

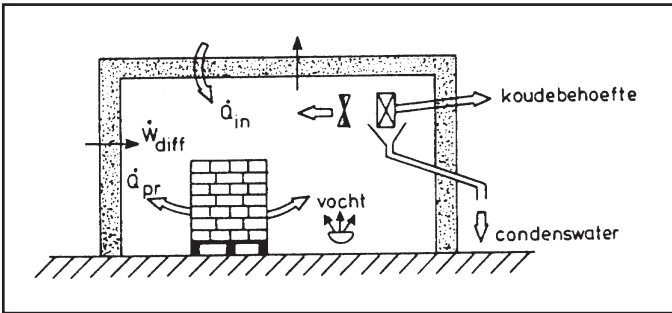
Bruto momenteel koelvermogen van een gekoelde ruimte

De norm NEN 1876 definieert diverse koelvermogens. Tabel 1 somt 7 definities op waarbij gelet moet worden op de trefwoorden koudemEDIUM versus luchtkoeler, gemiddeld versus momenteel (momentaan). Capaciteitsopgaven van luchtkoelers door fabrikanten worden meestal opgegeven als het bruto momenteel koelvermogen.

Tabel 1

Definities van koelvermogens	
\dot{Q}_{om}	Bruto gemiddeld koelvermogen: de gemiddelde warmtestroom die door het koudemEDIUM in de luchtkoeler wordt opgenomen gedurende een bepaalde tijd.
\dot{Q}_o	Bruto momenteel koelvermogen: de warmtestroom die door het koudemEDIUM in de luchtkoeler wordt opgenomen op een bepaald tijdstip.
\dot{Q}_{oo}	Nominaal koelvermogen: het bruto momentele koelvermogen op het tijdstip dat een half uur na het begin van de koelperiode ligt.
\dot{Q}_{nm}	Netto gemiddeld koelvermogen: de gemiddelde warmtestroom die de luchtkoeler gedurende een bepaalde tijd opneemt uit de lucht in de gekoelde ruimte.
\dot{Q}_n	Netto momenteel koelvermogen: de warmtestroom die de luchtkoeler op een willekeurig tijdstip opneemt uit de lucht in de gekoelde ruimte.
\dot{Q}_{o^*}	Droog koelvermogen: het bruto momentele koelvermogen zonder rijp- of condensvorming.
\dot{Q}_e	Effectief koelvermogen: het netto gemiddeld koelvermogen gedurende de koelcyclus inclusief het effect van de schadelijke ontdooiwarmte.

Het bruto momenteel koelvermogen is af te leiden uit een enthalpiebalans over de vochtige lucht in de gekoelde ruimte. Deze methode wordt gebruikt in de 'Leergang ontwerpen van koelinstallaties', uitgegeven door uitgeverij P. C. Noordervliet, Zeist, en wordt gedeceerd in de post-HBO opleiding 'Koudetechniek' georganiseerd door de Hogeschool



*Figuur 1
Model van een
gekoelde ruimte*

's-Hertogenbosch. Dit is de reden waarom hier het koelvermogen wordt berekend uit een enthalpiebalans over de vochtige lucht in de gekoelde ruimte.

De enthalpiebalans is, in de stationaire toestand en als geen productie van enthalpie in de lucht plaats vindt, stroom in = stroom uit. Het koelvermogen is een van de stromen uit (tabel 2) en is berekenbaar als alle andere stromen berekend of geschat kunnen worden:

$$\text{Koelvermogen} = \text{Stroom in} - \text{Rijp en/of condensvorming} - \text{Ventilatie uit.}$$

Tabel 2

Naam van stromen betrokken bij de berekening van het koelvermogen	
Stroom in	Stroom uit
Instraling Warmteproductie Ventilatorarbeid Ventilatie in Bevochtigers Verwarmers Vochtafgifte Vochtdiffusie Afkoeling	Koelvermogen Rijpvorming Condensvorming Ventilatie uit

Een korte omschrijving van de 'stromen in' en 'stromen uit' bij een gekoelde ruimte staat in tabel 3. Per stroom wordt een enthalpie-vergelijking gegeven in tabel 4. De enthalpie-vergelijkingen gelden voor de stationaire toestand. Ook de veldwarmte wordt beschouwd als een stationaire stroom, alhoewel tijdens het inkoelproces de veldwarmte nogal veranderlijk is.

Tabel 3

Korte omschrijving van de termen in de enthalpiebalans	
Naam	Omschrijving
Stromen in	
<i>Instraling</i>	Warmtestroom door wand, plafond en vloer als gevolg van een temperatuurverschil tussen omgeving en cellucht.
<i>Warmteproductie</i>	Bederfelijke producten, zoals verse onbehandelde tuin- en akkerbouwproducten en sommige chemicaliën, produceren warmte.
<i>Ventilatorarbeid</i>	De aan een ventilator toegevoerde energie komt in de vorm van warmte vrij in de cellucht.
<i>Ventilatie in</i>	Warme vochtige omgevingslucht kan de koelcel instromen en neemt enthalpie (warmte en vocht) mee.
<i>Bevochtiger</i>	Dit apparaat brengt vocht als waterdamp of water in de cellucht.
<i>Verwarmer</i>	Voorbeelden van verwarmers zijn: lichtbronnen, heaters, vloerverwarming en deurverwarming.
<i>Vochtafgifte</i>	Producten die water bevatten geven vocht af als de verpakking doorlaatbaar is. Het waterdampdrukdeficit is de drijvende kracht voor de berekening van deze stroom.
<i>Vochtdiffusie</i>	Vocht diffundeert door de wanden van de gekoelde ruimte als gevolg van een waterdampdrukverschil tussen omgeving en cellucht.
<i>Afkoeling</i>	Warm ingebrachte producten koelen af, als de stapelwijze dat toelaat, naar de temperatuur van de cellucht. De term <i>veldwarmte</i> – tuinbouwproducten nemen hun warmte mee van het veld naar de koelcel – wordt ook vaak gebruikt.
Stromen uit	
<i>Koelvermogen</i>	De warmtehoeveelheid die door het koudemedium dat door de koeler stroomt wordt opgenomen. De warmtecapaciteit van de koeler wordt meestal verwaarloosd in de stationaire toestand.
<i>Rijpvorming</i>	De temperatuur van het oppervlak van de koeler is lager dan die van de cellucht. Als de temperatuur aan het oppervlak veel lager is dan 0 °C zal waterdamp als rijp op de koeler neerslaan. Rijp blijft hechten aan het oppervlak totdat een ontdooicyclus volgt.
<i>Condensvorming</i>	Indien de temperatuur van het oppervlak van de koeler boven 0 °C is, slaat waterdamp uit de cellucht neer op de koeler in de vorm van condens. Condens loopt van de koeler af.
<i>Ventilatie uit</i>	Cellucht stroomt de gekoelde ruimte uit als er ook ventilatie in is.

Tabel 4

Vergelijkingen die de stromen in en uit beschrijven	
	Enthalpie
Stroom in	
instraling	$\dot{Q}_{in} = k \cdot A \cdot (T_u - T_i)$
warmteproductie product	$\dot{Q}_{pr} = m_{pr} \cdot q_{pr}$
ventilatorarbeid	\dot{Q}_{circ}
ventilatie in	$\dot{Q}_{vent.in} = \dot{m}_{vent} \cdot h_u$
bevochtigers $\left\{ \begin{array}{l} \text{damp} \\ \text{water} \end{array} \right.$	$\dot{Q}_{bev.damp} = (c_d \cdot T_d + r) \dot{W}_{bev}$
verwarmers	$\dot{Q}_{bev.water} = c_w \cdot T_w \cdot \dot{W}_{bev}$
vochtafgifte product $\left\{ \begin{array}{l} T > 0^\circ\text{C} \\ T < 0^\circ\text{C} \end{array} \right.$	$\dot{Q}_{vocht.pr} = c_w \cdot T_{pr} \cdot \dot{W}_{pr}$
vochtdiffusie door wanden	$\dot{Q}_{vocht.pr} = (c_{ijs} \cdot T_{pr} - r_o) \dot{W}_{pr}$
afkoeling	$\dot{Q}_{diff} = (c_d \cdot T_u + r) \dot{W}_{pr}$
	$\dot{Q}_{veld} = (m \cdot c)_{pr} \left(- \frac{dT_{pr}}{dt} \right)$
Stroom uit	
rijpvorming	$\dot{Q}_{rijp} = (c_{ijs} \cdot T_{opp} - r_o) \dot{W}_{rijp}$
condensvorming	$\dot{Q}_{condens} = c_w \cdot T_{opp} \cdot \dot{W}_{condens}$
ventilatie uit	$\dot{Q}_{vent.uit} = \dot{m}_{vent} \cdot h_i$
koelvermogen	\dot{Q}_o

Uit tabel 4 blijkt dat ook een waterbalans opgesteld moet worden om de hoeveelheid rijp of condens die op de koeler neerslaat, te berekenen. Het gaat om de factoren rijp-/condensvorming. De waterbalans over de vochtige lucht in de gekoelde ruimte is in woorden:

stroom in	stroom uit
bevochtigers vochtafgifte diffusie ventilatie in	ventilatie uit rijpvorming condensvorming

Uitgedrukt in symbolen wordt de waterbalans

$$\dot{W}_{bev} + \dot{W}_{pr} + \dot{W}_{diff} + \dot{W}_{vent.in} = \dot{W}_{vent.uit} + \dot{W}_{rijp/condens}$$

De hoeveelheid rijp of condens die per tijd op de koeler neerslaat is dus:

$$\dot{W}_{rijp/condens} = \dot{W}_{bev} + \dot{W}_{pr} + \dot{W}_{diff} + \dot{W}_{vent(in-uit)}$$

In tabel 5 zijn de gebruikelijke vergelijkingen opgenomen, waarmee de vochtstromen berekend worden. Ontvochtigers komen niet vaak voor in een gekoelde ruimte.

Tabel 5

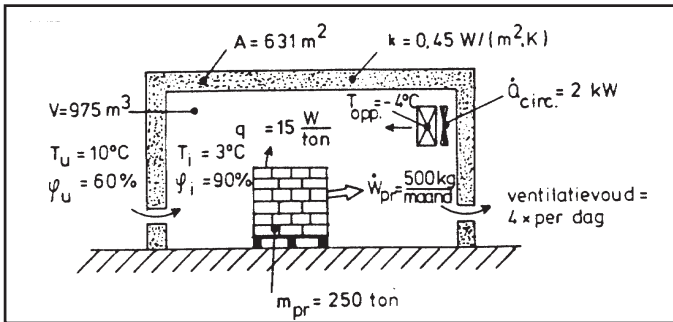
Vergelijkingen van vochtstromen in en uit	
	vocht
<p>Stroom in</p> <p>bevochtigers $\left\{ \begin{array}{l} \text{damp} \\ \text{water} \end{array} \right.$</p> <p>vochtafgifte</p> <p>vochtdiffusie</p> <p>ventilatie in</p> <p>Stroom uit</p>	\dot{W}_{bev} \dot{W}_{bev} $\dot{W}_{pr} = m_{pr} \cdot \dot{m}_{spec} \cdot \Delta P$ $\dot{W}_{diff} = k_{diff} \cdot A \cdot (P_u - P_i)$ $\dot{W}_{vent.in} = \dot{m}_{vent} \cdot x_u$
<p>rijpvorming</p> <p>condens</p> <p>ventilatie uit</p>	\dot{W}_{rijp} $\dot{W}_{condens}$ $\dot{W}_{vent.uit} = \dot{m}_{vent} \cdot x_i$

→

Voorbeeldberekeningen

Voorbeeld 1

Bereken het koelvermogen van een koelcel voor appels tijdens de bewaarperiode (dus niet tijdens de afkoelperiode). De gegevens zijn in figuur 2 vermeld.



Figuur 2 – Een appelkoelcel

Enthalpiestromen in:

$$\dot{Q}_{in} = k \cdot A \cdot (T_u - T_i) = 0,45 \times 631 \times 7 = 1,988 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{pr} = m_{pr} \cdot q_{pr} = 250 \times 15 = 3,750 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{circ} = 2,000 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{vent.in} = \dot{m}_{vent} \cdot h_u = \frac{4 \times 975 \times 22 \times 1,24}{3600 \times 24} = 1,231 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{vocht} = c_w \cdot t_{pr} \cdot \dot{W}_{pr} = 4,19 \times 3 \times \frac{500}{30 \times 24 \times 3600} = 0,002 \text{ kW}$$

$$\text{som stromen in} = 8,971 \text{ kW}$$

Enthalpiestromen uit:

$$\dot{W}_{vent(in-uit)} = \dot{m}_{vent} \cdot \Delta x = 0,0559 \times 0,0002 = 0,073 \times 10^{-4} \text{ kg/s (uit=in)}$$

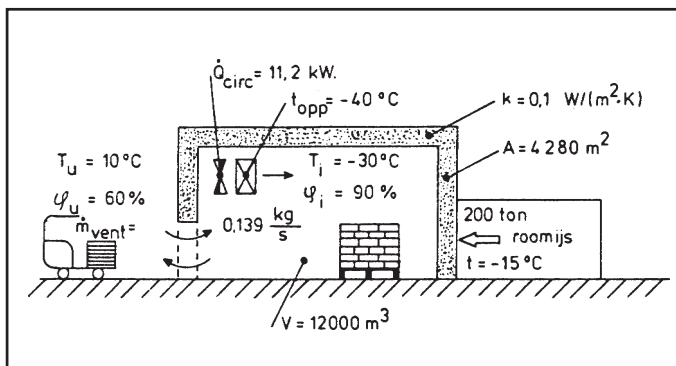
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{vocht} &= (c_{ijs} \cdot T_{opp} - r_o) (\dot{W}_{pr} + \dot{W}_{vent})_{(in=uit)} = \\ &= (2,1 \cdot -4 - 335) (1,929 \times 10^{-4} + 0,073 \times 10^{-4}) = -0,0687 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{vent.uit} = \dot{m}_{vent} \cdot h_i = \frac{4 \times 975 \times 14 \times 1,24}{3600 \times 24} = 0,784 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_0 &= \Sigma \cdot Q(in) - \dot{Q}_{vocht} - \dot{Q}_{vent.uit} = \\ &= 8,971 + 0,0687 - 0,784 = 8,26 \text{ kW} \end{aligned}$$

Voorbeeld 2

Bereken het koelvermogen van een vriescel behorende bij een roomijsfabriek (zie fig. 3)



Figuur 3 – Een vriescel voor roomijs

Per dag wordt 200 ton roomijs, met een temperatuur van -15°C , in de fabriek geproduceerd en opgeslagen in een vriescel waarvan de temperatuur van de lucht -30°C bedraagt. Tevens wordt per dag 200 ton roomijs (van -30°C) met vorkhefwagens uit de vriescel gereiden, waardoor de deur 1 uur per dag open staat. Er stroomt gemiddeld $0,139\text{ kg/s}$ droge lucht door de deur van buiten naar binnen en natuurlijk ook in tegengestelde richting.

Oplossing:**Enthalpie stromen in:**

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} &= 0,1 \times 4280 \times [10 - (-30)] &&= 17,1 \text{ kW} \\ \dot{Q}_{circ} &= &&= 11,2 \text{ kW} \\ \dot{Q}_{vent} &= 0,139 \times 22 &&= 3,1 \text{ kW} \\ \dot{Q}_{afkoeling} &= \frac{200000 \times 2,11 \times 15}{24 \times 3600} &&= 73,3 \text{ kW} \\ &&& \underline{\hspace{1.5cm}} \\ &&& 104,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

Enthalpie stromen uit

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{vent} &= 0,139 \times (-25) &&= -3,5 \text{ kW} \\ \dot{Q}_{ijs} &= (2,1 \times -40 - 335) 5,56 \times 10^{-4} &&= -0,23 \text{ kW} \end{aligned}$$

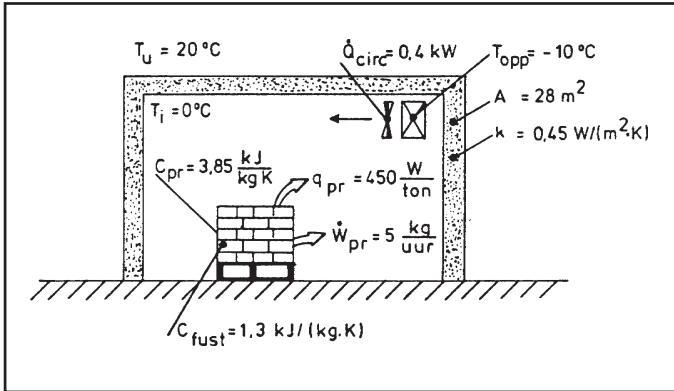
Koelvermogen

$$\dot{Q}_o = 104,7 - (-0,23) - (-3,5) = 108,4 \text{ kW}$$

$$\text{N.B.: } \dot{W}_{ijs} = \dot{m}_{vent} \cdot \Delta x = 0,139 \times (0,0045 - 0,0005)$$

Voorbeeld 3

Bereken het koelvermogen in een kleine champignon-inkoelcel, waarin 100 kg champignons van 20°C (+ 25 kg fust) in 1 uur wordt afgekoeld tot 3°C (zie figuur 4)



Figuur 4 – Een inkoelcel voor champignons

Enthalpie stromen in

$$\dot{Q}_{in} = 0,45 \times 28 \times 20 = 0,25 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{pr} = 0,1 \times 0,45 = 0,045 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{circ} = 0,4 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{veld.pr} = \frac{100 \times 3,85 \times 17}{3600} = 1,32 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{veld.fust} = \frac{25 \times 1,3 \times 17}{3600} = 0,15 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{vocht.pr} = 4,19 \times 12 \times 1,39 \times 10^{-3} = 0,069 \text{ kW}$$

$$\hline +$$

$$2,734 \text{ kW}$$

Enthalpie stromen uit

$$\dot{Q}_{ijs} = (2,1 \times -10 - 335) 1,39 \times 10^{-3} = -0,495 \text{ kW}$$

Koelvermogen

$$\dot{Q}_0 = 2,734 + 0,495 = 3,23 \text{ kW}$$

Symbolen en eenheden

A	m^2	oppervlak
c	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	soortelijke warmte
h	kJ/kg	enthalpie
k	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	warmtedoorgangscoefficiënt
m	kg	massa
\dot{m}	kg/s	massastroom
\dot{m}_{spec}	$\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s})$	specifieke vochtafgifte
P	Pa	dampdruk
q_{pr}	W/kg	warmteproductie
Q_{ds}	kJ	schadelijke ontdooiwarmte
\dot{Q}	kW	warmtestroom
r	kJ/kg	verdampingswarmte
r_o	kJ/kg	smeltwarmte
t	s	tijd
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatuur
V	m^3	volume
\dot{W}	kg/s	vochtstroom
x	kg/kg	absolute vochtigheid

