

# Rekenen aan vochtige lucht

Wie zich bezighoudt met klimaatinstallaties zal zeker te maken hebben met verschillende luchtcondities. Veelal wordt dan gebruik gemaakt van een Mollierdiagram. Maar als er gerekend moet worden is men aangewezen op formules. Die moeten dan wel beschikbaar zijn. Dit artikel geeft een overzicht van beschikbare formules die worden gepresenteerd in overzichtelijke tabellen en diagrammen.

Ing. J. (Jaap) Veerman, Royal Haskoning - Buildings

Regelmatig zie je vakgenoten gebruikmaken van een Mollier-h/x-diagram om even wat luchtcondities af te lezen of processen te visualiseren. Ook websites met handige reken-tools zijn in trek. Veelal worden de gevonden waarden ingevoerd in een rekentool of in een zelf opgesteld spreadsheet rekenprogramma. Bijvoorbeeld om de capaciteiten van een koeler of bevochtiger uit te rekenen. De nauwkeurigheid van in een Mollierdiagram of op internet afgelezen waarden zijn hiervoor vaak ruim voldoende. Maar het overnemen van de gevonden waarden in de eigen berekeningen is soms niet handig. Zeker als hiermee ook nog allerlei alternatieven worden doorgerekend of als er wijzigingen optreden in de oorspronkelijke uitgangspunten. Om te voorkomen dat waarden telkens in het diagram moeten worden afgelezen zullen ze moeten worden berekend. Dan komen korte, niet al te ingewikkelde formules van pas.

Deze formules stonden in de augustusuitgave van Klimaatbeheersing uit 1984. In het artikel 'Mollier-h/x-diagrammen voor vochtige lucht, geconstrueerd door middel van de computer' wordt beschreven hoe IMG-TNO in opdracht van TVVL door middel van een computer een aantal Mollierdiagrammen heeft geconstrueerd voor verschillende temperatuurgebieden en situaties met gemiddelde barometerdrukken op nul, 1.000 en 2.000 meter hoogte. Destijds was hier veel vraag naar. De betref-

fende diagrammen zijn helaas niet meer beschikbaar via TVVL, behalve die voor zeeniveau en een werkgebied van -15 tot 40°C (zie figuur 1, pagina omslaan). Dat die publicatie alweer 28 jaar oud is, doet niets af aan de bruikbaarheid ervan. Met name de gepresenteerde formules zijn nog steeds actueel en daarom onderdeel van dit artikel.

## PARAMETERS VOCHTIGE LUCHT

De conditie van vochtige lucht leggen we het liefst eenduidig vast. Er zijn veel manieren waarop dit kan. Minimaal zijn twee parameters nodig om zowel informatie over de vochtinhoud als de temperatuur vast te leggen. Op basis van deze twee condities liggen alle andere parameters vervolgens vast. De belangrijkste parameters voor vochtige lucht zijn:

- temperatuur (droge bol);
- natteboltemperatuur;
- dauwpunttemperatuur;
- relatieve vochtigheid;
- absolute vochtigheid;
- enthalpie;
- partiële dampdruk;
- verzadigde dampdruk;
- soortelijke massa.

De meest gebruikte combinatie om de luchtconditie vast te leggen is die van temperatuur en relatieve vochtigheid. Maar in feite ligt de

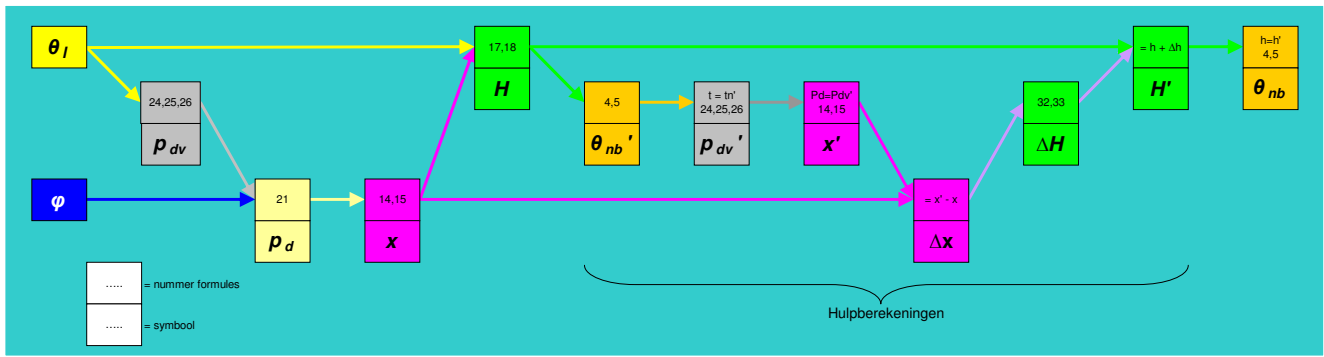
conditie ook vast als bijvoorbeeld de combinatie dauwpunttemperatuur en absolute vochtigheid wordt gebruikt. In het Mollierdiagram is op basis van die parametercombinatie altijd het punt te bepalen dat de luchtconditie vertegenwoordigd. Alle andere parameters zijn dan eenvoudig af te lezen.

## REKENEN AAN VOCHTIGE LUCHT

Voor het berekenen van de luchtcondities zou voor elke parametercombinatie een set formules beschikbaar moeten zijn voor de overige parametercombinaties. Helaas is dit (nog) niet het geval. De formules die wel beschikbaar zijn, staan in tabel 1. Voor de berekening van de eerder genoemde negen parameters zijn nu in totaal 28 formules beschikbaar met in totaal 15 verschillende inputparametercombinaties. Dat zouden er  $29 \times 8 = 232$  kunnen zijn. Dus de formulebeschikbaarheid is nog geen 7%. Er moeten dus meerdere formules achter elkaar worden gebruikt om alle parameters van een luchtconditie te berekenen. In een dergelijk geval is het zeker handig een compleet overzicht van beschikbare formules en input/output-combinaties te hebben, zoals opgenomen in de tabellen 1 en 2.

## FORMULES

Gedurende het gebruik van de formules uit [6] is de behoefte ontstaan aan meer formules



-Figuur 2- Werkwijze voor berekening  $\theta_{nb}$  uit  $\theta_l$  en  $\phi$

Output formule			Input formule																								
			Formule nr.	Geldigheid	$T/\theta_l$	$\theta_{nb}$	$\theta_d$	$\phi$	$x$	$H$	$P_d$	$p_{dv}$	$c_{pl}$	$c_{pw}$	$\Delta x$	$g$	$h$	$B$	$P_b$	$M_w$	$M_l$	$P_0$	$R$				
drogebol temperatuur	$\theta_l$	°C	1	1																							
nattebol temperatuur	$\theta_{nb}$	°C	4	1																							
			5	4																							
dauwpunttemperatuur	$\theta_d$	°C	6	1	$\theta_l$																						
			7	1																							
			8	1																							
relatieve vochtigheid	$\phi$	%	9	1	$\theta_l$		$\theta_d$																				
			10	1																							
absolute vochtigheid	$x$	kg/kg	11	1	$\theta_l$																						
			12	1	$\theta_l$																						
			13	1	$\theta_l$																						
			14	1																							
			15	1																							
enthalpie	$H$	kJ/kg	16	1	$\theta_l$		$\theta_d$																				
			17	1	$\theta_l$																						
			18	1	$\theta_l$																						
			19	1	$\theta_l$																						
			20	1			$\theta_{nb}$																				
partiële dampspanning	$p_d$	kPa	21	1																							
			22	1																							
			23	1																							
verzadigde dampspanning	$p_{dv}$	kPa	24	1	$\theta_l$																						
			25	2	$T$																						
			26	3	$T$																						
			27	1																							
soortelijke massa	$\rho$	kg/m³	28	1	$\theta_l$																						
		kg/m³	29	4	$T$																						
soortelijke warmte lucht	$c_{pl}$	kJ/(kg.K)	30	1	$\theta_l$																						
soortelijke warmte waterdamp	$c_{pw}$	kJ/(kg.K)	31	1	$\theta_l$																						
enthalpieverschil	$\Delta H$	kJ/kg	32	5			$\theta_{nb}$																				
		kJ/kg	33	6			$\theta_{nb}$																				
barometerdruk	$p_b$	kPa	34	1	$T$																						
versnelling t.g.v. zwaartekracht	$g$	m/s²	35	1																							

Geldig voor:	1	$p_b$ 101,325 kPa en $0 < \theta_{nb} < 25$	vaste waarden	$= 18,016$
	2	$0^\circ\text{C} \leq \theta_l < 100^\circ\text{C}$		$= 28,964$
	3	$-40^\circ\text{C} \leq \theta_l \leq 0^\circ\text{C}$		$= 101,325$
	4	$-20 \leq H \leq 100$ en $p_b = 101,325$		$= 8,3144$
	5	$\theta_{nb} \geq 0^\circ\text{C}$		
	6	$\theta_{nb} < 0^\circ\text{C}$		

-Tabel 1- Overzicht beschikbare formules en benodigde input



Formule Nr.	Formule	Bron	Opmerking
1	$\theta_l = 17,6 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varphi(x+0,622)+50665x}{\varphi(x+0,622)} \right) - 1,402 \right]$	°C	1
2	$\theta_l = \frac{H-2500x}{1,86x+1}$	°C	1
3	$\theta_l = 17,6 \ln \frac{p_{dw}+0,2}{0,813}$	°C	1
4	$\theta_{nb} = 27,8 \ln \frac{H+36}{45,5}$	°C	[6] 1,7
5	$\theta_{nb} = 0,580815(H-9,44) - 4,1942 \cdot 10^{-3} (H-9,44)^2 + 1,6439 \cdot 10^{-5} (H-9,44)^3 - 5,26286 \cdot 10^{-9} (H-9,44)^4$	°C	[6] 4,7
6	$\theta_d = 17,6 \left( \frac{\varphi \cdot e^{\left(\frac{\theta_l}{17,6}\right)} + \frac{100-\varphi}{4,065}}{100} \right)$	°C	1
7	$\theta_d = 17,6 \ln \left( \frac{101,33 \cdot x + 0,2}{0,813} \right)$	°C	1
8	$\theta_d = 17,6 \ln \frac{p_d+0,2}{0,813}$	°C	1
9	$\varphi = \frac{1,058^{\theta_d} - 0,246}{1,058^{\theta_d} - 0,246} \cdot 100$	%	1
10	$\varphi = 100 \frac{p_d}{p_{d_v}}$	%	[6]
11	$x = \frac{-7752}{\varphi(1,058\theta_l - 0,246) - 12464}$	kg/kg	1
12	$x = \frac{H - \theta_l}{2500 + 1,86 \cdot \theta_l}$	kg/kg	[6] 1
13	$x = \frac{H - c_{pl} \cdot \theta_l}{2500,8 + c_{pw} \cdot \theta_l}$	kg/kg	[6]
14	$x = \frac{0,622 p_d}{101,33 - p_d}$	kg/kg	[6] 1
15	$x = \frac{M_w \cdot p_d}{M_l \cdot p_b - p_d}$	2	[2]
16	$H = \frac{-144,2 \cdot (\theta_l + 1344)}{1,0584^{\theta_l} - 124,9} - 0,1569 \cdot \theta_l - 1555$	kJ/kg	1
17	$H = \theta_l + 2500 \cdot x + 1,86 \cdot x \cdot \theta_l$	kJ/kg	[6] 1
18	$H = c_{pl} \cdot \theta_l + 2500,8 \cdot x + c_{pw} \cdot x \cdot \theta_l$	kJ/kg	[3]
19	$H = \left( \frac{-117,23}{p_d - 101,33} - 0,1569 \right) \cdot \theta_l - \frac{1555 \cdot p_d}{p_d - 101,33}$	kJ/kg	1
20	$H = 45,5 e^{\theta_{nb}/27,8} - 36$	kJ/kg	[6] 1
21	$p_d = \frac{\varphi}{100} \cdot p_{d_v}$	kPa	[2]
22	$p_d = \frac{101,33x}{0,622+x}$	kPa	[6] 1
23	$p_d = \frac{p_b}{1 + \frac{M_w}{x \cdot M_l}}$	kPa	[6]
24	$p_{d_v} = 0,813 \cdot e^{\theta_l/17,6} - 0,2$	kPa	[6] 1
25	$\log p_{d_v} = 10,79574 \left( 1 - \frac{273,16}{T} \right) - 5,028 \log \left( \frac{T}{273,16} \right) + 1,505475 \cdot 10^{-4} \left( 1 - 10^{-\frac{8,2969}{271,18} \left( \frac{T}{273,16} - 1 \right)} \right) + 4,2873 \cdot 10^{-4} \left( 10^{\frac{4,76955}{T} \left( \frac{273,16}{T} - 1 \right)} - 1 \right) - 0,213856$	kPa	[1] 2
26	$\log p_{d_v} = -9,09685 \left( \frac{273,16}{T} - 1 \right) - 3,56654 \log \left( \frac{273,16}{T} \right) + 0,87682 \left( 1 - \frac{T}{273,16} \right) - 0,213856$	kPa	[1] 3
27	$p_{d_v} = \frac{p_d}{\varphi} \cdot 100$	kPa	
28	$\rho = 219,6 \frac{1+x}{(\theta_l + 273,15)(0,622+x)}$	kg/m³	[6] 1
29	$\rho = \frac{(1+x) \cdot M_w \cdot p_b}{R \cdot T \cdot \left( \frac{M_w}{M_l} + x \right)}$	kg/m³	[2] 4
30	$c_{pl} = 1,006 + \frac{\theta_l}{2,10^3} + \frac{\theta_l^2}{7,5 \cdot 10^6}$	kJ/(kg.K)	[5]
31	$c_{pw} = 1,8584 + 1,0875 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_l + 3,083 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_l^2$	kJ/(kg.K)	[5]
32	$\Delta H = 4,187 \cdot \theta_{nb} \Delta x$	kJ/kg	[2] 5
33	$\Delta H = (2,09 \cdot \theta_{nb} - 335) \cdot \Delta x$	kJ/kg	[2] 6
34	$p_b = p_0 \cdot e^{-\frac{g \cdot M \cdot h}{1000 \cdot K \cdot T}}$	kPa	[2]
35	$g = 9,780373(1 + 0,0052891 \sin B)^2 - 0,0000059 \sin^2(2B)$	m/s²	[4]

gebruik te maken van de formules 32 en 33. Om de natteboltemperatuur te berekenen bij een barometerdruk van 101,325 kPa met gegeven waarden voor de temperatuur ( $\theta_l$ ) en de relatieve vochtigheid ( $\varphi$ ), dient men de werkwijze te volgen zoals aangegeven in figuur 2 en 3.

De te volgen werkwijze bij gegeven waarden voor de nattebol- en drogeboltemperatuur is weergegeven in de figuren 4 en 5, eveneens bij een barometerdruk van 101,325 kPa.

## SYMBOLLEN

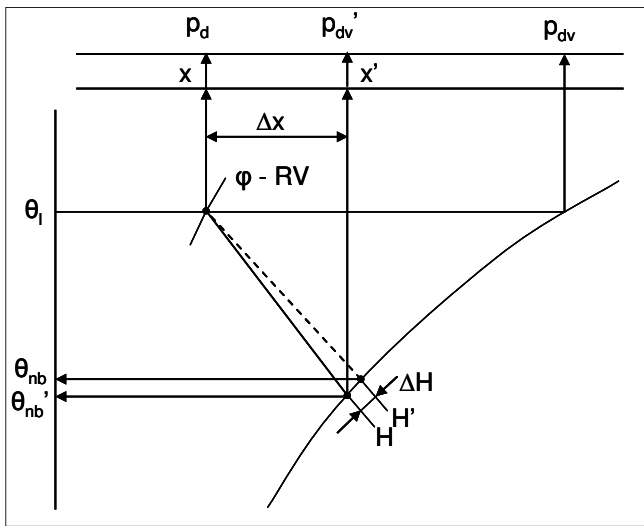
B	breedtegraad	°
$c_{pl}$	soortelijke warmte lucht	kJ/(kg.K)
$c_{pw}$	soortelijke warmte waterdamp	kJ/(kg.K)
g	versnelling t.g.v. zwaartekracht	m/s²
H	enthalpie	kJ/kg
h	hoogte boven zeeniveau	m
$M_l$	molaire massa van lucht = 28,964	kg/kmol
$M_w$	molaire massa van waterdamp = 18,016	kg/kmol
$P_0$	barometerdruk op 0 m hoogte	kPa
$P_b$	barometerdruk	kPa
$p_d$	partiële dampspanning	kPa
$p_{d_v}$	verzadigde dampspanning	kPa
R	molaire gasconstante = 8,33144	kJ/(kmol.K)
$\theta_l$	drogeboltemperatuur	°C
T	drogeboltemperatuur	K
x	absolute vochtigheid	kg/kg
$\theta_d$	dauwpunttemperatuur	°C
$\theta_{nb}$	natteboltemperatuur	°C
$\varphi$	relatieve vochtigheid	%
$\rho$	soortelijke massa	kg/m³

## LITERATUUR

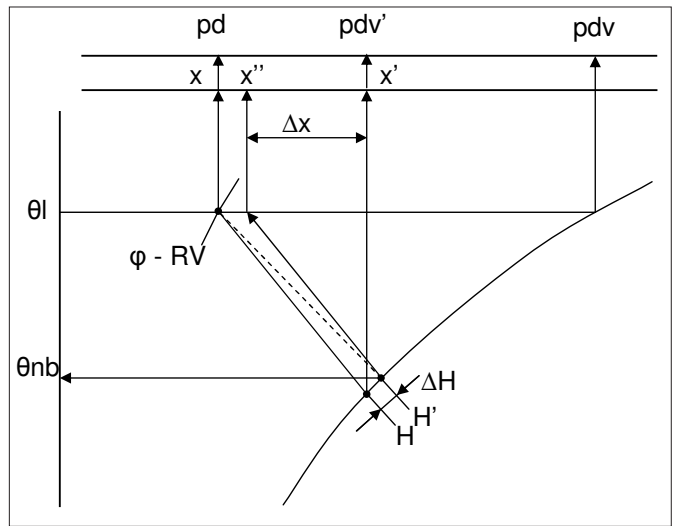
1. Amme, K., Berechnung von psychrometrischen Daten mit einem programmierbaren Taschenrechner; HLH 34 (1983), nr. 3, März
2. Theil, C. G. e.a., TVVL-cursus Luchtbehandelingsstechniek, deel 2: Mollierdiagram, TVVL Amersfoort, 1982
3. Baehr, H.D., Mollier-i, x-diagramme für feuchte Luft; Springer-verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1961
4. Kohlrausch, F., Praktische Physik, Band I, 1955; Teubner Verlag, Stuttgart
5. Crommelin, R.D., Interne informatie over fysische eigenschappen van vochtige lucht; IMG-TNO, Delft, 1984
6. Ham, Ph.J., Mollier-h/x-diagrammen voor vochtige lucht, geconstrueerd door middel van de computer, Klimaatbeheersing 13, 1984 nr. 8 (augustus)

Opmerking	Formule geldig bij:
1	$p_b = 101,325 \text{ kPa}$ en $0 < \theta_{nb} < 25$
2	$0^\circ\text{C} \leq \theta_l < 100^\circ\text{C}$
3	$-40^\circ\text{C} \leq \theta_l \leq 0^\circ\text{C}$
4	$-20 \leq H \leq 100$ en $p_b = 101,325$
5	$\theta_{nb} \geq 0^\circ\text{C}$
6	$\theta_{nb} < 0^\circ\text{C}$
7	$\theta_{nb}$ wordt berekend bij $\varphi = 100\%$

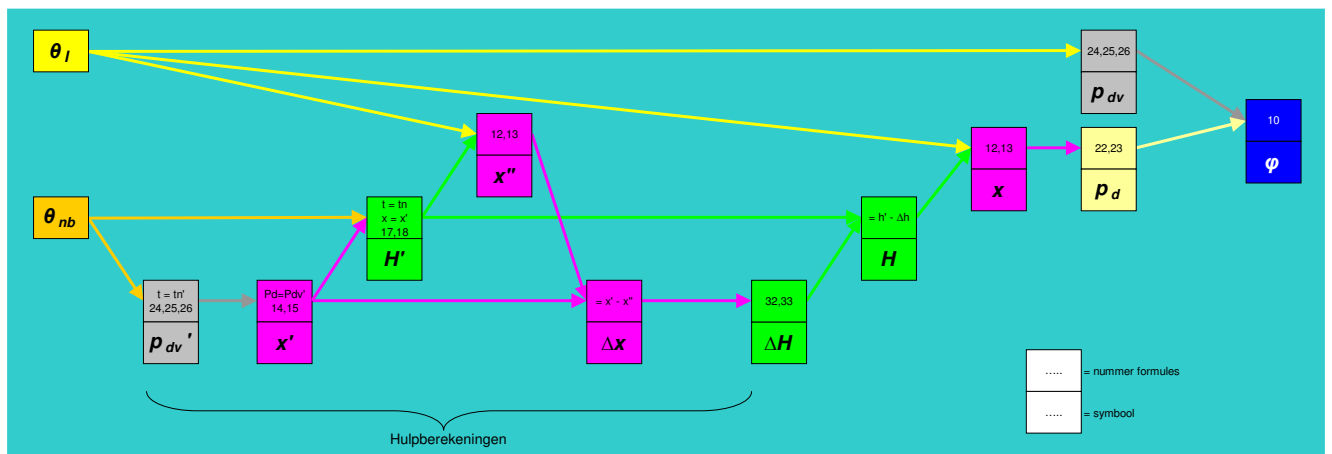
-Tabel 2- Overzicht formules vochtige lucht



-Figuur 3- Berekening van  $\theta_{nb}$  uit  $\theta_l$  en  $\varphi$ , schematisch aangegeven in het Mollierdiagram



Figuur 4- Werkwijze voor berekening  $H$ ,  $x$  en  $\varphi$  uit  $\theta_{nb}$  uit  $\theta_l$



--Figuur 5- Berekening van  $H$ ,  $x$  en  $\varphi$  uit  $\theta_{nb}$  uit  $\theta_l$ , schematisch aangegeven in het Mollierdiagram

## Aardwarmte - 't zat er al in ... ... en Remon haalt 't er weer voor u uit!

Remon regelt voor installateurs, architecten en huiseigenaren het complete aardwarmte-systeem. En we leveren het sleutelklaar op tot aan de warmtepomp. Heel gemakkelijk, heel vertrouwd.

Waarom zo stellig? Omdat Remon het meest competente boorbedrijf van Nederland is en omdat we zorgvuldig geperfectioneerde techniek gebruiken.

Wat betekent dat in de praktijk?

- we boren snel de benodigde schachten, tot 300 meter diep
- we berekenen deskundig de bijbehorende leidingweerstand
- we werken netjes en schoon, zonder graafwerk in het terrein of boomateriaal dat achterblijft rondom het boorgat
- we stemmen 't systeem af op uw behoeften
- en we geven 25 jaar systeemgarantie



**REMON**  
passie voor  
duurzame energie

Waarom Remon?

- SIKB-erkend boorbedrijf
- open en gesloten bronsystemen
- grote en kleine boomachines, geschikt voor elk terrein
- landelijk opererende servicedienst - 24/7 service
- meer dan 25 jaar ervaring

Marum | Dalfsen | Ospel  
0594 64 80 80 | 0529 43 50 40 | 077 466 00 45