDIGHEDEN

Gebouwen worden in de praktijkrichtlijn NPR-CR 1752 verdeeld in drie klimaatklassen, namelijk A, B en C. De ontwerpcriteria voor deze klassen worden uitgewerkt. Bovendien wordt rekening gehouden met rokers. Gezien het feit dat roken in de meeste kantooromgevingen verboden is, hebben wij hier bij onze uitleg geen rekening gehouden met rokers.

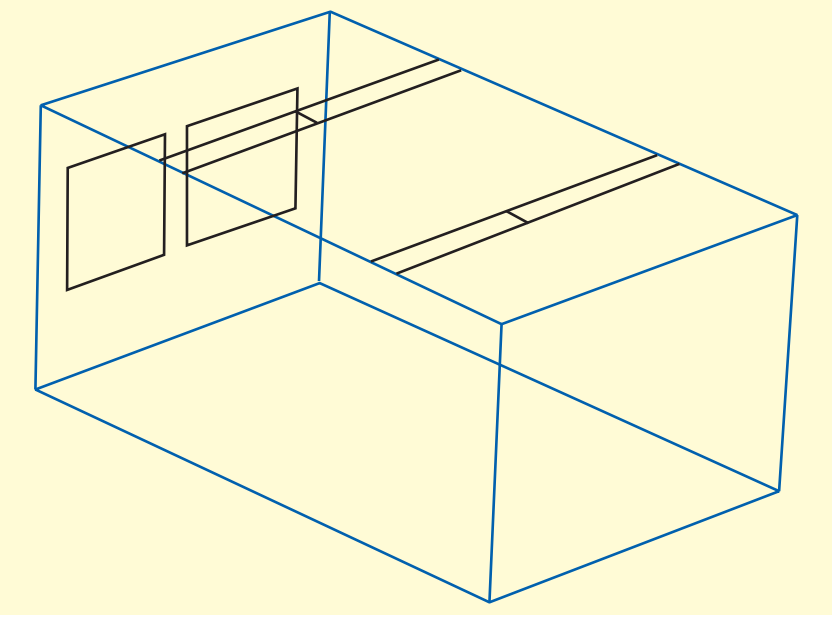
In tabel 1.6 zijn de binnencondities voor diverse ruimten en de ontwerpcriteria voor verschillende typen gebouwen aangegeven. Deze norm met de classificaties wordt door vastgoedmanagers vaak gehanteerd om een definitie aan een gebouw toe te kennen. De klasse van het gebouw heeft een relatie met het installatieontwerp.

Type gebouw of ruimte	Activiteit met	Bezetting personen/ m^2	Categorie	Operatieve temperatuur		Maximumluchtsnelheid		Geluids-druk dB (A)	Ventilatie-voud l/s × m^2
				Zomer koelseizoen °C	Winter verwarming-seizoen °C	Zomer koelseizoen	Winter verwarming-seizoen		
Enkel kantoor Cellen kantoor	1,2	0,1	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	30	2,0
			B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,22	0,18	35	1,4
			C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,25	0,21	40	0,8
Landschaps-kantoor	1,2	7	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	35	1,7
			B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,22	0,18	40	1,2
			C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,25	0,21	45	0,7
Conferentie-ruimten	1,2	5	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	30	6
			B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,22	0,18	35	4,2
			C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,25	0,21	40	2,4
Auditoria	1,2	1,5	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	30	16
			B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,22	0,18	33	11,2
			C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,25	0,21	35	6,4
Cafetaria's Restaurant	1,2	0,7	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	35	8
			B	24,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,22	0,18	45	5,6
			C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,25	0,21	50	3,2
Klaslokaal	1,2	0,5	A	24,5 ± 0,5	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	30	6
			B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,22	0,18	35	4,2
			C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,25	0,21	40	2,4
Kinder-dagverblijf	1,4	0,5	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,16	0,13	30	7,1
			B	23,5 ± 2,0	20,0 ± 2,5	0,2	0,16	40	4
			C	23,5 ± 2,5	20,0 ± 3,5	0,24	0,18	45	2,8
Winkel	1,6	0,15	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13	40	4,2
			B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,2	0,15	45	3
			C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18	50	1,6

Tabel 1.6: Ontwerpcriteria voor ruimten in verschillende typen gebouwen. Bron: CR 1752:1998.

1.6.2 RELATIE TUSSEN INTERNE BELASTING EN KANTOORMODULEN

In afbeelding 1.10 is een kantoormodule afgebeeld. De meeste kantoormodulen die worden toegepast werken met een stramienmaat van 1,8 m en soms 1,2 m. Deze afmetingen worden het meest toegepast in de kantoorbouw. Van deze stramienmaten worden modules gemaakt, bijvoorbeeld een kantoor van 2 modules van 3,6 m of 4 modules van 1,8 m, = 7,2 m.



Afbeelding 1.10: Principe van kantoormodule: breedte × diepte × hoogte = 3,6 × 5,4 × 2,6 m.

In de module van afbeelding 1.10 zijn in het plafond vier tl-armaturen opgenomen. Hiermee kan flexibel een kantoorindeling worden gemaakt met cellenkantoren, waarbij bijvoorbeeld het ganggebied in het midden wordt gesitueerd, met aan weerskanten cellenkantoren van diverse afmetingen. De uitgangspunten bij de indeling:

- één persoon per 10 m^2 vloeroppervlak;
- een minimale ventilatiebehoefte van 36 m^3/h per persoon (Bouwbesluit);
- de afmetingen van de module: 3,6 m breed, 2,6 m hoog en 5,4 m diep.

Als we kijken naar de oppervlakte, dan bedraagt deze lengte x breedte = 3,6 × 5,4 = 19,44 m^2, afgerond 20 m^2. De inhoud van de ruimte is oppervlakte x hoogte = 19,44 × 2,6 = 50,55 m^3.

Kengetallen

Oppervlakte : 20 m^2
Inhoud : 50,55 m^3
Minimale ventilatie : twee personen × 36 m^3/h = 72 m^3/h

Bij een ventilatievoud van 2 wordt dit: 2 × 50,55 = 101,1 m^3/h.

De geschiedenis heeft geleerd dat bij ingebruikneming door een huurder de beschikbare oppervlakte per persoon voldoet aan de norm van 10 m^2 per persoon. Gebleken is echter dat na enkele jaren het aantal beschikbare vierkante meters afneemt door uitbreidingen, groei of inkrimpen van het bedrijf van de huurder en vaak in een ruimte van 20 m^2 drie werknemers worden geplaatst. Als de installatie is ontworpen voor 36 m^3/h per persoon, zullen er snel klachten optreden, terwijl bij een tweevoudige ventilatie voor de drie personen meer dan voldoende ventilatielucht wordt ingeblazen. Dit betekent dat bij een kantoorruimte van 3,6 m breed, 101 m^3/h verse lucht moet worden ingeblazen.

Als we kijken naar tabel 1.6, dan zien we bij een A-normering dat er 2 $l/s/m^2$ geventileerd moet worden. Ofwel: oppervlakte × 2 x 3600 = 19,44 × 2 x 3600 = 139,900 l/h = 140 m^3/h. Dienen we aan deze A-norm te voldoen, dan moeten we de luchthoeveelheid vergroten van 101 m^3/h naar 140 m^3/h, het verschil bedraagt circa 28%. Bij een gebouw met een A-classificatie moet het ventilatievoud minimaal 3 bedragen. Bij categorie C wordt ruimschoots voldaan aan de ventilatie-eis.

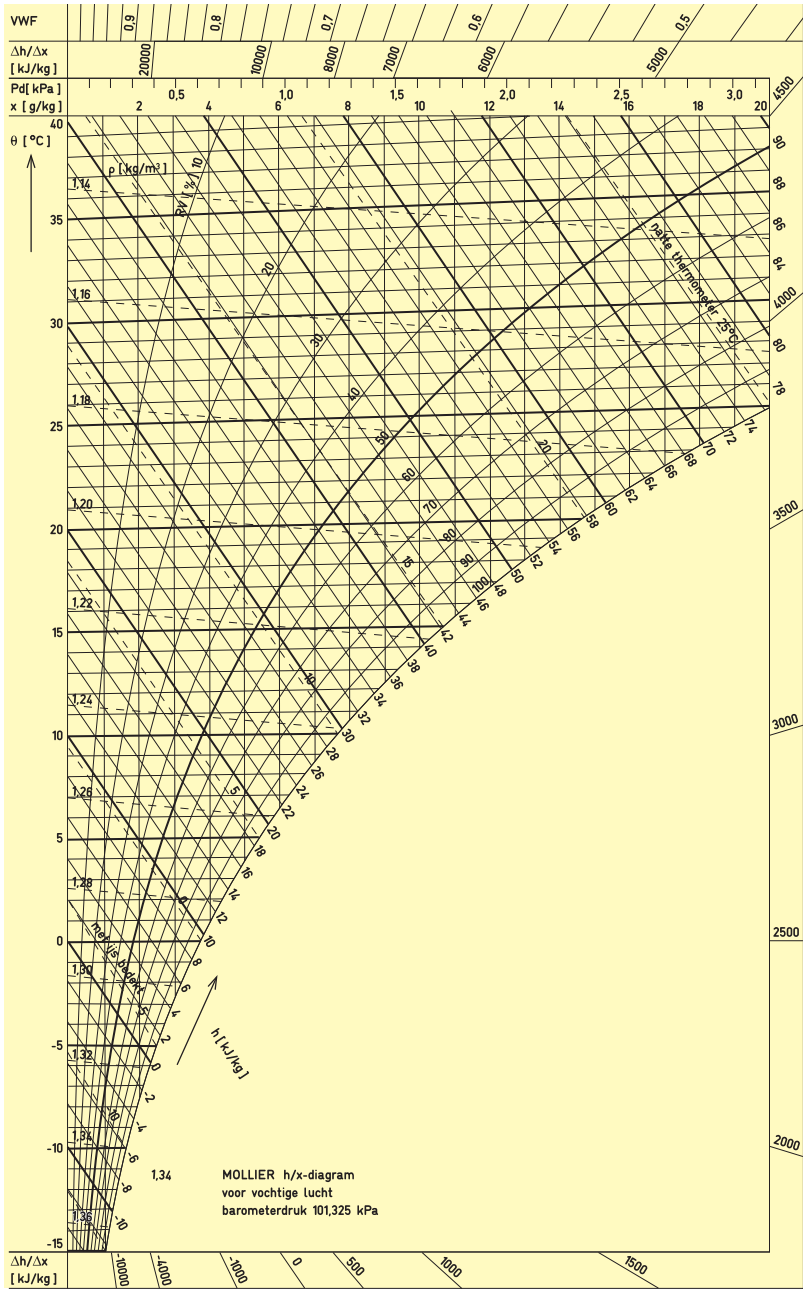
Een ander fenomeen is dat in de module van 3,6 m meestal vier armaturen van 1,8 m worden geplaatst en per 1,8 m één ventilatie-uitblaas, waardoor een uitstekende flexibiliteit ontstaat ongeacht het toe te passen luchtbehandelingssysteem. Aan de hand van deze basisgegevens kan snel zichtbaar worden gemaakt wat de consequenties zijn bij andere uitgangspunten.

Afbeelding 1.11: Kantoorgebouwen met een optimaal binnenklimaat.

Met dit voorbeeld is aangetoond dat bij de renovatie van een kantoorgebouw door deze aanpassingen voldoende ventilatie gewaarborgd blijft en lokaal door middel van inductie-units of ventilatorconvectoren het klimaat per stramien kan worden uitgebreid naar een installatie die voldoet aan de nieuwe normstelling.

HOOFDSTUK 2

VOCHTIGE LUCHT EN HET MOLLIER-HX-DIAGRAM



In de luchtbehandelingstechniek is het Mollier-hx-diagram het belangrijkste hulpmiddel om luchtcondities visueel vast te leggen.
Het Mollier-diagram is ontwikkeld door Richard Mollier (1863-1935), een Duitse professor in de thermodynamica. Hij was ook de bedenker van het Mollier-h-log-P-diagram dat toegepast wordt in de koeltechniek. Ook heeft hij het Mollier-hs-diagram ontworpen voor de stoomtechniek.
In de Engelstalige landen en Amerika wordt in plaats van het Mollier-hx-diagram voor vochtige lucht een soortgelijk diagram gebruikt, de psychometrische kaart genoemd, dat in feite het spiegelbeeld geeft van het Mollier-diagram en voorzien is van de Engelse termen.
In Europa maken alle opleidingen, universiteiten en bedrijven gebruik van het Mollier-hx-diagram. Daarom is het van het grootste belang met dit diagram goed uit de voeten te kunnen. Op zich is het een vrij eenvoudig diagram, maar het kost wel enige moeite om alle onderdelen te begrijpen en het diagram toe te passen.

We behandelen in de volgende paragrafen vochtige lucht en het Mollier-diagram voor vochtige lucht.

2.1 VOCHTIGE LUCHT

Deze paragraaf behandelt:
- de partiële waterdampdruk;
- de begrippen bij vochtige lucht;
- de bijbehorende formules.

Vochtige lucht is een gasmengsel van scheikundige stoffen die zich om ons heen bevinden en dat door zijn massa de luchtdruk om ons heen bepaalt. Deze druk noemen wij de atmosferische druk. Deze atmosferische druk is afhankelijk van de hoogte ten opzichte van de zeespiegel.
Vochtige lucht bevat waterdamp alsmede diverse andere gassen, met elk hun specifieke eigenschappen. Daarom wordt vochtige lucht als een gas beschouwd.

Als we vochtige lucht als gas beschouwen, is de atmosferische druk de som van alle drukken veroorzaakt door de afzonderlijke gassen. Bij deze gassen is de wet van Dalton van toepassing en geldt de onderstaande stelling:

De totaaldruk uitgeoefend door een gasmengsel is gelijk aan de som van de partiële drukken van elk van de samenstellende delen van het mengsel.

De invloed van de waterdamp en droge lucht zijn het grootst, om die reden kunnen we de andere gassen in de vochtige lucht verwaarlozen.

De wet van Dalton voor vochtige lucht in formulevorm luidt:

$$p_t = p_l + p_d$$

Waarin:
- p_t = totale druk (atmosferische druk in Pa);
- p_l = partiële druk van de droge lucht in Pa;
- p_d = partiële druk van de waterdamp in Pa.

In Nederland hanteren wij de druk op zeeniveau, deze bedraagt ongeveer 1 bar. Omdat in het SI-stelsel als eenheid de Pa wordt gebruikt zal voor deze atmosferische druk van 1 bar = 101,3 kPa worden gehanteerd. Deze waarde kunnen we ook in het Mollier-diagram weer terugvinden.

2.1.1 PARTIËLE WATERDAMPDRUK

De invloed van de partiële waterdampdruk op de atmosferische druk is in verhouding met de invloed van de partiële druk van de droge lucht gering. Hij is echter wel van belang. Bij een gelijkblijvende atmosferische druk en een groter wordende p_d zal p_l kleiner worden. De som van deze twee is gelijk aan p_t. De partiële waterdampdruk is niet altijd gelijk, maar is afhankelijk van de condities van de vochtige lucht.

De waterdamp in de lucht heeft ook zijn beperkingen. Zo kan op een bepaald moment de vochtige lucht geen waterdamp meer bevatten. De lucht is dan volledig verzadigd. Wordt er nog meer waterdamp toegevoerd dan zal deze neerslaan als condens, zoals zichtbaar bij beslagen ramen.
De partiële waterdampdruk van verzadigde lucht duiden we aan met p_s.

2.1.2 BEGRIPPEN BIJ VOCHTIGE LUCHT

Voor het verkrijgen van voldoende inzicht is kennis van enkele begrippen noodzakelijk.

Drogeboltemperatuur

Met de drogeboltemperatuur wordt bedoeld de temperatuur van de vochtige lucht, die we kunnen meten met een normale thermometer.
De drogeboltemperatuur wordt aangegeven in θ, in °C of K.

Natteboltemperatuur

De natteboltemperatuur is de temperatuur van vochtige lucht waarbij de lucht is verzadigd. De lucht kan dan geen waterdamp meer opnemen. Op dit verzadigingspunt spreken we van natteboltemperatuur.
De natteboltemperatuur in de ruimte is te meten door op een thermometer een nat kousje te plaatsen en de thermometer vervolgens door de lucht te bewegen, of ervoor te zorgen dat de lucht langs het kousje kan stromen. Hierdoor zal het vocht in het kousje verdampen. Door de verdamping van het water wordt er warmte onttrokken aan de thermometer en gaat de temperatuur zakken. Op het moment dat de lucht om het natte kousje verzadigd is, zal er geen verdamping meer optreden. Wanneer deze evenwichtssituatie is bereikt kan op de thermometer de natteboltemperatuur worden afgelezen.
Ook de natteboltemperatuur wordt aangegeven in θ, in °C of K.

Afbeelding 2.1: Slingerpsychometer.
Bron: Adviesburo F.W.O. de Lede.

De droge- en de natteboltemperatuur kunnen we aflezen op een slingerpsychometer. Deze is weergegeven in afbeelding 2.1.
De meter heeft twee thermometers, waarvan de ene de drogeboltemperatuur meet en de andere (met het kousje) de natteboltemperatuur aangeeft. Het kousje is verbonden met een reservoir met water. Door gedurende ongeveer 1 minuut met de meter te slingeren, kunnen de droge- en natteboltemperatuur worden afgelezen.

Als we de temperaturen hebben afgelezen en genoteerd, kunnen we deze verder gebruiken in het Mollier-hx-diagram voor vochtige lucht. Hoe we deze gegevens kunnen gebruiken zullen we in dit hoofdstuk nader uitleggen.

Dauwpunttemperatuur

De dauwpunttemperatuur is de temperatuur waarbij de vochtige lucht met een bepaalde temperatuur 'voelbaar' wordt afgekoeld tot de situatie dat er verzadiging optreedt. Koelen we lucht nog verder af dan zal er condensatie optreden. Denk bijvoorbeeld aan het in de winter optreden van condens op enkele beglazing. Hierbij zal bij een bepaalde ruimtetemperatuur op het glas de verzadiging van de vochtige lucht worden bereikt.
De dauwpunttemperatuur wordt aangegeven in θ_d, in °C of K.

Soortelijke massa

Met de soortelijke massa van de vochtige lucht wordt in principe het soortelijk gewicht van 1 kg vochtige lucht bedoeld. Dit wordt uitgedrukt in ρ kg/m^3.
De soortelijke massa van de lucht is afhankelijk van de temperatuur en vochtinhoud en zal bij hogere temperaturen lager zijn dan bij lagere temperaturen.
N.B. Bij het ontwerpen van comfortinstallaties wordt als uitgangspunt 20 °C 50% (relatieve vochtigheid) met een soortelijke massa van 1,2 kg/m^3 aangehouden.

Specifiek volume

Afhankelijk van de conditie van de lucht heeft 1 kg van een bepaalde stof ook een bepaald volume. Bijvoorbeeld bij 20 °C en 50% rv heeft 1 kg lucht een specifiek volume van 0,833 m^3/kg.
Specifiek volume is: $\nu = \dfrac{1\ kg}{1{,}2\ kg/m^3} = 0{,}833\ m^3/kg$

Absolute vochtigheid

De absolute vochtigheid is de hoeveelheid waterdamp in kg die in 1 kg droge lucht aanwezig is. De aanduiding hiervan wordt aangegeven in kg/kg droge lucht.
Deze waarde is van belang als er waterdamp aan de vochtige lucht wordt onttrokken of toegevoegd. Bij de behandeling van het Mollier-hx-diagram voor vochtige lucht zullen we een en ander nader behandelen.
De absolute vochtigheid wordt uitgedrukt in kg/kg of ook wel in g/kg.

Soortelijke warmte

De hoeveelheid warmte in kJ die nodig is om 1 kg van een stof 1 K te veranderen (afkoelen of verwarmen), wordt de soortelijke warmte genoemd. Iedere enkelvoudige stof heeft zijn specifieke soortelijke warmte. Als de stof bestaat uit een mengsel, moeten we de soortelijke warmte berekenen aan de hand van elk aandeel van de stof afzonderlijk met zijn specifieke soortelijke warmte.
De soortelijke warmte wordt aangegeven met C in kJ/(kg.K).

Voorbeeld

Vochtige lucht bestaat uit droge lucht en waterdamp:

C_{lucht} = 1,005 kJ/(kg · K), $C_{waterdamp}$ = 1,87 kJ/(kg · K)

Als 1 kg vochtige lucht 0,02 kg waterdamp bevat, is de soortelijke warmte van dit mengsel:

(1 – 0,02) × 1,005 + 0,02 × 1,87 = 1,022 kJ/(kg.K)

Relatieve vochtigheid en verzadigingsgraad

Vochtige lucht is in staat een bepaalde hoeveelheid waterdamp op te nemen. Hoe hoger de temperatuur, des te meer waterdamp kan de lucht bevatten. Er komt een moment dat de lucht geen waterdamp meer kan opnemen. Op dat moment treedt de verzadiging van de lucht op.
De relatieve vochtigheid wordt uitgedrukt in % rv en ook de verzadigingsgraad wordt uitgedrukt in procenten. De grenswaarden liggen tussen 0% (droge lucht zonder waterdamp) en 100% (verzadigde lucht).
De relatieve vochtigheid is gebaseerd op de verhoudingen in de partiële waterdampdruk (p_d) en de partiële waterdampdruk van verzadigde lucht (p_s). Met andere woorden: de relatieve vochtigheid geeft het percentage vocht aan in relatie tot de verzadiging bij 100%. In formulevorm geeft dit:

Relatieve vochtigheid $\varphi = \dfrac{Pd}{Ps} \times 100\%$

Uit de formule blijkt dat vochtige lucht met een bepaalde temperatuur een relatieve vochtigheid of verzadigingsgraad heeft tussen 0 en 100%.

Verzadigde lucht

De verzadigingsgraad is gebaseerd op de verhoudingen in absolute vochtigheid (x) in g/kg of kg/kg. Bij de berekening wordt de absolute vochtigheid (x) van de momentele waarde en de maximale absolute vochtigheid (x_s) bij gegeven temperatuur gebruikt in formulevorm:

$$\text{Verzadigingsgraad} = \frac{x}{xs} \times 100\%$$

Enthalpie

In de luchtbehandeling zijn vochtige lucht en enthalpie (warmte-inhoud) belangrijke begrippen. De enthalpie heeft betrekking op de hoeveelheid warmte of energie die 1 kg lucht van een bepaalde conditie kan bevatten. De enthalpie (h) drukt men uit in kJ/kg.
De enthalpie van vochtige lucht wordt gevormd door de enthalpie van de droge lucht en die van de waterdamp in de lucht. Als nulpunt voor droge lucht ($h = 0$) wordt de enthalpie van 1 kg droge lucht bij een temperatuur van 0 °C aangehouden, voor de waterdamp wordt de enthalpie van 1 kg water bij 0 °C aangehouden.
Bij gebruik van het Mollier-diagram wordt met dit nulpunt gewerkt, maar omdat de enthalpie van de vochtige lucht nooit een absolute waarde heeft, is bij berekeningen met het Mollier-diagram uitsluitend het enthalpieverschil van belang. Door gebruik te maken van dit enthalpieverschil kunnen we afleiden hoeveel energie er wordt toe- of afgevoerd; in processen kunnen alle benodigde berekeningen worden uitgevoerd. We bekijken dus altijd de toestand van de lucht voor en na de toestandsverandering. Dit verschil noemen we het enthalpieverschil.

De enthalpie van vochtige lucht kunnen we in het Mollier-diagram grafisch aflezen, maar deze kunnen we ook berekenen. Bij de berekening van vochtige lucht dienen twee waarden bekend te zijn, te weten:

- de temperatuur (t in °C);
- de absolute vochtigheid (x in $kg / kg_{droge\ lucht}$).

De enthalpie van vochtige lucht met een bepaalde temperatuur is de som van de drie vormen van energie:

1. de hoeveelheid warmte die nodig is om de droge lucht naar een bepaalde temperatuur te brengen;
2. de energie die benodigd is om het water in waterdamp om te zetten;
3. de hoeveelheid warmte die nodig is om de in de droge lucht aanwezige waterdamp naar een bepaalde temperatuur te brengen.

2.1.3 FORMULES

Voor droge lucht is de soortelijke warmte (c_p) gelijk aan 1,005 kJ/(kg.K). Bij een temperatuur van θ_1 is de enthalpie van de droge lucht:

$$h_1 = c_{pl} \cdot \theta_1 \qquad h_1 = 1{,}005 \cdot t_1$$

In de vochtige lucht zit waterdamp opgeslagen. De hoeveelheid water wordt aangegeven in absolute vochtigheid (x) in $kg / kg_{droge\ lucht}$. Om het water om te zetten naar waterdamp is energie benodigd in de vorm van verdampingswarmte. De verdampingswarmte voor water (r) bedraagt ongeveer 2500 kJ/kg. De volgende formule is dan:

$$h_2 = r_w \cdot x \qquad h_2 = 2500 \cdot x$$

De soortelijke warmte van waterdamp (c_w) is gelijk aan 1,87 kJ/(kg.K). Bij een temperatuur van θ_1 is de enthalpie van de waterdamp:

$$h_3 = c_{w1} \cdot x \cdot \theta_1 \qquad h_{tot} = 1{,}87 \cdot \mathrm{x} \cdot \mathrm{t}_1$$

De totale enthalpie van vochtige lucht bij een bepaalde temperatuur en hoeveelheid waterdamp bedraagt:

$$h_{tot} = h_1 + h_2 + h_3$$

Voorbeeld

Als 1 kg droge lucht met een temperatuur van 20 °C, 10 g waterdamp bevat, kunnen we de enthalpie berekenen met onderstaande formules:

$h_1 = c_{pl} \cdot \theta_1$	1,005 · 20	= 21
$h_2 = r_w \cdot x$	2500 · 0,01	= 25
$h_3 = c_{w1} \cdot x \cdot \theta_1$	1,87 . 0,01 · 20	= 0,374
h_{tot}		= 46,374 kJ/kg.K

We kunnen dit controleren door in het Molier-hx-diagram de toestand van 20 °C drogebol-temperatuur en 0,01 kg/kg vochtinhoud uit te zetten en de enthalpie af te lezen. We lezen af: 46,4 kJ/kg.

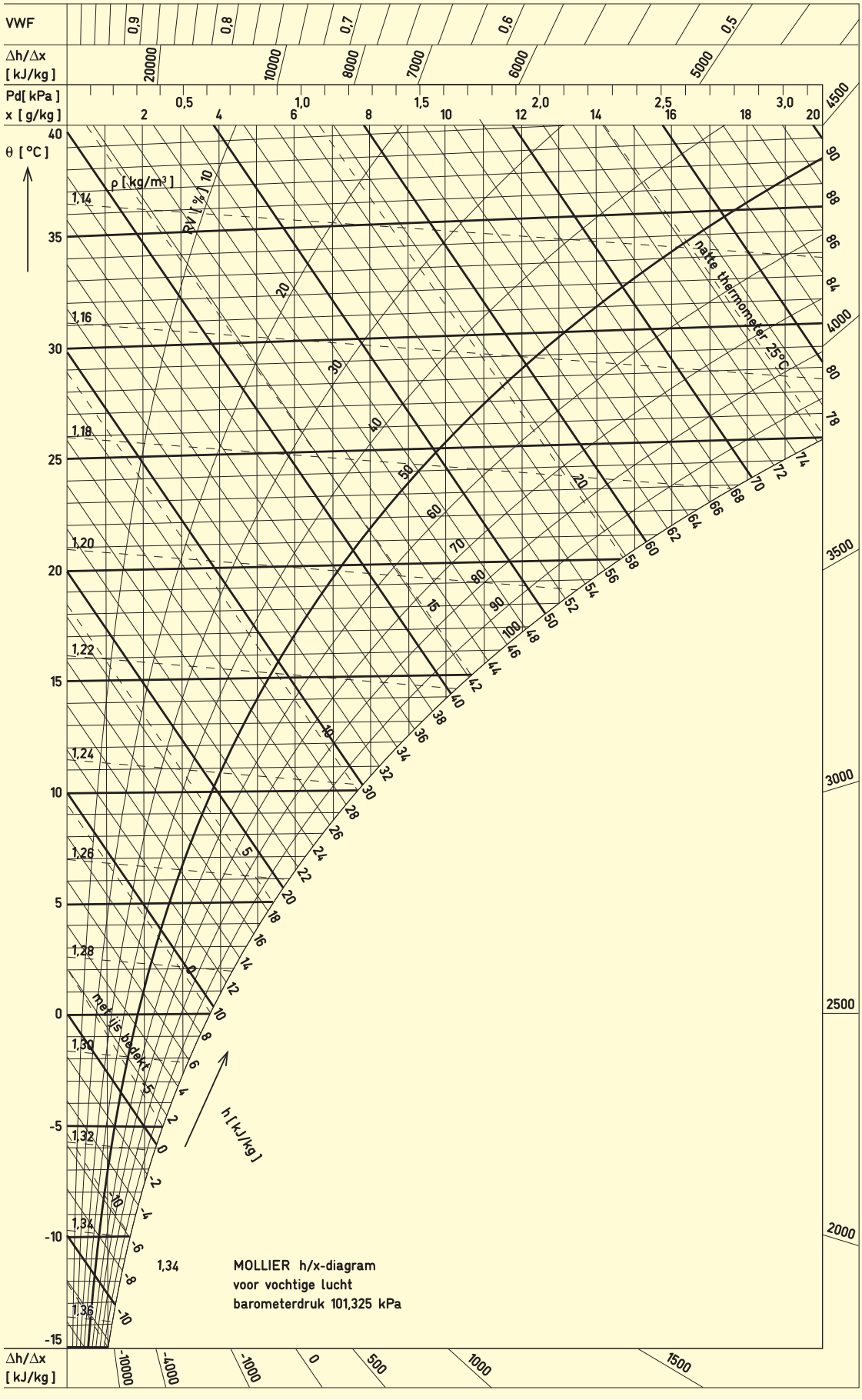
2.2 MOLLIER-HX-DIAGRAM VOOR VOCHTIGE LUCHT

In dit hoofdstuk gaan we niet in op de theorie waarmee het Mollier-diagram tot stand is gekomen, maar uitsluitend op de praktijk.
Het diagram is van groot belang om processen te kunnen weergeven en de diverse waarden hieruit te kunnen aflezen. De vorm van het diagram is volgens internationale afspraken vastgelegd. Het diagram dat wordt gebruikt in de opleidingen voor luchtbehandeling in Nederland is een deel van het totale Mollier-hx-diagram en loopt van −15 °C tot +40 °C. Met dit deel kunnen de Nederlandse omstandigheden goed worden weergegeven in het diagram. Voor hogere temperaturen kan een ander deel uit het totale diagram worden genomen. Het diagram is bestemd voor vochtige lucht bij een barometerstand van 101,325 kPa. Deze barometerstand wordt als constante waarde aangehouden. Voor berekeningen op grotere hoogten, bijvoorbeeld in de bergen, zullen we correcties op de barometerstand moeten toepassen.

We behandelen:
- de lijnen in het Mollier-hx-diagram;
- de dauwpunttemperatuur;
- de toepassing van het Mollier-hx-diagram;
- een voorbeeldberekening met het Mollier-hx-diagram.

2.2.1 LIJNEN IN MOLLIER-HX-DIAGRAM

Om het Mollier-diagram en de betekenis van de diverse lijnen te kunnen begrijpen bespreken we alle lijnen afzonderlijk om zo veel mogelijk duidelijkheid te geven bij het gebruik van het diagram.



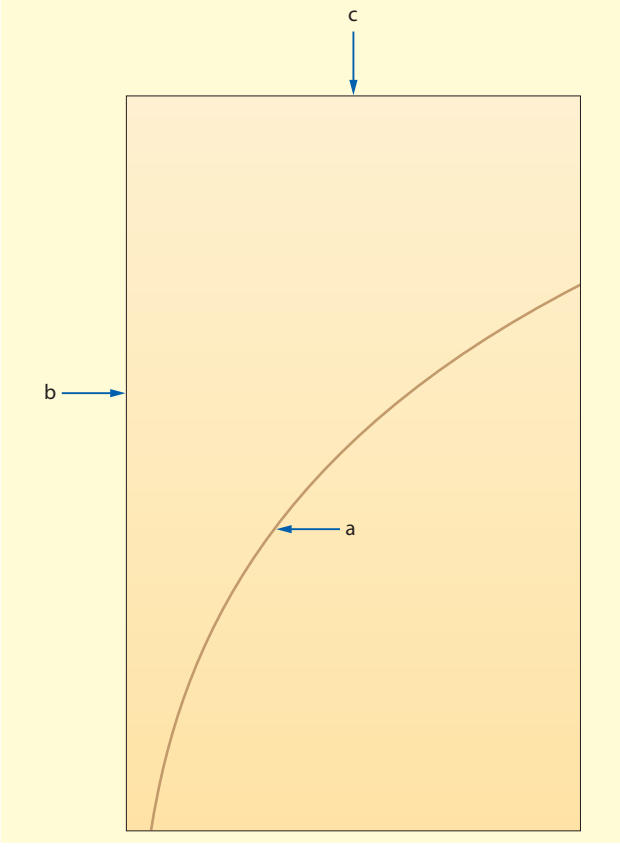
Afbeelding 2.2: Een voorbeeld van het Mollier-hx-diagram voor vochtige lucht.

De grenslijnen van het Mollier-hx-diagram

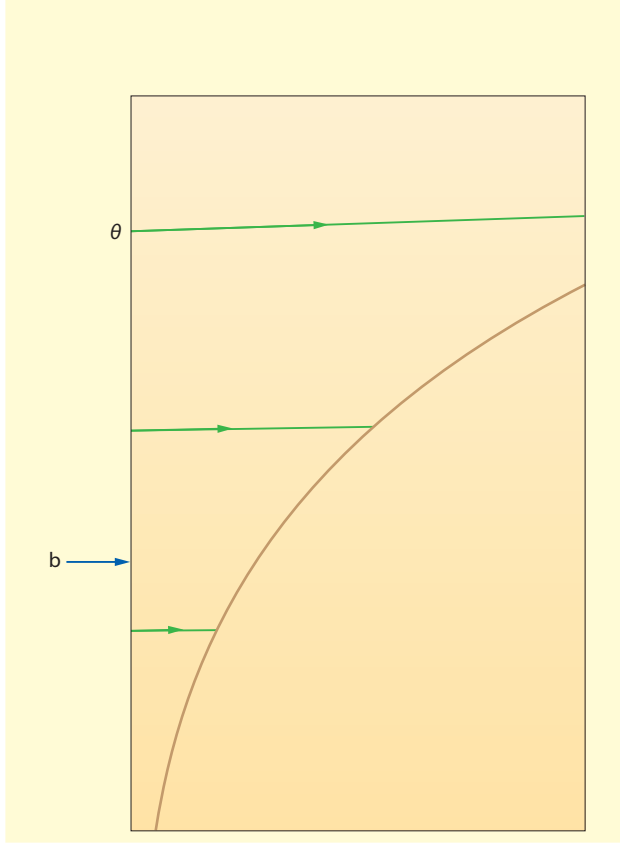
De grenslijnen van het diagram worden aangegeven door de letters a, b en c (zie afbeelding 2.3). De lijn a geeft de maximale relatieve vochtigheid aan, 100%. Boven de 100% zal condensatie optreden en kan de lucht geen vocht meer opnemen. Lijnstuk b geeft de drogeboltemperatuur aan, vanuit dit punt kan de temperatuur van de vochtige lucht worden afgelezen. Lijnstuk c geeft de vochtinhoud in kg/kg aan.

De lijnen van de constante drogeboltemperatuur

In afbeelding 2.4 worden de lijnen van de drogeboltemperatuur aangegeven. Deze lijnen lopen nagenoeg evenwijdig en nagenoeg horizontaal van links naar rechts in het Mollier-diagram. De waarden zijn aangegeven in °C. Op elk punt van een temperatuurlijn is de drogeboltemperatuur gelijk. Bij punt b kan de drogeboltemperatuur worden afgelezen.



Afbeelding 2.3: Afbeelding 2.3: Grenslijnen Mollier-hx-diagram.



Afbeelding 2.4: De lijnen van de drogeboltemperatuur.

De lijnen van de constante absolute vochtinhoud

In afbeelding 2.5 zijn de lijnen van de constante absolute vochtinhoud aangegeven. De lijnen lopen verticaal naast elkaar in het Mollier-diagram.
Op lijn c kan de absolute vochtigheid (x) in kg/kg droge lucht worden afgelezen.

De lijnen van de constante enthalpie

In afbeelding 2.6 zien we de lijnen van de constante enthalpie. Deze lijnen lopen evenwijdig schuin in het Mollier-diagram en geven de enthalpie (warmte-inhoud) aan in kJ/kg. Schuin onder het Mollier-diagram zijn de lijnen doorgetrokken zodat deze nauwkeuriger in het diagram zichtbaar worden.

De lijnen van de constante natteboltemperatuur

In afbeelding 2.7 op pagina 44 worden de lijnen van de constante natteboltemperatuur aangegeven. De lijnen lopen onder dezelfde hoek als de lijnen van de constante enthalpie. De natteboltemperatuurlijn h wordt vanaf het verzadigingspunt 100% rv getrokken naar de kant van de drogeboltemperatuur en kan op de lijn van de drogeboltemperatuur worden afgelezen.