

# Circulatievoud

## Inleiding

De temperatuurspreiding in een gekoelde ruimte wordt in belangrijke mate bepaald door het circulatievoud van de lucht. Circulatievoud (in 1/uur) is de verhouding tussen het luchtdebiet van de koelers (in  $\text{m}^3/\text{uur}$ ) en het lege volume (in  $\text{m}^3$ ) van de gekoelde ruimte. De uitgeblazen koelerlucht verdeelt zich over drie luchtwegen. De eerste luchtweg keert via de kortste route terug naar de inlaat van de koeler. Deze ongewenste kortsluitstroming is te bestrijden door afsluitingen rondom de koelers en valse, c.q. beweegbare plafonds. De tweede luchtweg gaat door de stapeling in de gekoelde ruimte en wisselt daarbij warmte en vocht uit. De warmteproductie en de vochtafgifte van de producten in de stapeling veroorzaken een berekenbare temperatuurdaling of -stijging. De derde luchtweg stroomt langs de wanden, plafond en vloer en wisselt voornamelijk warmte en soms ook vocht uit.

De berekening gaat uit van het fysiologisch circulatievoud waarbij warmteproductie, vochtafgifte, stapeldichtheid en toelaatbaar temperatuurverschil invoergegevens zijn. Het praktisch circulatievoud is groter dan het fysiologisch circulatievoud als gevolg van de temperatuurregeling en de luchtverdeling. In deze berekening is hiervoor een eenvoudige factor gebruikt. Bij container transport zijn uitgebreidere rekenmethoden mogelijk.

## Fysiologisch circulatievoud

Het circulatievoud in een gekoelde ruimte met geringe kortsluitstroming en goede isolatie, hangt af van de warmteproductie van de opgeslagen producten en de afmeting van de stapeleenheid. Voor de netto stapeldichtheid  $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ , een relatieve vochtigheid van 97 % en een lage specifieke vochtafgifte van de producten ( $< 0.5^{10} \text{ kg}/(\text{kg}.\text{Pa}.\text{s})$ ) is in tabel 1 en tabel 2 het fysiologisch circulatievoud gegeven voor een temperatuurspreiding van 1 respectievelijk 2 K. De temperatuurspreiding van 1 K is te gebruiken bij langdurig (vele maanden) te bewaren producten (appel, peer, kool, wortelen). Voor actieve, kort bewaarbare producten, is een temperatuurspreiding van 2 K praktisch aanvaardbaar.

Het circulatievoud is praktisch recht evenredig met de stapeldichtheid. Bij dichtheid  $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ , warmteproductie  $10 \text{ W}/\text{ton}$  en afstand  $0,4 \text{ m}$  is het circulatievoud  $10,6 \text{ 1}/\text{uur}$ . Het circulatievoud is omgekeerd evenredig met de temperatuurspreiding bij doorstroombewaring.

## Praktisch circulatievoud

Uit onderzoek is gebleken dat de kortsluitstroming gemiddeld 25 % is van het luchtdebiet. Aangenomen wordt dat 8 % van het luchtdebiet langs de wanden stroomt, zodat 33 % van de lucht niet door de lading stroomt. Daarnaast is de temperatuurregeling van de gekoelde ruimte verantwoordelijk voor regelmatige temperatuurfluctuaties van  $0,25 \text{ K}$  tot  $2 \text{ K}$ .

**Tabel 1**

<b>Fysiologisch circulatievoud</b> (1/uur) als functie van de warmteproductie van het product en afstand tussen de circulatiekanalen in de stapeling. De temperatuurspreiding in de stapeling is 1 K. De netto stapeldichtheid is 300 kg/m <sup>3</sup> . Het praktisch circulatievoud is 1,5 × groter.				
Warmteproductie W/ton	Afstand tussen circulatiekanalen in m			
	0,8	0,6 langsstroom	0,4	0,2-0 doorstroom
5	3,0	2,5	2,2	2,1
10	9,0	6,0	5,3	4,4
15	22	13	10,0	7,0
20	180	24	16	10,0
25		50	23	13
30		150	32	17
35			44	22
40			61	25
45			85	28
50			126	32
75				52

Dit effect vraagt om een hoger circulatievoud. Het praktisch circulatievoud is daarom minstens 1,5× het fysiologisch circulatievoud voor de constante temperatuurperiode van de bewaring.

### **Toelichting op de gebruikte termen**

#### **Temperatuurspreiding**

Fysiologisch actieve producten worden bewaard in pallets of kisten of in bulk. De eerst genoemde bewaarmethode heet langsstroombewaring, de tweede doorstroombewaring. De temperatuurspreiding is het verschil tussen maximum en minimum temperatuur van het product. De plek van de maximum temperatuur bij langsstroombewaring is iets boven het centrum in een pallet of kistenstapeling. De plek van de maximum temperatuur bij doorstroombewaring is circa 30 cm voor het vlak waar de circulatielucht de stapeling verlaat. De minimum temperatuur bij doorstroombewaring is de temperatuur van de lucht die uit de koeler stroomt. Die voor doorstroombewaring is variabel en afhankelijk van de plaatselijke effectieve warmteproductie. Meestal is de laagste temperatuur enkele decimeters na het vlak van de instroming.

#### **Warmteproductie.**

Fysiologisch actieve producten verbruiken zuurstof en produceren kooldioxide. Deze levensprocessen gaan gepaard met warmteproductie. De fysiologische warmteproductie is

Tabel 2

**Fysiologisch circulatievoud** (1/uur) als functie van de warmteproductie van het product en afstand tussen de circulatiekanalen in de stapeling. De temperatuurspreiding in de stapeling is 2 K. De netto stapeldichtheid is 300 kg/m<sup>3</sup>. Het praktisch circulatievoud is 1,5 × groter.

Warmteproductie W/ton	Afstand tussen circulatiekanalen in m			
	0,8	0,6 langsstroom	0,4	0,2-0 doorstroom
5	1,2	1,2	1,2	1,1
10	2,9	2,6	2,5	2,3
15	5,3	4,6	4,2	3,5
20	9,3	7,1	6,1	4,8
25	17	11	8,5	6,3
30	36	16	12	7,8
35	155	22	15	9,5
40		32	18	12
45		48	22	13
50		78	26	15
75			62	25
100			175	35
125				45
150				55
200				75

gerelateerd aan de voedingsstof die verbrand wordt in het product. Dit zijn meestal koolhydraten. De vochtafgifte van de producten heeft het effect van een negatieve warmteproductie. De effectieve warmteproductie is dus gelijk aan de fysiologische warmteproductie verminderd met de latente verdampingswarmte.

### Stapeldichtheid

De hoeveelheid product die per m<sup>3</sup> kan worden opgeslagen hangt af van de soort product en van de verpakking die ervoor gebruikt wordt. In tabel 3 zijn de netto stapeldichtheden (massa product / volume) van een aantal producten opgenomen. De bruto stapeldichtheden (massa product + fust / volume) zijn van belang voor de bepaling van de vloerbelasting, maar niet voor de berekening van het circulatievoud.

### Onderzoek en circulatievoud

Het optimale circulatievoud tijdens de bewaarperiode voor appels en peren werd in 1981 vastgesteld op 15 tot 20 1/uur. Geïnstalleerd werd ca. 50 1/uur om tijdens de inkoopperiode voldoende koelcapaciteit te hebben, en een goede warmteoverdracht tussen fruit en lucht te verzekeren, zodat de afkoeltijd 4 tot 5 dagen duurt.

Tijdens de bewaarperiode is het niet nodig de volledig geïnstalleerde ventilatoropbrengst

**Tabel 3**

**Fysiologische warmteproductie** in W/ton voor de berekening van het circulatievoud. In de tabel staat de minimum warmteproductie. De warmteproductie varieert afhankelijk van het ras, herkomst en bemesting. De maximum warmteproductie is vaak 2x de minimum waarde. Voor de berekening van het momentaan koelvermogen is het verstandiger om de gemiddelde of maximale warmteproductie te gebruiken.

Product	Temperatuur in °C					Product	Temperatuur in °C			
	0	2	5	10			0	2	5	10
Aardappel	11	11	12			Komkommer	19	19	24	51
Aardbei	34	40	44			Kool, rode- zomer	23	31	46	
Abrikoos	15	19	33			Kool, rode- bewaar	15	15	22	
Ananas	-	-	40	65		Kool, witte	15	17	22	
Andijvie	107	133	184			Koolraap	15	15	19	
Appel, zomer	11	14	15			Koolrabi, geen blad	23	31	34	
Appel, bewaar	5,5	11	14			Kruisbes	14	19	24	
Asperge	58	69	77			Meloen	14	17	22	41
Banaan, groen	-	-	22			Noot	2,4	2,4	4,8	9,6
Banaan, rijp	-	-	40			Paprika	24	31	56	85
Bes, rood	14	17	24			Peer, zomer	7,7	13	22	
Bes, zwart	20	32	44			Peer, bewaar	7,7	11	17	
Biet (Kroot)	12	15	31			Perzik	13	17	25	
Bleekselderij	19	25	46			Prei, winter	35	58	128	
Bloemkool	24	35	54			Pruim	11	18	29	
Boerenkool	25	34	41			Pruim, geel	18	21	36	
Boon	57	77	104			Rabarber	34	39	46	
Boon, gedroogd	19	35	56			Radijs, geen blad	18	18	20	
Braam	46	58	85			Radijs, met blad	56	63	80	
Broccoli	200	220	250			Savoieikool	46	58	75	
Champignon	114	123	148			Sla	31	34	41	
Citroen, geel	5,8	7,3	11			Sinaasappel	4,8	6,3	11	21
Druif	4,8	12	16			Spinazie	61	77	128	
Erwt, vers	87	116	155			Spruitjes	48	56	96	
Erwt, gedopt	75	250	416			Tomaat, rijpend	14	16	19	
Framboos	47	53	82			Tuinboon	19	35	56	
Grapefruit	4,8	7,3	11	18		Ui, droog	12	13	15	
Kers, zoet	15	17	28			Ui, groen	28	30	46	
Kers, zuur	15	19	31			Witlofwortel	90	90	100	
Knolselderij	15	19	31			Wortel met loof	51	58	62	
						Wortel zonder loof	9,7	22	28	

Tabel 4

<b>Stapeldichtheid</b> van enkele producten in $\text{kg}/\text{m}^3$ in stapelkisten of gestort. <i>De stapeldichtheid is netto, dus alleen massa product per volume.</i>					
Product	Kist	Gestort	Product	Kist	Gestort
Aardappel	425	650	Peer	400	600
Andijvie	120	200	Prei	250	400
Appel	320	500	Sla	120	200
Augurk	375	560	Spinazie	120	200
Biet	400	600	Tomaat	350	500
Bloemkool	250	380	Spruitjes	280	420
Boon	250	400	Ui	375	550
Knolselderij	300	450	Wortel	375	500
Komkommer	300	450	Witlofwortel	250	400
Kool, sluit-	300	450			

te benutten. Door ventilatoren uit te schakelen of op toeren te regelen, tot het optimale circulatievoud, kon 40 % bespaard worden aan energieverbruik tijdens de bewaarperiode (zie tabel 5).

In het kader van energiebesparing is geëxperimenteerd met toerenregeling van ventilatoren door middel van frequentieregeling. Het circulatievoud werd lager bij een lagere frequentie (zie tabel 6). Het circulatievoud voor een koelerblok met 6 ventilatoren (maximum  $42000 \text{ m}^3/\text{uur}$ ) die, naar wens, vol of half-toeren draaien in een fruitcel van  $800 \text{ m}^3$ , heeft een logische relatie met het circulatievoud.

De circulerende lucht in een gekoelde ruimte verdeelt zich nooit homogeen over die ruimte. Dit wordt veroorzaakt door de stapelwijze, de plaatsing van de koelers, enz. Het plaatselijk circulatievoud in de lading is gemeten bij enkele gekoelde ruimten (zie tabel 7). Onder de koelers heerst het hoogste plaatselijke circulatievoud.

De lucht die uit de koeler stroomt verdeelt zich over drie luchtwegen. Tabel 8 toont het

Tabel 5

<b>Circulatievoud en energieverbruik</b>		
Koelcel	Circulatievoud 1/uur	Energie kWh/(ton.week)
Sluitkool A	10	2,0
Sluitkool B	20	2,2
Sluitkool C	40	4,0

Tabel 6

<b>Invloed netfrequentie of toerental op het circulatievoud</b>	
<b>Frequentie</b> Hertz	<b>Circulatievoud</b> 1/uur
appelcel 50 30	47 25
perencel 6× vol 4× vol + 2× half 2× vol + 4× half 6× half 4× half 2× half	35 27 24 17 14 13

resultaat van metingen. De kortsluitstroming kan zeer aanzienlijk zijn. Als gevolg van een verschil in snelheid van de lucht die stroomt door kanalen in de stapeling, ontstaan drukverschillen over kisten en pallets (fust). Daardoor treedt circa 5 % van de lucht die door de stapeling stroomt, in contact met de producten in het fust. Het totaal van het percentage hoeft niet 100 % te zijn. Een krachtige worp zuigt lucht aan uit de stapeling waardoor de rondwentelende lucht meer dan 100 % kan zijn.

Tabel 7

<b>Plaatselijk circulatievoud in een koelcel</b>			
<i>De koelers hangen aan het plafond en blazen de lucht uit over de lading naar de andere kant van de koelcel. Bij voldoende worp buigt de lucht daar de stapeling in en stroomt door de stapeling terug naar de aanzuigruimte onder de koeler.</i>			
<i>Voor = onder de koeler, achter = aan einde worp.</i>			
<b>Gekoelde ruimte</b>	<b>Plaatselijk circulatievoud</b>		
	voor	midden	achter
Appelcel, 50 Hertz	47	35	30
Appelcel, 30 Hertz	25	19	13
Appel 70 cm tussen plafond en stapeling	72	43	15
Appel 160 cm tussen plafond en stapeling	18	9	0

Tabel 8

<b>Verdeling van de circulatielucht in % van het luchtdebiet van de koelers over de gekoelde ruimte.</b>				
<b>Koelcel</b>	<b>Lading</b>	<b>Wanden</b>	<b>Kortsluit</b>	<b>Aanzuig</b>
150 ton appel peren, 160 cm tussen lading en plafond peren, in midden geen lading appel	70	10	20	
	39		61	
	13	26	61	
	67		38	29

**Model berekening circulatievoud**

Naam product .....			
.....	°C	Temperatuur bewaring	
.....	W/ton	Fysiologische warmteproductie	Tabel 3
.....	m	Afstand tussen circulatiekanalen	
.....	a 1/uur	Fysiologisch circulatievoud	Tabel 1 of 2
.....	b K	Temperatuurspreiding volgens	Tabel 1 of 2
.....	c kg/m <sup>3</sup>	Netto stapeldichtheid	Tabel 4
.....	d K	Gekozen temperatuurspreiding, gelijk of dicht bij b	
$\frac{a \times 1,5 \times b \times c}{300 \times d} =$	e 1/uur	Praktisch circulatievoud.	
.....	f m <sup>3</sup>	Volume van gekoelde ruimte	
e × f = .....	m <sup>3</sup> /uur	Circulatiedebiet	

