

DO1

CENTRAAL TECHNISCH INSTITUUT TNO

Ref. no.: 73-0614

Dossier: 02-6-40070

RAPPORT

INTRODUCTIE VAN EEN MOLLIERDIAGRAM

VOOR VOCHTIGE LUCHT IN SI-EENHEDEN

TEN BEHOEVE VAN

DE KERAMISCHE INDUSTRIE

door

J.H. van der Velden

Datum : 1 april 1973

Bestemd voor: De Nederlandse Grofkeramische Industrie

MEDEDELING AAN OPDRACHTGEVERS

Opdrachten die als voorlichting of keuring gekarakteriseerd kunnen worden en waarbij door TNO geen of vrijwel geen research wordt verricht, worden uitsluitend aangenomen op voorwaarde, dat de opdrachtgever afziet van een beding dat dergelijke opdrachten uitsluitend voor hem zullen worden uitgevoerd.

Bij andere opdrachten, in het bijzonder die van geringe omvang (waarvan de geschatte researchkosten minder dan f 10.000,- bedragen) en bij „trouble shooting“-problemen, kan op verzoek van de opdrachtgevers TNO zich verplichten gedurende de tijd waarin de opdracht in bewerking is, geen overeenkomstige opdrachten van derden te aanvaarden. Voor zover aan TNO specifieke bedrijfsgeheimen medegedeeld worden door de opdrachtgever, nodig voor de oplossing van het gestelde probleem, verplicht TNO zich tot geheimhouding.

Rechten op octrooieerbare vindingen ten gevolge van dergelijke opdrachten zijn het eigendom van TNO; op verkregen octrooien krijgt de opdrachtgever een gratis, exclusieve, overdraagbare licentie voor het gebied waarop de opdracht betrekking heeft. Indien en voor zover TNO geen gebruik wenst te maken van het recht octrooien op dergelijke vindingen aan te vragen, komt dit recht aan de opdrachtgever.

Bij grote researchopdrachten kunnen, op verzoek van de opdrachtgever, hiervan afwijkende voorwaarden betreffende octrooirechten, exclusiviteit en geheimhouding in onderling overleg contractueel worden vastgesteld.

Alle geoffreerde bedragen en kostenschattingen zijn exclusief omzetbelasting.

De aan een onderzoek verbonden kosten zullen per kwartaal worden gedeclareerd, ook wanneer het onderzoek nog niet is beëindigd.

Werkzaamheden ten behoeve van opdrachtgevers worden slechts uitgevoerd op voorwaarde, dat de opdrachtgever afstand doet van ieder recht op aansprakelijkstelling en zich verplicht tot vrijwaring voor iedere aansprakelijkheid jegens derden, een en ander behalve indien en voor zover grove schuld en/of opzet worden/wordt aangetoond.

SAMENVATTING

Het rapport geeft een toelichting op het bijgevoegde nieuwe ontwerp van een Mollierdiagram voor vochtige lucht in SI-eenheden. Naast een motivering van het verrichte werk, geeft het rapport een inzicht in de invloed van de atmosferische druk op de juistheid van de diagramaflezing.

Voorts worden enkele aanbevelingen gedaan inzake de keuze van buitenluchtcondities bij droogtechnische berekeningen en inzake de keuze van de getalwaarde van het specifiek warmteverbruik van droogprocessen in de grofkeramische industrie ten behoeve van globale calculaties.

INHOUDSOPGAVE

	<u>blz.</u>
<u>SAMENVATTING</u>	1
1. <u>INLEIDING</u>	3
2. <u>HOOFDKENMERKEN VAN HET ONTWERP</u>	4
3. <u>DE CONSTRUCTIE VAN HET DIAGRAM</u>	5
4. <u>OPMERKINGEN BIJ HET PRAKTISCHE GEBRUIK VAN HET MOLLIERDIAGRAM</u>	6

BIJLAGE: 1 MOLLIERDIAGRAM

1. INLEIDING

Voor het uitvoeren van droogtechnische berekeningen wordt op het Europese vasteland veelvuldig gebruik gemaakt van het zogenaamde Mollierdiagram voor vochtige lucht. Ook in de keramische industrie is dit het geval. Door het voormalige Keramisch Instituut TNO werd een Molliërdiagram ontworpen, dat door de keuze van de parameters en het diagrambereik in het bijzonder geschikt bleek voor berekeningen betreffende het kunstmatig droogproces van keramische produkten.

Als gevolg van de ingebruikneming van het nieuwe internationale stelsel van eenheden, overeenkomstig NEN 1221, NEN 1222 en NEN 1224, raakt dit uit 1958 daterende ontwerp langzamerhand verouderd.

Het besluit van de "Stichting Opleiding Keramici" tot een algehele herziening van de leerstof van de applicatiecursus "Keramiek", gegeven aan de Hogere Technische School te Dordrecht, werd de aanleiding een nieuw Mollierdiagram voor vochtige lucht in SI-eenheden te ontwerpen, dat wederom geheel zou zijn afgestemd op het gebruik in de keramische industrie. Een handelsuitvoering van het Mollierdiagram in SI-eenheden met een optimale gebruikswaarde voor de keramische industrie, bleek nog niet verkrijgbaar te zijn.

2. HOOFDKENMERKEN VAN HET ONTWERP

Binnen een gemakkelijk hanteerbaar formaat diende een zodanig diagram-bereik te worden gekozen, dat de bij droogprocessen in de keramische industrie te verwachten toestandsveranderingen van de drooglucht, nagenoeg zonder uitzondering en met een voldoende grote nauwkeurigheid, in het diagram zouden kunnen worden weergegeven.

De keuze viel op een standaardformaat A3 (297 x 420 mm) en op de navolgende diagrambegrenzungen:

- Maximum watergehalte van de lucht: 0,075 kg per kg droge lucht
(schaalwaarde horizontaal: 1 mm = 0,2 g per kg droge lucht).
- Maximum enthalpie van de lucht: 270 kJ per kg droge lucht, berekend ten opzichte van lucht en water van 273 K (0°C)
(schaalwaarde vertikaal: 1 mm = 1 kJ per kg droge lucht) (270 kJ/kg \equiv 64,5 kcal/kg)
- Maximum temperatuur van de lucht 498 K (225 °C)

Voor de druk van het lucht-waterdamp-mengsel werd de normale atmosfeer gekozen, te weten 101,325 kN/m² (760 mm Hg). De gebruikswaarde van het diagram werd geoptimaliseerd door het opnemen van lijnen voor toestandsveranderingen van de lucht:

- bij constant blijvend watergehalte
- bij constant blijvende enthalpie (adiabaten)
- bij constant blijvende luchttemperatuur (isothermen)
- bij constant blijvende relatieve vochtigheid van de lucht voor waarden van 100 % tot 5 %
- bij constant blijvende natteboltemperatuur van de lucht voor waarden tot 50°C (nevelisothermen)
- bij constant blijvend massiekvolume van de lucht voor waarden van 0,78 tot 1,42 m³ per kg vochtige lucht.
- bovendien werd de relatie tussen het watergehalte in kg per kg droge lucht en de partiële waterdampspanning in kN/m² van het lucht-waterdamp-mengsel weergegeven.

3. DE CONSTRUCTIE VAN HET DIAGRAM

Ter vermijding van onnauwkeurigheden in de constructie, alsmede op grond van gewenst geachte aanvullingen en verbeteringen van het in 1958 ontworpen diagram, werd het Mollierdiagram geheel opnieuw berekend.

Voor de keuze van de stofconstanten werd daarbij gebruik gemaakt van de door W. Häussler verzamelde gegevens in "Lufttechnische Berechnungen im Mollier-i,x-Diagramm", Verlag Theodor Steinkopff, Dresden 1969.

De hierboven gebruikte aanduiding i voor de enthalpie werd vervangen door het symbool h (NEN 1224).

De basisformules voor het ontwerp zijn op het diagram vermeld. Voor de afleiding en de toelichting van deze formules, raadplege men eveneens het vermelde boek. Het ontworpen diagram is als bijlage in dit rapport opgenomen.

4. OPMERKINGEN BIJ HET PRAKTISCH GEBRUIK VAN HET MOLLIERDIAGRAM

De gebruiksmogelijkheden van het Mollierdiagram worden bekend verondersteld. Gewezen wordt op de afhankelijkheid van een aantal grootheden van de druk p in het systeem.

Uit de op het diagram weergegeven basisformules blijkt, dat in het bijzonder de posities van de verzadigingslijn, de φ -constant-lijnen en de lijnen van constant massiek volume, afhankelijk zijn van de totale druk. De uitkomsten van onderstaand rekenvoorbeeld dat betrekking heeft op een frequent gebruikt diagramgebied, geven een indruk van de orde van grootte van de invloed van de luchtdruk.

In de verzadigingstoestand bij 35°C en bij een normale atmosferische druk van $101,325 \text{ kN/m}^2 \equiv 1013,25 \text{ mbar} \equiv 760 \text{ mm Hg}$, bedraagt het watergehalte x ; $36,5 \text{ g}$ per kg droge lucht en is het massiek volume: $0,891 \text{ m}^3$ per kg vochtige lucht.

Een drukverlaging gelijk aan $0,5 \text{ kN/m}^2 \equiv 5 \text{ mbar} \equiv 3,75 \text{ mm Hg}$ blijkt bij 35°C een toeneming van het verzadigingswatergehalte x_v te veroorzaken van circa $0,2 \text{ g}$ per kg droge lucht en gaat in de verzadigingstoestand bij 35°C gepaard met een toeneming van het massiek volume van circa $0,5 \%$.

Een zelfde drukverhoging levert een overeenkomstige verlaging van het verzadigingswatergehalte en het massiek volume op.

Dr. C. Braak geeft in Mededelingen en Verhandelingen Nr 32 van het KNMI aan, dat het jaargemiddelde van de luchtdruk bij het weerstation te De Bilt, gemeten over een lange reeks van jaren en herleid tot zeeniveau, $101,47 \text{ kN/m}^2$ bedraagt en dat de maandgemiddelden voor elk van de twaalf maanden, onder gelijke omstandigheden bepaald, variëren tussen $101,68$ en $101,27 \text{ kN/m}^2$. Voor de toegepaste hoogtecorrectie wordt $12,3 \text{ N/m}^2$ per meter boven zeeniveau aangegeven. De jaar- en maandgemiddelden van de stations te Groningen, Vlissingen en Maastricht blijken dermate weinig van die van De Bilt te verschillen, dat de gegevens van het weerstation te De Bilt wel als maatgevend voor de Nederlandse keramische industrie mogen worden beschouwd.

Indien men het drukk niveau van droogprocessen in de grofkeramische industrie ten opzichte van de atmosfeer verwaarloosd en men aanneemt, dat de installaties tussen 8 en 16 meter boven zeeniveau liggen, zullen de bovenbedoelde maandgemiddelden van de druk in de installaties variëren tussen $101,58 \text{ kN/m}^2$ en $101,07 \text{ kN/m}^2$.

Dit zijn drukken, die elk circa $0,25 \text{ kN/m}^2$ afwijken van de als diagrambasis aanvaarde normale atmosferische druk van $101,325 \text{ kN/m}^2$.

Deze drukverschillen betekenen voor het watergehalte bij een verzadigings-temperatuur van 35°C zoals boven aangegeven, een afwijking van + of - $0,1 \text{ g/kg}$ droge lucht. Een dergelijke fout is aanvaardbaar. Daarom mag het ontworpen diagram in de Nederlandse keramische industrie in de meeste gevallen zonder toepassing van correcties, voor het ontwerpen en evalueren van droogprocessen in elk jaargetijde, worden gebruikt.

Bij de verwerking van op bepaalde tijdstippen verrichte waarnemingen aan drogerijen, met behulp van het h, x -diagram, dient men zich echter telkens af te vragen, in hoeverre correcties, voortvloeiend uit een afwijkende totale druk in het systeem, gewenst zijn.

Aanwijzingen voor de correctie van diagramwaarden bij een afwijkende druk, treft men onder meer aan in het eerder vermelde boek van Häussler.

Ten behoeve van droogtechnische calculaties dient men vaak te beschikken over gegevens betreffende de gemiddelde condities van de buitenlucht.

Aan de hand van gegevens over het verloop van de waterdampspanning en de temperatuur van de buitenlucht in Nederland over een reeks van jaren, vermeld in de mededelingen 41 en 43 van het KNMI, werd onderstaand overzicht samengesteld.

Het geldt voor het weerstation te De Bilt. De afwijkingen voor de andere Nederlandse stations zijn echter niet groot.

Gemiddelde condities van de buitenlucht

	jaar- gemiddelde	januari- gemiddelde	juli- gemiddelde
(M 43) temperatuur θ , ($^\circ\text{C}$)	9,0	2,3	16,6
(M 41) waterdampspanning p_d , (kN/m^2)	0,999	0,656	1,508
berekend watergehalte x (kg/kg)	0,00619	0,00405	0,00940
berekende relatieve vochtigheid φ (%)	87	91	80
berekende enthalpie h (kJ/kg)	24,6	12,5	40,5

Voor droogtechnische calculaties worden de navolgende afgeronde h en x waarden aanbevolen.

Standaard condities van de buitenlucht bij droogtechnische berekeningen

	jaar- gemiddelde	januari- gemiddelde	juli- gemiddelde
enthalpie h (kJ/kg)	25	12	40
watergehalte x (kg/kg)	0,006	0,004	0,009
temperatuur θ ($^{\circ}\text{C}$)	9,8	2,0	17,1

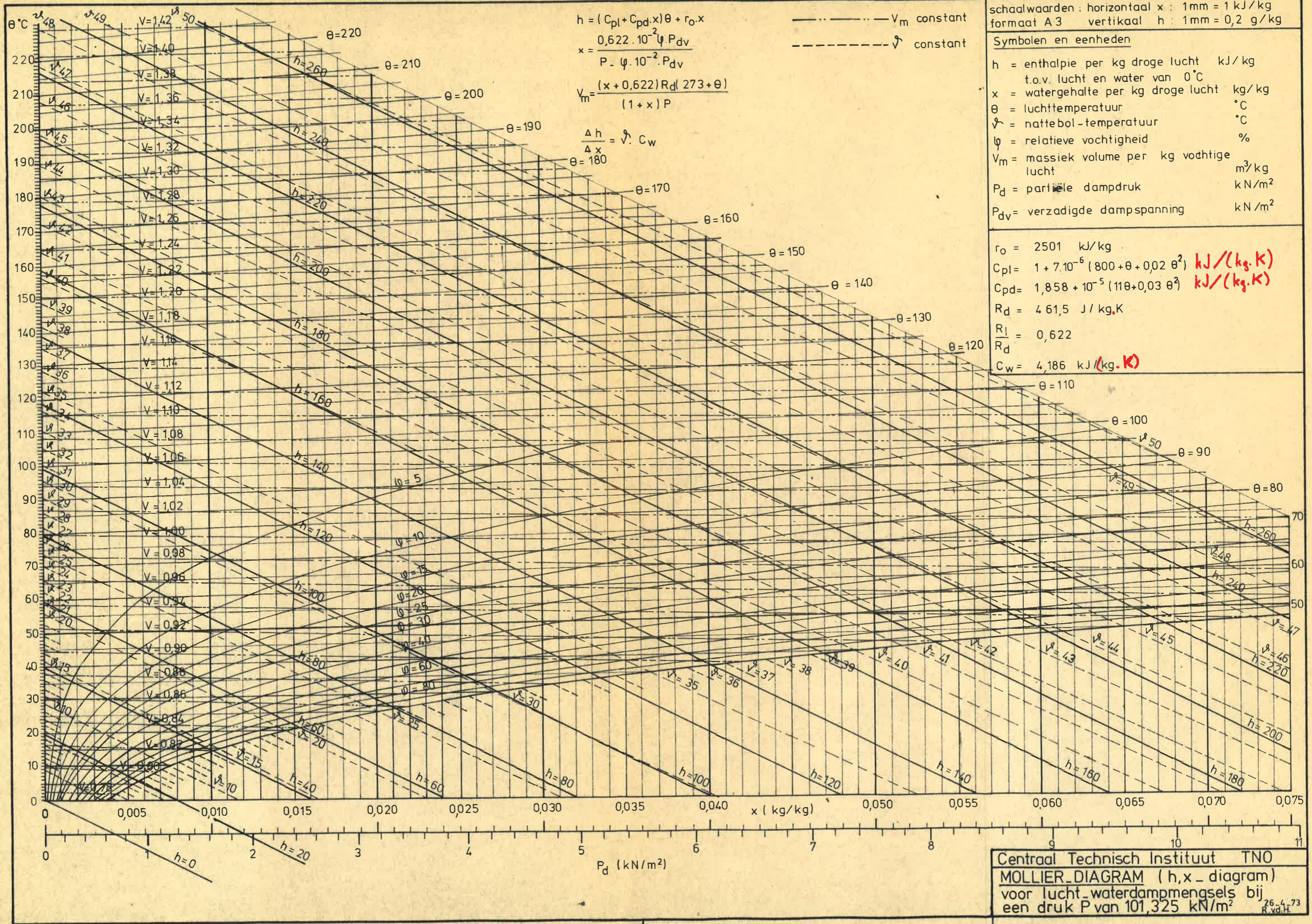
Een veelvuldig gebruikt begrip in de droogtechniek is het specifiek warmteverbruik van een droogproces. Bij droging met geconditioneerde buitenlucht, is het specifiek warmteverbruik de hoeveelheid warmte, die boven het warmteniveau van de buitenlucht, voor de verdamping van 1 kg water moet worden toegevoerd. Bij vergelijking van het specifiek warmtegebruik van verschillende droogprocessen, verdient het aanbeveling de getalwaarden te baseren op de bovenvermelde standaardcondities van de buitenlucht.

De getalwaarde van het specifiek warmteverbruik van droogprocessen in de keramische industrie zal in het algemeen liggen tussen

4 MJ/kg ($4 \cdot 10^3$ kJ) (956 kcal/kg) en

5 MJ/kg ($5 \cdot 10^3$ kJ) (1194 kcal/kg)

4,5 MJ/kg (1075 kcal/kg) is een gemakkelijk te onthouden, wat ruim gekozen gemiddelde waarde, die wordt aanbevolen voor het uitvoeren van globale berekeningen.



$$h = (C_{pl} + C_{pd} \cdot x) \theta + r_0 \cdot x$$

$$x = \frac{0,622 \cdot 10^{-2} \cdot \varphi \cdot P_{dv}}{P - \varphi \cdot 10^{-2} \cdot P_{dv}}$$

$$V_m = \frac{(x + 0,622) R_d (273 + \theta)}{(1 + x) P}$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \theta_w \cdot C_w$$

— · — · — · — V_m constant
 - - - - - θ_w constant

schaalwaarden : horizontaal x : 1mm = 1 kJ/kg
 formaat A3 vertikaal h : 1mm = 0,2 g/kg

Symbolen en eenheden
 h = enthalpie per kg droge lucht kJ/kg
 t.o.v. lucht en water van 0°C
 x = watergehalte per kg droge lucht kg/kg
 θ = luchttemperatuur °C
 θ_w = nattebol-temperatuur °C
 φ = relatieve vochtigheid %
 V_m = massiek volume per kg vochtige lucht m³/kg
 P_d = partiële dampdruk kN/m²
 P_{dv} = verzadigde dampspanning kN/m²

r₀ = 2501 kJ/kg
 C_{pl} = 1 + 7 · 10⁻⁶ (800 + θ + 0,02 θ²) kJ/(kg·K)
 C_{pd} = 1,858 + 10⁻⁵ (110 + 0,03 θ²) kJ/(kg·K)
 R_d = 461,5 J/kg·K
 R_l = 0,622
 C_w = 4,186 kJ/(kg·K)

Centraal Technisch Instituut TNO
 MOLLIER-DIAGRAM (h,x-diagram)
 voor lucht-waterdampmengsels bij
 een druk P van 101,325 kN/m²
 26-4-73
 R.v.d.H.