

ETNIE 1 - NUMMER DE KANTEN	1	2A	2B	2C	2D	3	4	4A	5	6A	6B	6C
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2A	X	X					X			X		
2B	X	X					X			X		
2C	X	X					X			X		
2D	X	X					X			X		
3	X	X	X	X	X					X		
4	X	X										
4A	X	X										
5	X	X	X	X	X		X					
6A	X	X										
6B	X	X										
6C	X	X										

#### Bijlage 2a

Teneinde gevaarlijke reacties tussen verschillende gevaarlijke stoffen te voorkomen, zijn er verboden tot samenlading van kolli in één voertuig of laadkist (container).

De toepassing van deze verboden geschiedt aan de hand van de gevaarsetiketten die op de kolli moeten zijn aangebracht.

## Hoofdstuk 4 Grondslagen van het conditioneren in de transportketen

H. F. Th. Meffert \*

### 4.1 Inleiding

Conditioneren is een samenvattend begrip voor het beheersen van de klimaatfactoren temperatuur en gassamenstelling: concentratie van waterdamp, zuurstof, stikstof, koolzuurgas en ethyleen.

De temperatuur is veruit de belangrijkste klimaatfactor. De beheersing van de temperatuur en de waterdampconcentratie in een ruimte zijn aan elkaar gekoppeld via gelijktijdig verlopende warmte- en stoftransportprocessen op producten en conditioneringsniveau.

De overige klimaatfactoren kunnen meer of minder onafhankelijk van elkaar worden beheerst door aparte maatregelen: ventilatie (= luchtverversing) of uitwassen (scrubben) door fysische of chemische processen.

Zuurstof en koolzuurgas zijn van belang voor alle levende producten. De aanwezigheid van zuurstof is een voorwaarde voor levensprocessen in de vorm van een stofwisseling, die zich manifesteert in de productie van warmte, koolzuurgas en andere stofwisselingsproducten zoals ethyleen.

Activiteit in de vorm van warmteproductie vertonen ook sommige klassen van gevaarlijke stoffen bijv. organische peroxyden, die ook bij beheerste temperatuur vervoerd moeten worden.

\* Dipl. ing. H. F. Th. Meffert, Sprenger Instituut, Wageningen.

### DIMENSIONAL TOLERANCES

#### I Bulge Categories

category	packages/ layer	total bulge allowance (mm)		usage
		length	width	
A	6	0	0	Nominal dimensions of base.
	8	0	0	For heavy wooden crates (e.g. lug boxes, heavy plastic crates.
	12	0	0	Polystyrene boxes up to 15 litre capacity.
B	6	10	15	Other wooden boxes. Other plastic crates. Polystyrene boxes up to 30 litre capacity.
	8	5	10	Telescopic cartons with waxed inners. Other telescopic cartons up to 24 litre capacity.
	12	5	10	One piece waxed carton up to 24 litre capacity.
C	6	20	30	Polystyrene boxes 30 litre and over. Telescopic cartons 24 litre and over. One piece waxed cartons 24 litre and over. One piece cartons up to 36 litre cartons.
	8	15	25	
	12	10	20	
D	6	30	45	All other cartons.
	8	25	40	
	12	20	30	

Carton design should be regarded as inadequate, either in style, board specification or make up of bulging under normal handling exceeds Category D.

#### II Wall Thickness

For packages having similar thickness on sides and ends.

Total Allowance (mm)	usage
10	Single wall (one piece) cartons in A or C flute, or duoarch C flute.
15	Single wall cartons in duoarch A flute.
20	Telescoping cartons (two piece, and including cap lids) in B outer/A inner.
25	Telescoping cartons C outer/ A or C inner.

#### III Stack Allowance

Total Allowance (mm)	Packages per Layer	Usage
5	6	2 packages lengthwise on pallet.
10	8	1 package lengthwise + 2 across the pallet.
15	6	3 packages across the pallet.
15	12	4 packages across the pallet and 3 packages lengthwise on pallet.

Nominal allowance is 5 mm between each row of packages.

AUF 1980

Bijlage 3

De broneigenschappen van de lading, zoals de productie van warmte, waterdamp, koolzuurgas en ethyleen zijn belangrijke informaties voor de beoordeling van de geschiktheid van voertuigen voor geconditioneerd vervoer.

De temperatuur in de laadruimte wordt bepaald door de balans van koelvermogen en warmtebelasting door lading en omgeving, waarbij luchtcirculatie en luchtverdeling een belangrijke rol spelen.

De waterdampconcentratie wordt bepaald door een evenwicht tussen koelinstallatie en lading. Voor de koelinstallatie zijn bepalend het oppervlak van de koudebron en het temperatuurverschil tussen lucht en koudebron.

Voor de lading is het de specifieke vochtgiftige en de beschermingsgraad beïnvloed door verpakking en luchtbeweging.

Ook de concentratie van gassen die betrokken zijn bij de stofwisselingsprocessen in het laadruim is gekenmerkt door een evenwicht tussen toevoer en afvoer. Voor het zuurstofverbruik: afvoer door de stofwisseling van het produkt en toevoer door ventilatie. Voor de stofwisselingsprodukten koolzuurgas en ethyleen: toevoer door het produkt, afhankelijk per produkt van temperatuur en hun eigen concentratie, afvoer door ventilatie en door chemisch omzetten dan wel fysisch binden aan absorptiematerialen (scrubben). Om werkzaam te zijn vereisen de laatstgenoemde werkwijzen een doeltreffende luchtcirculatie waardoor de aanvoer van de te behandelen atmosfeer en de afvoer van de behandelde atmosfeer wordt gewaarborgd, zodat de vereiste lage concentratie met een klein verschil kan worden gehandhaafd. De toegestane niveaus van temperatuur en concentraties van waterdamp, zuurstof en stofwisselingsprodukten in het laadruim zijn per produkt afhankelijk van de gestelde kwaliteitseisen en van de duur van het verblijf in het voertuig (zie hoofdstuk produkten).

### Conditioneermethoden

#### Temperatuur

Voor de temperatuurbeheersing staan uiteenlopende methoden ter beschikking met specifieke eigenschappen. Tabel 1 geeft hiervan een overzicht. Deze methoden worden in een ander hoofdstuk uitvoeriger behandeld.

In de meeste gevallen moet de warmtelast in het laadruim door middel van circulerende lucht naar een koudebron worden gebracht. Isolatie van de laadruimte beperkt de warmtestromen en de temperatuurspreiding.

Het handhaven van een constante temperatuur berust op een balans tussen warmtelast en beschikbaar koelvermogen. Licht de gewenste temperatuur ver van het evenwicht, dan moet dit door een regeling van de koude-afgifte via het in- en uitschakelen van de luchtstroming of van de koudeproductie zelf via een thermostaat kunstmatig worden ingesteld.

#### Luchtvochtigheid

De luchtvochtigheid wordt bepaald door het evenwicht tussen waterdamp toevoer aan de laadruimte door lading en inlek en waterdamponttrekking door condensatie aan koude oppervlakken en uitlek.

Geringe temperatuurverschillen tussen koude oppervlakken en lucht bevorderen hoge luchtvochtigheden. Hierdoor ontstaan karakteristieke verschillen tussen de koelmethoden.

### Samenstelling van de atmosfeer

De samenstelling van de atmosfeer in de laadruimte wordt bij niet levende produkten (zonder stofwisseling) bepaald door gastoevoer en lekkage. Bij produkten met stofwisseling levert ook de lading een bijdrage. Ongewenste gasconcentraties kunnen worden voorkomen door ventileren met buitenlucht of door scrubben in de laadruimte. Soms is de lucht lekkage al groot genoeg om nadelige concentraties van stofwisselingsprodukten te voorkomen. Het handhaven van gewenste gasconcentraties door toevoer vereist of grote hoeveelheden gas of maatregelen om de lekkage te verminderen.

### 4.2 Conditioneermethoden

In het vervolg zullen de belangrijkste conditioneerprincipes kort worden beschreven, gevolgd door een vereenvoudigde methode om uit de evenwichtstoestand de belangrijkste bedrijfsgegevens te bepalen. Tabel 1 geeft het overzicht.

#### 4.2.1 Beheersen van de temperatuur in het laadruim

De warmtehuishouding tijdens vervoer kan op verschillende manieren worden beïnvloed:

- koeling met buitenlucht;
- temperatuurverandering van voorgekoelde lading;
- toepassen van koelsystemen:
  - waterijs,
  - eutectische systemen,
  - koolzuurijs,
  - vloeibare gassen en
  - mechanische koeling

#### Koeling met buitenlucht

Temperatuurbeheersing door middel van buitenlucht is alleen mogelijk ter voorkoming van ladingtemperaturen hoger dan de buitentemperatuur en met zeer grote luchtverplaatsing door de laadruimte.

Natuurlijke bewegingen als gevolg van temperatuurverschillen is hiervoor doorgaans niet voldoende. De gedwongen luchtdrukverdeling rond het voertuig werkt niet bij stilstand en vereist zeer grote openingen. Dit laatste is ook van toepassing op geforceerde ventilatie door middel van ventilatoren.

Bij ontbreken van geleiding van de ventilatielucht door de lading kunnen belangrijke temperatuurverschillen optreden.

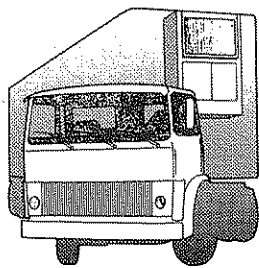
Zie de figuren 1 en 2.

**Tabel 1**  
Overzicht van koelmethoden voor vervoer

methode	min. temp. °C	spec. koelcap. kJ/kg.K	regelbaarheid <sup>1)</sup> luchtstr.	koelverm.	relatieve luchtvochtigheid	afhankelijkheid	gevaaren
— ventilatie	omgeving	1	—	—	omgeving	alleen tijdens rit	verontreiniging
— voorgekoelde lading	voorkoeltemp.	ca 4 (koel) ca 2 (vries)	—	—	hoog hoog	n.v.l. n.v.l.	passeren temp. grens passeren temp. grens
— niet mech. systeem		kJ/kg					
waterijs	0	334	+ <sup>2)</sup>	—	hoog	beijzingsstations	geen
eutectica bv NaCl	— 21,2	236	+ <sup>2)</sup>	—	hoog	oplaadstation en -tijd	corrosie en lekkage
MgCl <sub>2</sub>	— 36,6	246	+ <sup>2)</sup>	—	laag	oplaadstation en -tijd	corrosie en lekkage
koolzuurgas	— 78	636	+ <sup>2)</sup>	—	laag	CO <sub>2</sub> ijsfabrieken	bevrozing en verstikking
vloeibare gassen							
open systemen							
koolzuurgas	— 78,5	385	+ <sup>2)</sup>	+	laag	spec. tankstat.	bevrozing en verstikking
stikstof	—196	382	+ <sup>2)</sup>	+	laag	spec. tankstat.	bevrozing en verstikking
lucht	—183/196	381	+ <sup>2)</sup>	+	laag	spec. tankstat.	bevrozing en brandgevaar bij ontmenging
halfopen systemen							
ammoniak	— 33,6	1370	+ <sup>2)</sup>	+	matig	spec. tankstat.	indien niet in
LPG	— 42,6	426	+ <sup>2)</sup>	+	matig	spec. tankstat.	motor, dan
LNG	— 161	523	+ <sup>2)</sup>	+	laag	spec. tankstat.	separaat afbranden!
— mechanische systemen							
koudemiddel kringloop met compressor	systeem afh.	systeem afh.	+	+	matig tot hoog	motorbrandstof of elektrisch net	

<sup>1)</sup> + wel, — niet regelbaar

<sup>2)</sup> bij aanwezigheid van een ventilator voor de luchtcirculatie



# Leergang

## Transport onder beheerste temperatuur

**Curatorium:** H. F. Th. Meffert (vz.), Sprenger Instituut, Wageningen  
 P. C. Moerman (secr.), CIVO-Technologie TNO, Zeist  
 J. Bakker, NOB-Wegtransport, Rijswijk  
 J. H. Dijks, Stichting Vervoer en Havenopleidingen  
 W. M. Moret, EVO, Zoetermeer (tot en met 1983)  
 B. Kloosterman, Hoger Agrarisch Onderwijs, Utrecht (1984)

### Hoofdstuk 4 Grondslagen van het conditioneren in de transportketen (vervolg)

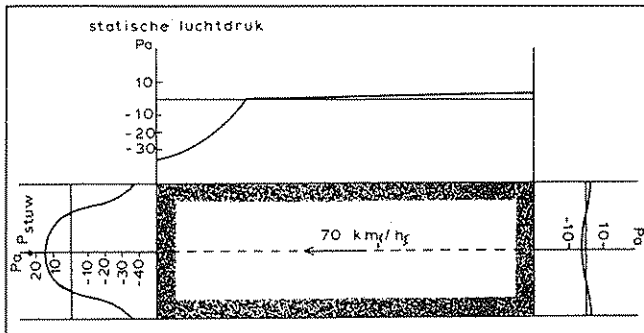


Fig. 1

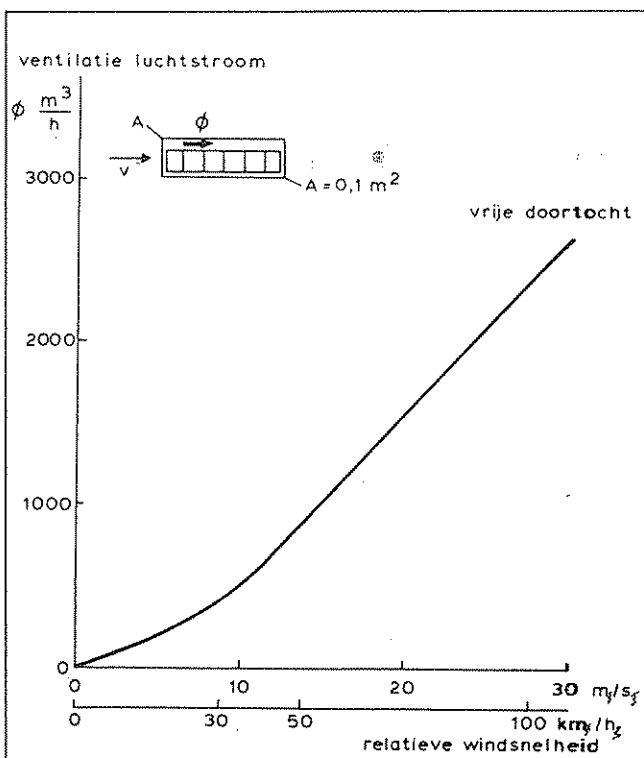


Fig. 2

#### Voorgekoelde lading

Onderkoeling van de lading en opwarming tot ontvangsttemperatuur is een methode voor tijdelijke temperatuurbeheersing die vooral voor vloeistoffen in geïsoleerde tanks tot bevredigende resultaten leidt. Melk en vruchtensappen kunnen op deze wijze over behoorlijke afstanden worden vervoerd, af te leggen binnen de tijd die door isolatie, buitentemperatuur en produkttemperatuur, alsmede de toegestane opwarming, is gegeven.

Voor stukgoed in geïsoleerde laadruimten moet tevens de temperatuurspreiding in rekening worden gebracht, waardoor de mogelijke verblijftijden in het voertuig verminderen.

Luchtlekkage is hierbij een storende factor, die de warmte-last vergroot.

#### Koelsystemen

Hieronder willen we verstaan speciale inrichtingen voor het opnemen van de warmte-last binnen de laadruimte. Deze systemen maken gebruik van zogenaamde koudemiddelen.

#### Niet mechanische systemen

##### Waterijs

De oudste koelmethode is het gebruik van waterijs, verdeeld in de lading. Hierdoor kan een maximaal afkoel-effect en een zeer gelijkmatige temperatuurverdeling worden verkregen. Aanvulling van de ijsvoorraad is echter niet mogelijk. De temperatuur in het laadruim is naar beneden beperkt tot enkele graden boven het smeltpunt. Worden ijsbunkers aangebracht, met geforceerde luchtdoorstroming, dan verkrijgt men een zeer betrouwbaar, zij het zwaar en uitputtelijk koelsysteem dat nog veel wordt toegepast bij spoorwegvervoer met geregelde ijsvoorziening. Door schakelen van de luchtcirculatie afhankelijk van de temperatuur (thermostatisch) kan een regeling van het koelvermogen worden verkregen. Vooral verse vis wordt gekoeld door een verdeelde ijslading. Het zogenaamde top-icing, het aanbrengen van een laag ijs op de lading, is bij extra koudebehoefte en bij calamiteiten een effectieve koelmethode. Niet alle ladingen tolereren deze wijze van koeling resp. bijkoeling. Het smeltwater moet worden afgevoerd.

Door het kleine temperatuurverschil tussen lucht en ijs is de vochtigheid van de circulerende lucht hoog, zodat uitdroging van de lading wordt voorkomen.

##### Eutectische systemen

Door zouttoevoeging aan het ijs kunnen lagere smeltemperatures worden bereikt (22,4% keukenzout (NaCl):  $-21,2^{\circ}\text{C}$ ) op kosten van een zeker deel van de smeltwarmte. De corrosiviteit van deze mengsels kan worden verminderd door toevoegingen van speciale chemicaliën bijv. fosfaten.

Tabel 2 geeft enkele voorbeelden van eutectische mengsels en hun karakteristieke eigenschappen.

**Tabel 2**

Enkele eutectische mengsels voor temperaturen beneden  $-20^{\circ}\text{C}$

stof	code <sup>1)</sup>	smeltpunt $^{\circ}\text{C}$	smeltwarmte kJ/kg
waterijs	—	0	336
	E20	-20	247
natriumchloride	—	-21	246
	E26	-26	260
	H18	-26	250
	E29	-29	242
	E33	-33,5	243
magnesiumchloride	—	-33,6	246

<sup>1)</sup> de industriële eutectische mengsels verschillen van de zuivere stoffen door toevoegingen om corrosie te voorkomen

Dergelijke mengsels worden nu alleen nog in gesloten systemen toegepast in de vorm van platen of pijpen. Deze zijn

soms voorzien van ribben om het koude oppervlak te vergroten om zo een groter koelvermogen te bereiken.

Meestal moet natuurlijke circulatie op basis van temperatuurverschillen en opoffering van laadruimte voor de temperatuurverdeling zorgen. Bij geforceerde luchtcirculatie kan door thermostatisch schakelen daarvan het koelvermogen worden geregeld. Nadat de koelcapaciteit is uitgeput door het smelten, kunnen deze koude-accumulatoren weer worden opgeladen door opnieuw bevriezen.

De gebruikte mengsels zijn vaak geheim van samenstelling.

Om problemen bij lekkage te voorkomen zouden deze mengsels geen giftige bestanddelen mogen bevatten. Door het gebruik van geleurende mengsels kan uitlopen worden voorkomen.

Het vochtgehalte van de circulerende lucht is lager naar gelang de temperatuurverschillen tussen lucht en koud oppervlak groter worden. De rijpafzetting op de koeloppervlakken vermindert het koelvermogen en vereist extra maatregelen voor het verwijderen hiervan. Geheel ontdooien is in de regel niet doenlijk wegens de energie- en tijdbehoefte bij het opnieuw bevriezen.

#### *Koolzuurijs*

Met vast koolzuur laten zich, bij met waterijs vergelijkbare toepassingsmogelijkheden, aanmerkelijk lagere temperaturen bereiken tot  $-78^{\circ}\text{C}$ . Overlast door smeltwater wordt vermeden.

Ook hier geeft het thermostatisch schakelen van een geforceerde luchtcirculatie door of langs koolzuurijsbunkers de mogelijkheid van regeling van het koelvermogen.

Het vochtgehalte van de atmosfeer in het laadruim is laag en rijpvorming op koude oppervlakken kan hinderlijk zijn. Verhoogde koolzuurgasconcentraties in het laadruim kunnen een bijdrage leveren tot kwaliteitsbehoud van enkele producten maar kunnen gevaren opleveren bij te snel betreden na opening van het laadruim.

#### *Vloeibare gassen*

Vloeistoffen, die bij lage temperaturen verdampen kunnen in open of gesloten systemen worden toegepast.

Bij open systemen wordt de verdampende vloeistof direct in de laadruimte gebracht. Hierdoor kan naast de temperatuur ook nog de samenstelling van de atmosfeer in de laadruimte worden beïnvloed. Open systemen worden voor vloeibaar koolzuur (en koolzuurijs) en voor vloeibare lucht en stikstof toegepast.

Bij gesloten systemen worden warmtewisselaars gebruikt tussen koudemiddel en circulerende lucht, omdat het gasvormige koudemiddel niet gewenst is in de laadruimte. Dergelijke systemen moeten voor ammoniak, LPG en vloeibaar aardgas worden toegepast. Na verdamping kunnen deze koudemiddelen nog energie leveren in verbrandingsmotoren of moeten (katalytisch) worden verbrand. Voor de andere vloeibare gassen en koolzuurijs zal men gesloten systemen slechts bij uitzondering aantreffen.

In open systemen kunnen met vloeibaar koolzuur temperaturen tot  $-78^{\circ}\text{C}$  worden bereikt, met vloeibaar stikstof tot  $-196^{\circ}\text{C}$ . Een goede menging met circulerende lucht is dus vereist om redelijke ruimtetemperaturen te verkrijgen. Natuurlijke circulatie is nauwelijks in staat om een goede temperatuurverdeling te bereiken, zelfs niet ten koste van nogal wat laadruimte.

Het koelvermogen wordt naar behoefte geregeld door thermostatisch schakelen van de koudemiddeltoevoer.

De luchtvochtigheid in de gekoelde ruimte is bij deze koelmethode doorgaans laag hetzij door toevoer van het droge gas hetzij door rijpvorming aan de koeler bij een gesloten systeem. Ook in open systemen kan hinderlijke rijpvorming op-

treden aan de sproeimonden en op koude oppervlakken in de nabijheid daarvan.

Vloeibare gassen als koolzuur en stikstof kunnen bijdragen tot een beter kwaliteitsbehoud maar werken verstikkend in onventileerde ruimten en vereisen extra voorzichtigheid bij laden en lossen. Vloeibare lucht heeft nog andere gevaren, nl. de mogelijkheden van verrijking van zuurstof in het mengsel door het afdampen van de lager kokende stikstof, waardoor het brandgevaar toeneemt.

Om drukopbouw in het laadruim door de volumetoename van het verdampende koudemiddel te voorkomen moet een overdrukbeveiliging in de vorm van een veiligheidsklep worden aangebracht.

De voorziening met deze koelmiddelen is niet overal gewaarborgd zodat de uitputtelijkheid een beperking vormt.

Aan alle niet-mechanische koelsystemen kleven als nadelen:

- Voor voldoende luchtcirculatie moeten extra voorzieningen worden getroffen c.q. een extra krachtbron worden aangesproken.
- Door de koelcapaciteit = koelarbeid, bijv. hoeveelheid ijs, is het koelvermogen nog niet vastgelegd. Gedurende de bedrijfstijd zal het koelvermogen veranderen, waardoor de condities temperatuur en luchtvochtigheid in de laadruimte als regel een verloop laten zien.

#### **Mechanische koeling**

De mechanische koelinstallatie is gekenmerkt door een compressor die gasvormig koudemiddel in een hermetisch gesloten kringloop rondpompt. Aan de lage druk (zuig)zijde wordt de warmte afgegeven door een luchtverhitter of condensor. Een thermostatisch regelventiel in de teruglopende koudvloeistof zorgt voor de dosering van het koudemiddel afhankelijk van het gevraagde koelvermogen en daarmee voor het nodige drukverschil. De compressor kan mechanisch door middel van een verbrandingsmotor of elektrisch of hydraulisch worden aangedreven, hetgeen verschillende mogelijkheden tot regeling en koppeling met een luchtkoeler-ventilator oplevert voor een geforceerde luchtcirculatie in het laadruim. Dit is als het grootste voordeel van deze koelmethode te waarden naast de beschikbaarheid van de aandrijfenergie in de vorm van motorbrandstof, hydraulisch vermogen via de voertuigmotor of elektrisch vermogen via generator of uit het elektrisch net.

Mechanisch gedreven koelinstallaties beschikken in principe over uitgebreide regelmogelijkheden. Het koelvermogen kan continu of stapsgewijs en ook in combinatie over een groot bereik worden geregeld. Dit is van groot belang om aan de eisen van uiteenlopende ladingen in het koel- en vriesbereik te kunnen voldoen. De luchtcirculatie wordt doorgaans in stappen geregeld al of niet gekoppeld aan de koeling.

Ontdooiing, nodig om de goede werking van de luchtkoeler onder vriesomstandigheden te verzekeren, wordt verkregen door over te schakelen op verwarming, hetzij elektrisch door persgas of omkeren van het circuit, waardoor de gevormde rijp afsmelt.

De luchtvochtigheid in de koellucht kan afhankelijk van koelconstructie en regeling, van middelmatig tot hoog zijn.

#### **Mengvormen**

Er bestaan ook mengvormen van de beschreven koelsystemen:

- Eurtectisch systeem met koelmachine. Deze combinatie wordt veel toegepast voor distributiedoeleinden. Het opladen van de koude-accumulator door middel van een mechanisch koelsysteem met elektrische aandrijving uit het net is meestal zonder problemen in het patroon van rijden en stilstaan te passen. Aandrijving vanuit een verbrandingsmotor verhoogt de flexibiliteit op kosten van het energieverbruik.

- Gesloten koelsystemen, zonder compressor, met koolzuurijks gekoelde condensor. Om de problemen van de veel te lage sublimatietemperatuur van koolzuurijks bij open verdamping te omzeilen kan men gebruik maken van een compressorloos gesloten koudemiddelcircuit. De luchtkoeler/verdamper wordt gevoed met koudemiddel. De damp hiervan wordt in een koolzuurijks gekoelde condensor neergeslagen. Een thermostatisch ventiel regelt de koudemiddelstroom naar de koeler, en daarmee het koelvermogen.

### Verwarming

In wisselend en koud klimaat bestaat ook behoefte aan verwarming van de laadruimte. Hiervoor is de mechanische koelinstallatie te gebruiken bij omschakelen van de kringloop zodat warmte aan de buitenlucht wordt onttrokken en in de laadruimte wordt gebracht volgens het warmtepomp principe. Een andere mogelijkheid bestaat in het circuleren van heet persgas door het gehele koelcircuit.

Electrisch gedreven installaties hebben ook de mogelijkheid van weerstandsverwarming.

Het voordeel van deze combinaties met de mechanisch aangedreven koelinstallatie is de combinatie met de temperatuurregeling en de geforceerde luchtcirculatie waardoor de warme lucht in de laadruimte verdeeld kan worden.

Aan de regeling van het verwarmingsvermogen is echter nog weinig aandacht besteed. Te hoge temperaturen zijn ongewenst, mede door het drogende effect van de verwarmde lucht. Dit vereist een goede afstemming van verwarmingsvermogen en luchtcirculatie.

Het inblazen van warme lucht afkomstig van de motorkoeling of speciale verwarmingselementen maakt extra voorzieningen noodzakelijk. Ook hier moet de afstemming op de luchtstroom met zorg gebeuren.

### 4.2.2 Handhaven van gasconcentraties in laadruim

Voor de beheersing van de gassamenstelling in het laadruim staan verschillende werkwijzen ter beschikking voor verschillende taken.

### Ventilatie

Ventilatie is de eenvoudigste methode voor het verwijderen van schadelijk stofwisselingsproducten: verdunnen van de concentratie van koolzuurgas en ethyleen of aanvullen van zuurstof, door toevoer van buitenlucht. Te preferen is een instelbare ventilatieluchtstroom om overbelasting van het koel/verwarmingssysteem te voorkomen.

De onbeïnvloedbare luchtlekkage moet als basisventilatie worden beschouwd en zo klein mogelijk worden gehouden. Bij afwijkende buitencondities moet de ventilatieluchtstroom op laadruimconditie gebracht worden eerdad hij in contact komt met de lading. Dit is noodzakelijk om schade door afwijkende temperaturen en vochtgehalten, uitdroging of condensatie te voorkomen.

### Gastoevoer

Voor het handhaven van een bepaalde gasconcentratie in het laadruim moet de toevoer van het gas in balans staan met de afvoer door lekkage. Dit vereist continue of geregelde toevoer.

Bij ontbreken van een doelmatige afdichting zijn grote gasstromen nodig om een zuurstofarme atmosfeer in het laadruim te bereiken. Afhankelijk van de gewenste tijd moet dan op grote hoeveelheden worden gerekend. De benodigde regelapparatuur stelt extra eisen aan toerusting en onderhoud. Na eenmalige toediening neemt de gasconcentratie meestal als gevolg van lekkage te snel af om haar werking te kunnen ontplooiën.

Bij open koelsystemen met vloeibare gassen moet de gas-toevoer door ventilatie in balans worden gehouden om de gewenste gasconcentratie te verkrijgen. Door het handhaven van een geringe overdruk in het laadruim kan de invloed van lekkage op de gasconcentratie teruggedrongen worden ten koste van een hoger gasverbruik.

### Scrubben

Het verwijderen van schadelijke gassen uit het laadruim door middel van chemische of fysische processen vereist speciale apparatuur: scrubbers. Deze apparaten bezitten een bepaalde capaciteit afhankelijk van luchtdoorstroming en concentratieverschil van het te verwijderen gas (fig. 3). Zij stellen ook nog eisen aan het laadruimteklimaat, afwijkend van de eisen aan de lading, zodat verdere voorzieningen moeten worden getroffen. Zo worden al deze processen beïnvloed door het vochtgehalte van de atmosfeer in het laadruim. Dit betekent dat men dergelijke methoden alleen zal toepassen in die gevallen, waarin ventilatie met buitenlucht niet mogelijk is als gevolg van ongunstige buitenomstandigheden.

Regeneratieve scrubbers bieden het voordeel van hergebruik, indien de regeneratie niet te hoge eisen stelt.

Scrubbers voor eenmalige toepassing worden snel duur in gebruik. De grootte moet aangepast zijn aan de gebruiksduur.

In alle gevallen moet apparatuur van dit soort van een doelmatige luchtcirculatie worden voorzien, dan wel in een aanwezig circulatiesysteem worden opgenomen.

### 4.3 Hoofdelementen in de balans voor conditioneren in evenwicht

Om de benodigde condities ook kwantitatief te kunnen bepalen, moeten de hoofdelementen in de balansen voor warmte, vocht en gasconcentraties worden beschreven. Dit kan op een principiële gelijke manier voor de warmte- en de stofbalansen.

Tabel 3

Elementen in de warmtebalansen voor het laadruim.

bron	toevoer	= afvoer	bron
omgeving	$KA(T_e - T_i)$	$n \cdot \Phi \cdot \rho (i_i - i_u)$	koellucht
zonnestraling	$\frac{1}{2} KA T_z$	$n \cdot \Phi_c \cdot c_p \rho_l (T_i - T_u)$	
ventilatie lekkage deuropeningen	$\left. \begin{matrix} \Phi_v \\ \Phi_L \\ \Phi_D \end{matrix} \right\} \rho (i_o - i_i)$	$Mc \cdot \Delta T$	lading
ventilator	$n \cdot N_c$	$M_k \Delta i_k / t$	koudemiddel
lading	$Mq(T)$	$n \cdot Q(T_e; T_i)$	koelinstallatie

met:

symbool	omschrijving	eenheid
$K$	isolatiewaarde 'K'-waarde	$W/m^2 \cdot K$
$A$	gemiddeld oppervlak van de laadruimte	$m^2$
$T_e$	luchttemperatuur, omgeving	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
$T_i$	luchttemperatuur, laadruim	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
$\Delta T_z$	temperatuurverhoging door zonnestraling	$K, (^{\circ}C)$
$\Phi$	luchtstroom	$m^3/h^3$
$\rho$	soortelijke massa lucht	$kg/m^3$
$i_o$	luchenthalpie omgeving	$J/kg$
$i_i$	luchenthalpie laadruim	$J/kg$
$M$	lading massa	$kg$
$q$	warmteproductie	$W/kg$
$n$	relatieve looptijd	-
$Q$	koelvermogen	$W_3$
$i_i; i_u$	intrede resp. uitrede enthalpie	$J/kg$
$T_i; T_u$	intrede resp. temperatuur	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
$M_k$	massa koudemiddel	$kg$
$\Delta i_k$	enthalpieverschil koudemiddel	$J/kg$
$c; c_p$	soortelijke warmte; idem bij const. druk	$J/kg \cdot K$
$\Delta T$	temperatuurverhoging lading	$K, (^{\circ}C)$
$t$	tijd	$h$

### 4.3.1 Warmtebalans

Het handhaven van een bepaalde temperatuur in het laadruim van een vervoermiddel vereist een evenwicht tussen ingaande en uitgaande warmtestromen. Deze warmtestromen worden door positieve en negatieve bronnen van verschillend karakter geleverd. Deze zijn in de tabel door hun karakteristieke grootheden aangegeven en in het vervolg kort beschreven.

#### Warmtetoevoer

Warmte-overdracht uit de omgeving en warmteproductie van de lading zijn de belangrijkste warmtebronnen, aangevuld door ventilatie met omgevingslucht.

#### Omgeving

De warmtelast door de omgeving wordt volgens afspraak gekoppeld aan de luchttemperaturen binnen en buiten. De isolatiewaarde 'K', het gemiddeld oppervlak van de laadruimte en het temperatuurverschil zijn nodig om de warmtestroom door de geïsoleerde constructie te berekenen. De K-waarde is ook nog afhankelijk van de luchtsnelheid binnen (luchtcirculatie) en buiten (rijwind). De verhoging door de zijwind en luchtcirculatie bedraagt max. 6 à 15% voor K-waarden tussen 0,4 en 1 W/m<sup>2</sup>.K.

#### Zonnestraling

Als gevolg van de zonnestraling kunnen de oppervlaktetemperaturen tot ca 70°C oplopen bij een luchttemperatuur van 30°C, afhankelijk van invalshoek en reflectiegraad (kleur). Richtwaarden zijn in tabel 3 aangegeven.

Tabel 4

Richtwaarden voor de maximale temperatuurstijging ( $\Delta T_z(k)$ ) door zonnestraling op een horizontaal vlak.

geograf. breedte	wit	grijs (vuil wit)	zwart
30°	15	30	45
60°	13	26	40

Dit geldt voor de buitenwand van de geïsoleerde ruimte maar ook voor het wegdek. Hierdoor wordt de warmtelast voor een stilstaand voertuig aanmerkelijk verhoogd. Gebruikelijk is om deze extra warmtelast over 50% van het oppervlak te berekenen.

#### Ventilatie, lekkage, deuropeningen

Door uitwisseling van koellucht uit het laadruim met omgevingslucht wordt de volgende post in de warmtelast gevormd. Ventilatie staat hierbij voor het doelbewust toevoeren van buitenlucht ter handhaving van temperatuur of gassamenstelling in het laadruim. Lekkage is de onbeheersbare ventilatie als gevolg van ondichtheden door constructie of slijtage. Ventilatie en lekkage staan onder invloed van de luchtdrukverdeling buiten en binnen door rijwind en inwendige luchtcirculatie.

Deuropeningen tijdens een distributierit zijn een speciale vorm van ventilatie. Ervan uitgaande dat het gehele luchtvolume per stop door warme buitenlucht wordt vervangen, kan de ventilatie door deuropeningen als volgt worden aangegeven:

$$\dot{V}_b = n(V - V_l) + V_l \left( \frac{n+1}{2} \right)$$

met:

- n aantal deuropeningen
- V volume van het laadruim (m<sup>3</sup>)
- V<sub>l</sub> volume van de lading (m<sup>3</sup>).

De warmtelast door ventilatie bevat een deel latente warmte als gevolg van het watergehalte van de lucht (zie hiervoor 'het Mollierdiagram voor vochtige lucht' in de leergang: Ontwerpen van koelinstallaties, L 178 ev.).

#### Ventilator

In die gevallen waarin gebruik wordt gemaakt van een aparte ventilator waarvan de motor in de geïsoleerde ruimte is geplaatst treedt het gehele opgenomen vermogen als warmtelast op. Wanneer de aandrijving buiten de geïsoleerde ruimte is geplaatst is allen met het asvermogen te rekenen.

#### Lading

Levende lading, gekenmerkt door stofwisseling en warmteproductie, levert eveneens een aandeel in de warmtelast, soms zodanig dat broei ontstaat. Ook gevaarlijke lading bijv. organische peroxyden produceren warmte die afgevoerd moet worden om opwarming te voorkomen.

#### Warmte-afvoer

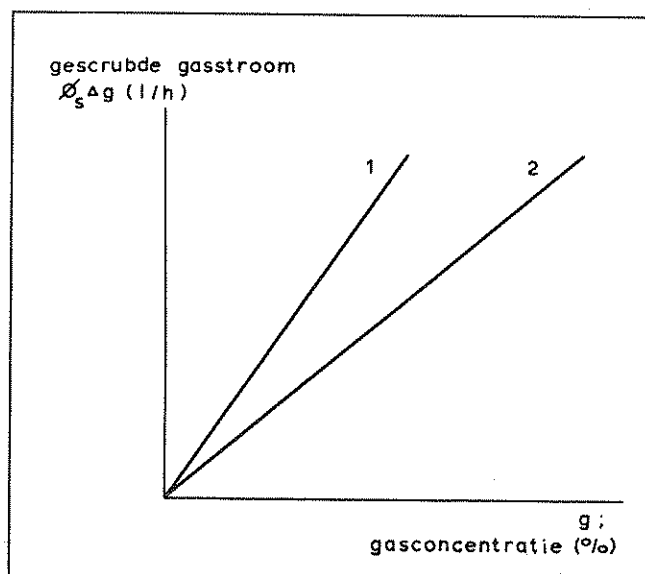
De warmtelast moet door koelvermogen worden gebalanced om een constante temperatuur in het laadruim te kunnen handhaven.

#### Koellucht

Lucht treedt in de meeste gevallen als koudedragers of koelmedium op, hetzij als buitenlucht bij ventilatiekoeling hetzij als circulerende koellucht in koelsystemen. In beide gevallen is ook het warmte-effect van het waterdampgehalte belangrijk (zie Mollierdiagram). Alleen bij vriesbedrijf kan men zonder grote fouten direct met luchttemperaturen rekenen. Het koelvermogen is gegeven door de luchtstroom en het enthalpie resp. temperatuurverschil.

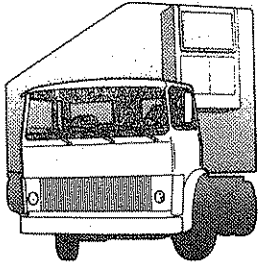
#### Koudemiddel

Smeltend ijs en verdampend koudemiddel kunnen per massa-eenheid een bepaalde hoeveelheid warmte absorberen. Bij vloeibare gassen en koolzuur is niet alleen de verdampingswarmte maar ook de opwarming van het gas tot de regelttemperatuur van belang.



Figuur 3 Geabsorbeerde gasstroom afhankelijk van de gasconcentratie voor twee scrubbertypen

(wordt vervolgd)



**Curatorium:** H. F. Th. Meffert (vz.), Sprenger Instituut, Wageningen  
 P. C. Moerman (secr.), CIVO-Technologie TNO, Zeist  
 J. Bakker, NOB-Wegtransport, Rijswijk  
 J. H. Dijks, Stichting Vervoer en Havenopleidingen  
 W. M. Moret, EVO, Zoetermeer (tot en met 1983)  
 B. Kloosterman, Hoger Agrarisch Onderwijs, Utrecht (1984)

### Hoofdstuk 4 Grondslagen van het conditioneren in de transportketen (vervolg)

#### Lading

Ook voorgekoelde lading kan een warmtelast gedurende een korte tijd opvangen op kosten van een temperatuurverhoging binnen toegestane grenzen die produktafhankelijk zijn. Zolang geen rekening moet worden gehouden met temperatuurverschillen in de lading en de temperatuurverhoging gering is, kan uit koelarbeid en warmtelast een veilige verblijftijd worden bepaald. Luchtlekkage verkort de beschikbare tijd. Ventilatie is om dezelfde reden ongewenst.

#### Koelinstallatie

De koudebron waaraan de circulerende lucht haar koelvermogen ontleent is doorgaans een koelsysteem. Hiervoor kan het koelvermogen worden opgegeven in afhankelijkheid van de werktemperatuur en andere factoren. Deze informatie is doorgaans beschikbaar als resultaat van metingen (fig. 4). Voor systemen met koude-accumulatie zoals waterijs, koolzuurijs en eutectische installaties is niet het koelvermogen, maar de capaciteit in de tijd (koelarbeid) maatgevend. Het koelvermogen van deze systemen is doorgaans niet con-

stant. Gevolg hiervan is een temperatuurverloop gedurende de koeltijd.

#### 4.3.2 Vochtbalans

Het handhaven van luchtvochtigheid in het laadruim veronderstelt een evenwicht tussen watertoevoer aan en waterafvoer uit de atmosfeer. Lading en luchtcirculatie en -verversing spelen in de vochtbalans de voornaamste rol.

**Tabel 5**

Elementen van de vochtbalans voor het laadruim

bron	toevoer	afvoer	bron
ventilatie	$\varnothing_v$	$\varnothing_c \varrho (w_i - w_u)$	koellucht
lekkage	$\varnothing_L$	$\times \varrho (w_e - w_i)$	
deuropeningen	$\varnothing_D$		
lading	M.W		

Met:

symbool	omschrijving	eenheid
$\varnothing$	luchtstroom	m <sup>3</sup> /h
$\varrho$	soortelijke massa lucht	kg/m <sup>3</sup>
$w_e$	watergehalte omgevingslucht	kg/kg
$w_i$	watergehalte laadruimlucht of retourlucht koeler	kg/kg
$w_u$	watergehalte uitredelucht koeler	kg/kg
M	lading massa	kg
W	vochtafgifte lading	kg/kg.h

#### Toevoer van waterdamp

##### Ventilatie en lekkage

De toevoer van waterdamp aan de atmosfeer in het laadruim vindt bij verpakte en niet levende produkten voornamelijk plaats vanuit de omgeving door luchtuitwisseling. Indien de buitenatmosfeer minder water bevat verhuist dit proces met zijn bijdrage naar de afvoerszijde (Mollierdiagram).

##### Lading

Een levende of een niet verpakte lading levert een veel groter aandeel aan het vochtgehalte van de atmosfeer in de laadruimte. De beschermende werking van de verpakking tegen vochtverlies is een belangrijk aspect in dit gebeuren.

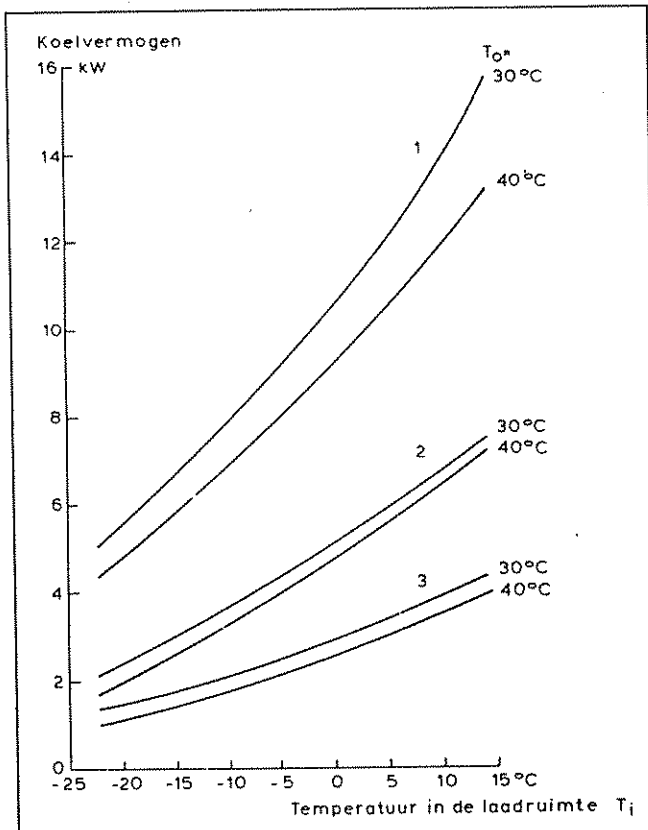
#### Afvoer van waterdamp

##### Luchtcirculatie

De circulerende lucht is via de luchtkoeler het meest belangrijke instrument voor de afvoer van waterdamp (Mollierdiagram).

##### Luchtkoeler

De werking van de luchtkoeler in die balans is alleen door beschrijving van de daar verloopende processen met behulp van het Mollierdiagram voor vochtige lucht vast te leggen. In dit bestek voert de bespreking daarvan te ver. Verwezen



**Figuur 4** Netto koelvermogen bij laadruimtemperatuur van drie mechanische koelsystemen afhankelijk van de omgevingstemperatuur  $T_o$

wordt naar het betreffende hoofdstuk van de leergang 'Ontwerpen van koelinstallaties'.

#### 4.3.3 Gasbalans

Het handhaven van een bepaalde gassamenstelling in het laadruim vereist evenwicht tussen toevoer en afvoer van de gassen. Naast lading en buitenlucht kunnen gasgeneratoren en scrubbers een rol spelen in de balans.

**Tabel 6**

Elementen van de gasbalans voor een laadruim.

bron	toevoer	afvoer	bron
lading	M.G.	$\left. \begin{matrix} \varnothing_v \\ \varnothing_L \end{matrix} \right\} \times (g_i - g_e)$	ventilatie, lekkage
gasgenerator	$\varnothing_g \cdot g$	$\varnothing_s (g_i)$	scrubber

met:

symbol	omschrijving	eenheid
M	lading massa	kg
G	gasafgifte	m <sup>3</sup> /kg.h
$\varnothing_g$	gasstroom	m <sup>3</sup> /h
g	gasconcentratie	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\varnothing$	luchtstroom	m <sup>3</sup> /h
g <sub>i</sub>	gasconcentratie laadruim	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
g <sub>e</sub>	gasconcentratie omgeving	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

#### Gastoevoer

##### Lading

Levende lading is door de stofwisseling een belangrijke bron voor de opbouw van de atmosfeer in het laadruim. De temperatuurafhankelijkheid van de stofwisseling is verantwoordelijk voor een duidelijke temperatuurinvloed op de gasafgifte. Dit geldt voor zuurstof (verbruik = negatieve invloed), koolzuurgas en ethyleen.

##### Gasgenerator

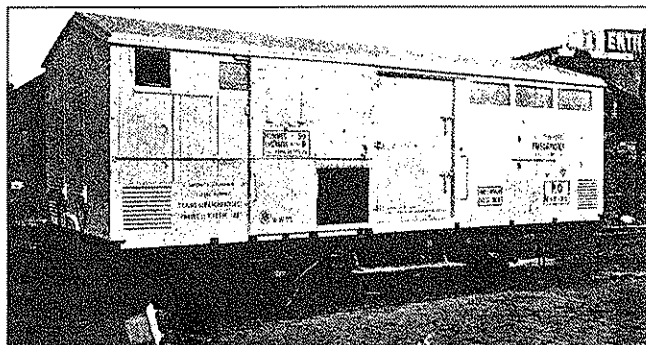
Bij ladingen met geringe of geen stofwisseling moeten stikstof, koolzuurgas of voorbereide gasmengsels aan de laadruimte worden toegevoerd.

Als gasgenerator kunnen ook open koelsystemen met vloeibare gassen dienen zoals stikstof en koolzuur, de laatste ook in vaste vorm.

#### Gasafvoer

##### Ventilatie en lekkage

Op de afvoerszijde staan in de eerste plaats lekkage en ventilatie. Hierdoor wordt de concentratie schadelijke gassen verdund. Een lichte overdruk in de laadruimte is gunstig voor het verminderen van inlek. Voor een beheerste ventilatie is een doelmatig gebruik van de optredende drukverschillen in en rond het voertuig noodzakelijk.



**Figuur 5** Geïsoleerde wagon van de Parijs-Orleans spoorwegen (oorlogstype 1915) isolatie: kurkgranulaat of turf

#### Scrubber

Het verwijderen van ongewenste gassen zoals koolzuur en ethyleen uit de laadruimte met behulp van speciale apparatuur is nog weinig gebruikelijk tijdens vervoer, dit in tegenstelling tot de toepassing van dergelijke methoden bij de opslag.

Zolang de ventilatie de gewenste concentraties kan waarborgen is er weinig reden om naar ingewikkelde methodes te grijpen.

Voor een goede werking moeten de absorptiemiddelen in een luchtstroom worden geplaatst, die voor de aanvoer van het gasmengsel en de afvoer van de gezuiverde atmosfeer zorgt.

#### 4.4 De gekoelde laadruimte

Het afkoelen en op temperatuur houden van een lading werd vanaf het begin van het geregelde koelvervoer (circa 1870) als het resultaat van de samenwerking van het systeem isolatie-koeling gezien. Pas na tientallen jaren ontwikkeling kwamen in de eerste jaren van de 20e eeuw tot een waardering van elk der deelsystemen apart. Dit werd het begin van een stormachtige ontwikkeling van isolatieconstructies voor koelvoertuigen met het doel koelenergie c.q. ijs te besparen. Het voorcoelen werd toen geïntroduceerd: het op vervoerstempertuur brengen van de lading voor het begin van het vervoer. Ook werden de mogelijkheden van geïsoleerd transport nagegaan: het overbruggen van een zekere vervoerstijd ten koste van het opwarmen van de lading tot afleveringstemperatuur. Op deze wijze kon vervoer over afstanden van enkele honderden kilometers ook zonder koeling worden gerealiseerd.

##### 4.4.1 De eigenschappen van een gekoeld voertuig

Bij de eerste metingen aan koelwagens werden nog zakken met zaagsel en bakken met warm water gebruikt om het afkoelen van de lading te simuleren en waren ijsverbruik en temperatuurverloop naast gewicht bepalend voor de waardering van de kwaliteit van het voertuig.

De eerste meting van de isolatiewaarde van een geheel voertuig werd door Prof. H. Bénard in 1915 in Frankrijk verricht. De toegepaste werkwijze droeg reeds alle kenmerken van de nu nog gangbare methode van inwendig verwarmen: Het voertuig wordt geplaatst in een ruimte met redelijk constante temperatuur. Elektrische verwarming zorgt voor een hogere temperatuur in het laadruim. Hulpventilatoren zorgen voor de temperatuurvereffening. Na het bereiken van de evenwichtstoestand worden het toegevoerd elektrisch vermogen en het verschil tussen binnen- en buitenluchttemperatuur gemeten.

Figuur 5 geeft een beeld van een toen gebruikelijk type koelwagon.

Figuur 6 toont het verloop van de temperaturen tijdens de meting.

Sindsdien worden koelvoertuigen door hun isolatiewaarde K (W/m<sup>2</sup>·K) of de warmtelastfactor K x A (W/K) gekarakteriseerd:

$$K \times A = \frac{Q}{T_i - T_e} \text{ of } K = \frac{Q}{A (T_i - T_e)}, \text{ waarin } A = \sqrt{A_i \times A_e}$$

met:

symbol	omschrijving	eenheid
K	isolatiewaarde	W/m <sup>2</sup> ·K
A; A <sub>i</sub> ; E <sub>e</sub>	gemidd. oppervlak, resp. binnen en buiten	m <sup>2</sup>
Q	toegevoerde warmtestroom	W
T <sub>i</sub> ; T <sub>e</sub>	luchttemperatuur binnen en buiten	K

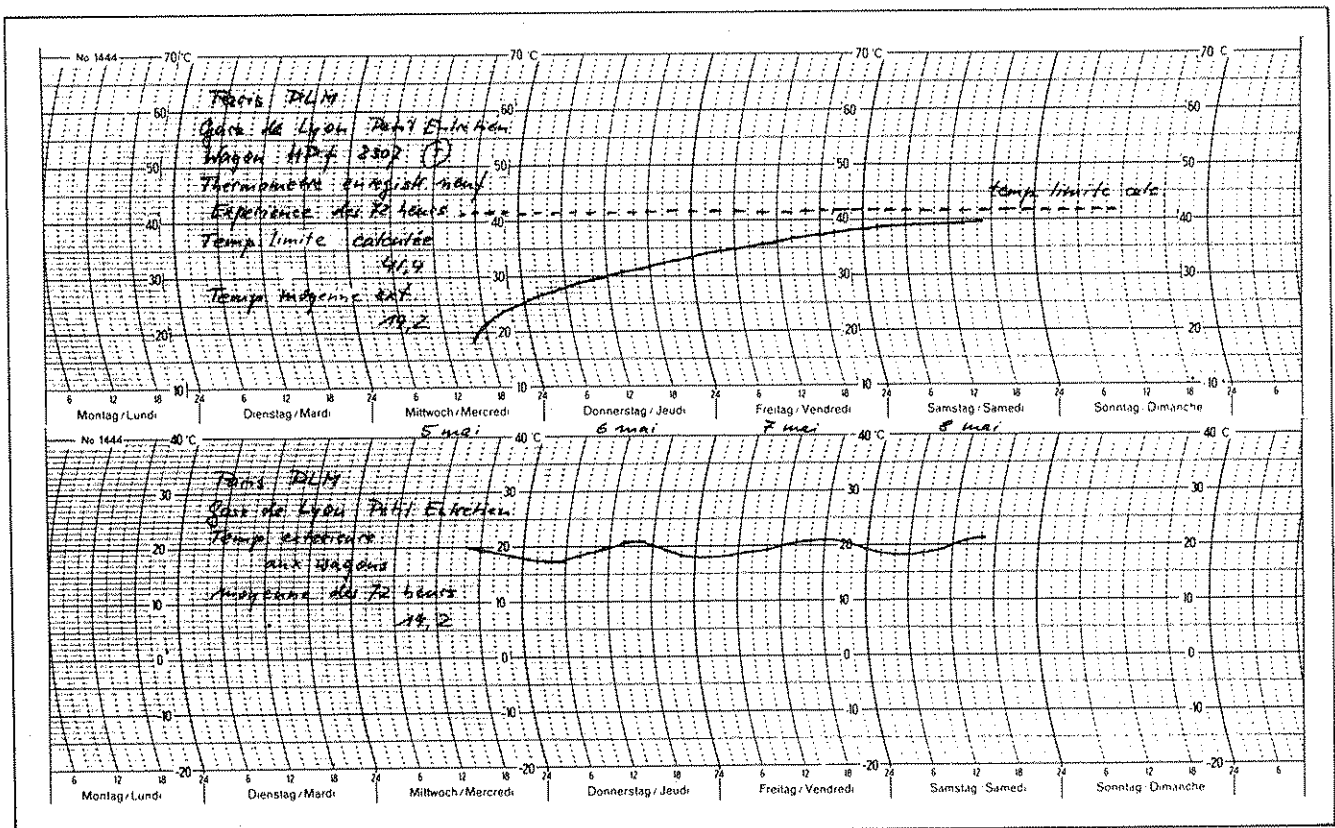


Fig. 6 Temperatuurwaarnemingen tijdens de 'K'-waardemeting van een wagon volgens figuur 5 door Prof. H. Bénard

Uit de meting is ook de operationele warmtecapaciteit of waterwaarde van het geïsoleerde laadruim af te leiden. Door de aard van de meting en het gebruik speelt ook de luchtlekkage een rol, de in principe ongewenste uitwisseling tussen binnen- en buitenatmosfeer. Een derde kenmerk is de warmtecapaciteit Wh/K van de gehele laadruimconstructie.

#### Isolatiewaarde

De isolatiewaarde is in hoofdzaak bepaald door isolatiemateriaal en constructie. Maar door de aard van de meting is er een bijdrage van de luchtsnelheden binnen en buiten, alsmede van luchtlekkage door de constructie heen. Als gevolg van de meetmethode wordt de isolatiewaarde 'K' berekend uit het verwarmingsvermogen Q, gemiddeld oppervlak A en het temperatuurverschil ( $T_i - T_e$ )

De isolatiewaarde 'K' is in principe vergelijkbaar met de thermodynamische warmteovergangscoefficiënt k, gedefinieerd door:

$$k = \frac{1}{\frac{s \cdot \eta_{is}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (1)$$

met:

symbool	omschrijving	eenheid
s	isolatiedikte	m
$\eta_{is}$	isolatierendement	-
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/m.K
$\alpha_e; \alpha_i$	warmteoverdrachtscoëfficiënt buiten; binnen	W/m <sup>2</sup> .K

De 'K'-waarde is dus op de eerste plaats door de warmtegeleidingscoëfficiënt en de dikte van de isolatie gekenmerkt, en door het rendement van de constructie. Het isolatierendement heeft in de loop der jaren een belangrijke verbetering ondergaan (tabel 7).

Tabel 7 Ontwikkeling van de isolatierendementen bij koelvoertuigen

periode	isolatierendement $\eta_{is}$
< 1930	0,33-0,28
1930-1945	circa 0,37
1950-1955	circa 0,4
1955-1966	0,4-0,66
> 1968	0,76-0,83

Tabel 8 geeft een indruk van de ontwikkeling van isolatiematerialen voor koelvoertuigen. De moderne kunststofschuimen vallen op door het lage soortelijke gewicht en de lage warmtegeleiding. Dit is te danken aan de opbouw uit zeer dunwandige gesloten cellen, die met lucht dan wel beter isolerende zware gassen zoals CO<sub>2</sub> of halogeenkoolwaterstoffen bijvoorbeeld R11, gevuld zijn.

Warmtetransport in kunststofschuimen, gevormd door een vaste matrix van cellen, die het isolerend gas insluiten, gebeurt door:

- warmtegeleiding in de vaste stof en in het gas,
- warmtestraling
- en
- convectie in de cellen.

De warmtegeleiding neemt toe wanneer in de loop der tijd het isolerende gas door lucht wordt vervangen. Isolatiematerialen met lucht als isolerend gas vertonen dit verschijnsel niet. Bij beide materiaalsoorten veroorzaakt indringen van water een verdere toename. Beide effecten worden samengevat onder het begrip veroudering.

Via de bovengenoemde mechanismen van warmtetransport

**Tabel 8**  
Eigenschappen van isolatiematerialen voor voertuigen

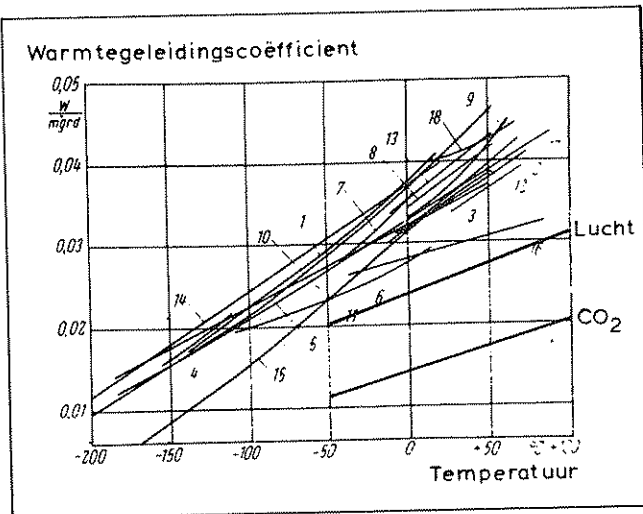
materiaal	soortel. massa	soortel. warmte	warmtegeleiding <sup>1)</sup>	
	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c Wh/kg.K	bij 10°C $\lambda_{10}$ W/m.K	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ per °K 1/K
1920				
turf	100–200	0,5–0,7	0,04–0,12	
zeewier	50–100		0,04	
kurk	100–200	0,4–0,6	0,04–0,05	0,0025
1980				
polystyreenschuim (met lucht)				
PS	20–55	0,38	0,028–0,38	0,005
polystyreenschuim, geëxtrudeerd (met CO <sub>2</sub> )				
PSE	25–50	0,38	0,018–0,035	0,002–0,005
polyurethaanschuim (met R11/R12)				
PUR	25–100	0,53	0,018–0,32	0,002–0,005 <sup>2)</sup>
polyvinylchlorideschuim				
PVC	30–80	0,33	0,038–0,040	0,005
gassen bij atm. druk en 0°C				
lucht	1,293	0,28	0,0240	0,0032
CO <sub>2</sub>	1,97	0,23	0,014	0,0042
R12	5,35	0,17	0,0087	0,0048

<sup>1)</sup> tussen 0 en 20°C

<sup>2)</sup> bij temperaturen hoger dan 10°C

is de warmtegeleiding afhankelijk van de soortelijke massa, de celgrootte, temperatuurniveau en temperatuurverschil. In de figuren 7 tot 10 zijn een aantal experimentele gegevens voor de temperatuurafhankelijkheid van de warmtegeleiding van de meest gebruikte kunststofschuimisolaties weergegeven.

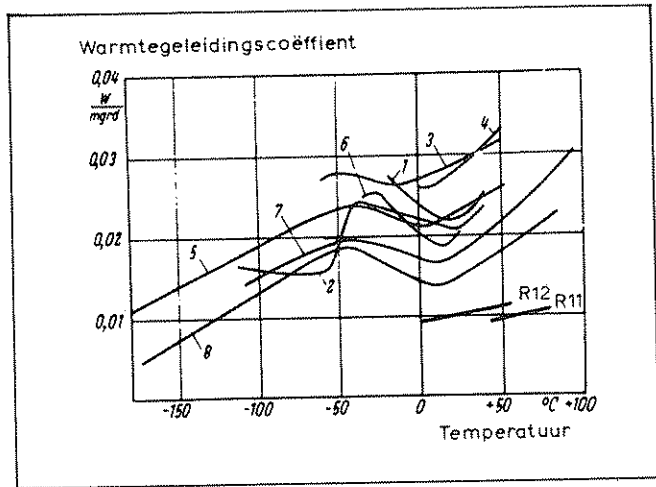
Figuur 7 geeft de warmtegeleiding van polystyreenschuim (PS). Voor dit materiaal ligt de soortelijke massa voor de laagste  $\lambda$ -waarde bij 30 tot 50 kg/m<sup>3</sup>. Voor geëxtrudeerd polystyreenschuim (PSE) ligt het optimum iets hoger bij circa 50 kg/m<sup>3</sup>.



**Figuur 7** Warmtegeleiding van polystyreenschuimen (PS) afhankelijk van de temperatuur

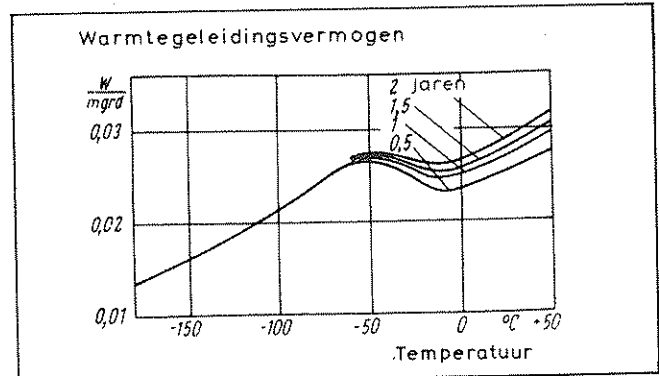
Figuur 8 toont de warmtegeleiding van polyurethaanschuim (PUR). Opvallend is het verloop tussen -40 en +10°C waar de warmtegeleiding afneemt met toenemende temperatuur.

Buiten dit bereik stijgt de warmtegeleiding met circa 0,4%. De verklaring van dit verschijnsel wordt gezocht in de condensatie van het drijfgas (R11) in het gegeven temperatuurbereik.

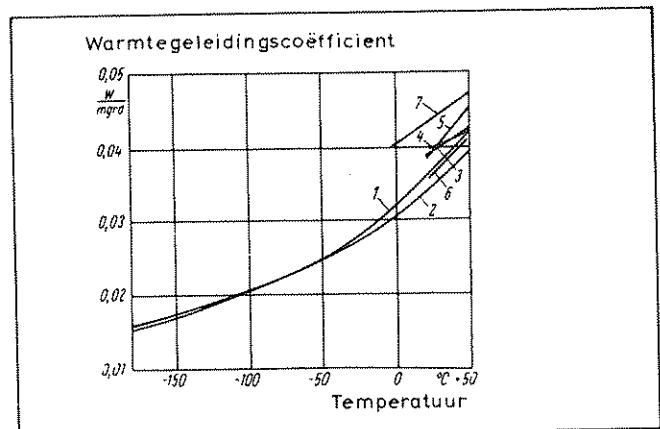


**Figuur 8** Warmtegeleiding van polyurethaanschuimen (PUR) afhankelijk van de temperatuur

Figuur 9 laat zien hoe het tussenminimum bij circa -10°C geleidelijk wordt opgevuld als gevolg van veroudering. Ook voor PUR-schuim geldt een optimale soortelijke massa van circa 50 kg/m<sup>3</sup> met minimale warmtegeleiding.



**Figuur 9** Warmtegeleiding van polyurethaanschuim (PUR) onder invloed van veroudering afhankelijk van de temperatuur

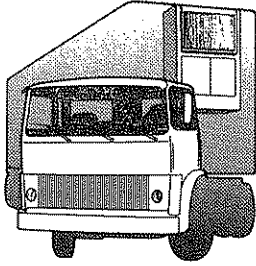


**Figuur 10** Warmtegeleiding van polyvinylchlorideschuim (PVC) afhankelijk van de temperatuur

Polyvinylchlorideschuim (PVC) vertoont geen anomalieën (fig. 10). De warmtegeleiding neemt toe met stijgende soortelijke massa. (wordt vervolgd)

# Leergang

## Transport onder beheerste temperatuur



Curatorium:

H. F. Th. Meffert (vz.), Sprenger Instituut, Wageningen  
 P. C. Moerman (secr.), CIVO-Technologie TNO, Zeist  
 J. Bakker, NOB-Wegtransport, Rijswijk  
 J. H. Dijks, Stichting Vervoer en Havenopleidingen  
 W. M. Moret, EVO, Zoetermeer (tot en met 1983)  
 B. Kloosterman, Hoger Agrarisch Onderwijs, Utrecht (1984)

### Hoofdstuk 4 Grondslagen van het conditioneren in de transportketen (vervolg)

De veroudering ten gevolge van vervanging van het isolerende gas door lucht is in de figuren 11 en 12 uitgebeeld.

Figuur 11 geeft berekende en gemeten waarden weer voor de veroudering van geëxtrudeerd polystyreenschuim (PSE). Hier wordt CO<sub>2</sub> door lucht vervangen.

Figuur 12 geeft het beeld voor polyurethaanschuim (PUR). In beide gevallen is na 2 à 3 jaren de eindwaarde ongeveer bereikt, deze ligt circa 50% hoger dan de nieuwwaarde van de warmtegeleidingscoëfficiënt.

De toename van de warmtegeleiding in de isolatie van koelvoertuigen leidde reeds vroeg tot problemen. Met de opkomst van de kunststofschuimen met gesloten celstructuur en grote diffusieweerstand voor waterdamp zijn deze verminderd maar niet verdwenen (fig. 13). De toename van de warmtegeleiding tijdens bedrijf kan namelijk niet alleen worden veroorzaakt door vervanging van de isolerende gassen door lucht, maar in veel grotere mate door water als gevolg van diffusie en condensatie. Water geleidt circa 25 keer beter dan lucht. Ook de diffusie zelf verhoogt het warmtetransport door de parallel lopende waterdampstroom. Het insluiten van de isolatie door diffusiedicht materiaal om de uitwisseling van het isolerende gas tegen lucht te verminderen, en daarmee ook het indringen van waterdamp, is een uitdaging voor de constructeur. Hierdoor kan de snelheid van veroudering belangrijk vertraagd worden. Om verhoging van de warmtegeleiding zoveel mogelijk tegen te gaan is het noodzakelijk om ontsnappen van isolerend gas en indringen van lucht en water in de vorm van damp of als vloeistof door naden, kieren en scheuren te ondervangen. Voorzover deze lekkages tijdens bedrijf optreden is er ook sprake van mechanische veroudering van de constructie, reparatie van beschadiging van buiten- en binnenwand van de constructie dient derhalve zo snel mogelijk te gebeuren.

Door het verband gegeven door vergelijking (1) wordt de gemeten K-waarde afhankelijk van de luchtsnelheden buiten en

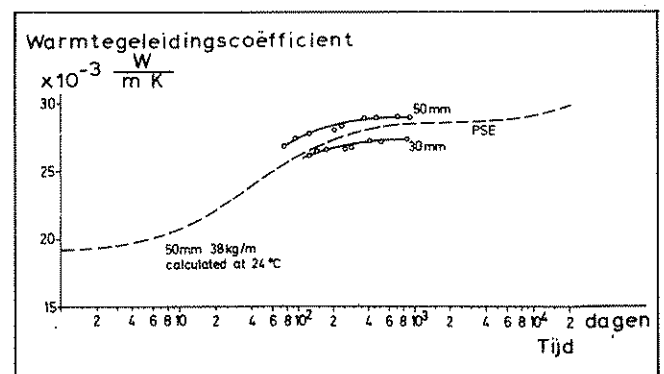
Tabel 9

Warmteoverdrachtscoëfficiënt voor lucht stromend langs een glad vlak

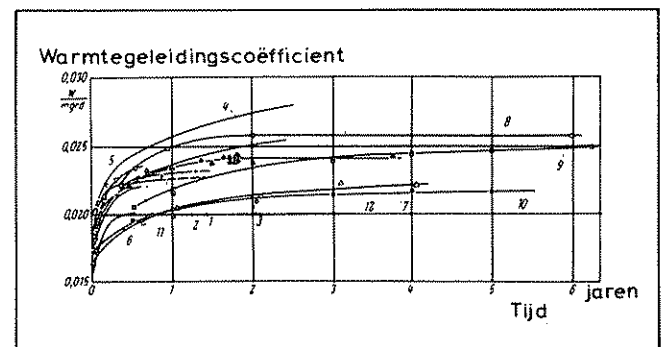
luchtsnelheid		warmte-overdrachtscoëfficiënt
m/s	km/h	W/m <sup>2</sup> .K
0	0	5,8
1	3,6	9,3
1,5	5,4	11
2	7,2	12,8
5	18	23,9
10	36	43,1
15	54	39,1
20	72	74,0
25	90	88,0
30	108	101,5
35	126	114,5

binnen. De warmteoverdrachtscoëfficiënten buiten en binnen zijn een functie van de luchtsnelheid (tabel 9).

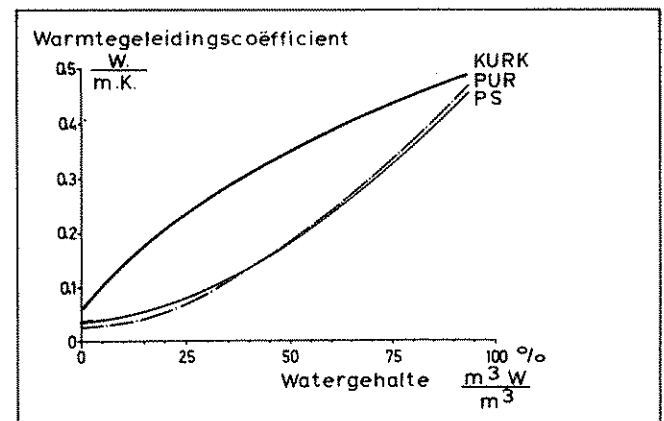
Ook de invloed van de luchtlekkage op de 'K'-waarde is afhankelijk van de luchtsnelheden buiten en binnen, c.q. meer direct van de luchtdrukverdeling (zie fig. 1). Om vergelijkbare meetresultaten te verkrijgen moeten temperatuurniveau, temperatuurverschil, luchtsnelheden buiten en binnen alsmede luchtvochtigheden buiten gestandaardiseerd worden, zoals



Figuur 11 Warmtegeleiding van geëxtrudeerd polystyreenschuim (PSE) onder invloed van veroudering



Figuur 12 Toename van de warmtegeleiding van polyurethaanschuim (PUR) door veroudering



Figuur 13 Warmtegeleiding van isolatiematerialen onder invloed van het watergehalte

dit door UIC, ECE-ATP en ISO voor spoorwagens, wegvoertuigen en containers is gebeurd.

Dit heeft echter tot gevolg dat de gemeten standaard-'K'-waarde geen directe informatie levert over de 'K'-waarde onder bedrijfsomstandigheden.

Hiervoor moeten correctiefactoren, berekend of gemeten, worden gehanteerd. De belangrijkste correcties op de standaard 'K'-waarde ( $K_o$ ) betreffen luchtsnelheden binnen en buiten ( $\Delta K_v$ ), lucht lekkage ( $\Delta K_L$ ), temperatuur ( $\Delta K_T$ ) en leeftijd ( $\Delta K_A$ ) van de isolatieconstructie:

$$K = K_o + \Delta K_v + \Delta K_L + \Delta K_T + \Delta K_A, \text{ of}$$

$$K = K_o \left( 1 + \frac{\Delta K_v}{K_o} + \frac{\Delta K_L}{K_o} + \frac{\Delta K_T}{K_o} + \frac{\Delta K_A}{K_o} \right)$$

### Luchtsnelheid

Afgeleid van tabel 8 kan de luchtsnelheidscorrectie worden geschat met:

$$\frac{\Delta K_v}{K_o} = \frac{1}{\alpha_o} \left( 1 - \frac{e}{\alpha_v} \right) K$$

i.e. voor buitenomstandigheden met  $\alpha_o = 11$  en  $\alpha_v = 110 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ :

$$\frac{\Delta K_v}{K_o} = 0,08 \text{ K}$$

voor binnenomstandigheden met  $\alpha_o = 11$  en  $\alpha_v = 22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ :

$$\frac{\Delta K_v}{K_o} = 0,05 \text{ K}$$

### Luchtlekkage

De correctie voor de luchtlekkage kan worden gegeven als:

$$\frac{\Delta K_L}{K_o} = \frac{\varnothing_L (i_i - i_e)}{K \times A (T_i - T_e)}$$

met:

symbool	omschrijving	eenheid
$\varnothing_L$	lekluchtstroom	$\text{m}^3/\text{h}$
$e$	soortrel. massa	$\text{kg}/\text{m}^3$
$i_i; i_e$	luchtenthalpie binnen; buiten	$\text{J}/\text{kg}$
$A$	gemidd. oppervlak	$\text{m}^2$
$T_i; T_e$	luchttemperatuur binnen; buiten	$^{\circ}\text{K}$

Deze correctie veronderstelt dat  $\varnothing_L$  gemeten is onder bedrijfsomstandigheden. Dit is in de regel niet het geval. Over deze problematiek zie verder onder luchtlekkage.

### Temperatuur

De correctie van de 'K'-waarde voor de gemiddelde temperatuur van de isolatie is alleen mogelijk aan de hand van metingen. Het blijkt namelijk dat de temperatuurcoëfficiënten voor constructies met een factor 1 à 4 (zie tabel 10) afwijken van die voor isolatiematerialen.

### Tabel 10

Temperatuurinvloed en veroudering van isolatiematerialen en geïsoleerde voertuigconstructies

Temperatuurinvloed isolatiematerialen	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$ per $^{\circ}\text{K}$	= 0,004 – 0,006
voertuigconstructies	$\frac{\Delta K}{K}$ per $^{\circ}\text{K}$	= 0,004 – 0,015
Veroudering isolatiematerialen <sup>1)</sup>	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$ per jaar	= 0 – 0,10
voertuigconstructies <sup>2)</sup>	$\frac{\Delta K}{K}$ per jaar	
wagens		1 – 6
containers		3 – 12
wegvoertuigen		3 – 7,5

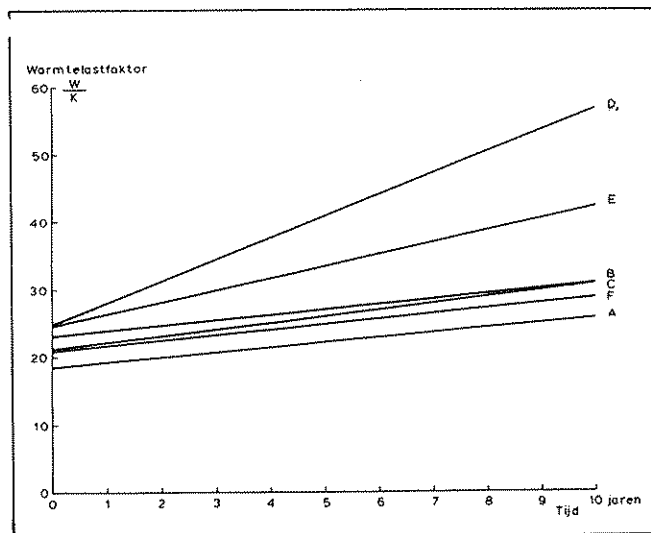
<sup>1)</sup> exclusief wateropname

<sup>2)</sup> inclusief wateropname

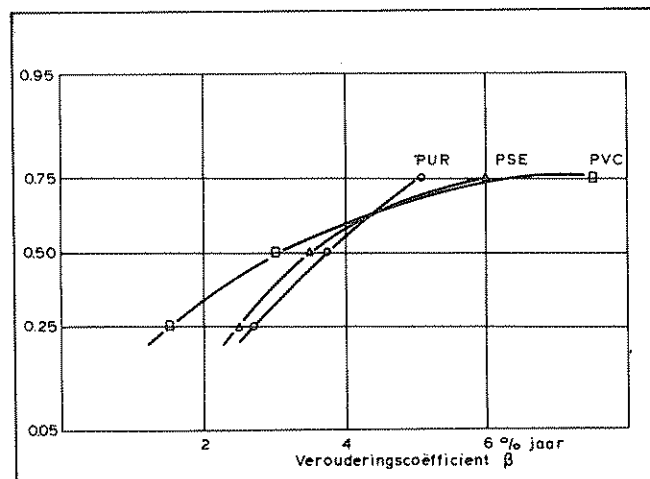
### Leeftijd

Deze correcties kunnen alleen aan de hand van experimentele resultaten van metingen over een reeks van jaren worden bepaald, en dus tot nu toe niet vooraf voor een nieuwe constructie. Dergelijke metingen zijn voor containers uitgevoerd met resultaten zoals weergegeven in fig. 14 en tabel 11.

Metingen aan geïsoleerde wegvoertuigen leverden een gemiddelde waarde van 4 à 5% per jaar (tabel 10). Uit de verdeling van deze waarden blijken echter grotere verschillen (fig. 15). Materiaalkeuze, constructie en slijtage door het gebruik bepalen de 'K'-waarde van een geïsoleerd voertuig tijdens bedrijf.



Figuur 14 Ontwikkeling van de warmtelastfactor  $K \times A$  van zes containertypen in een tijdsbestek van tien jaren



Figuur 15 Verdeling van de verouderingscoëfficiënt (%/jaar) voor de 'K'-waarde van wegvoertuigen gerangschikt per isolatiemateriaal

### Luchtlekkage

Voor het bepalen van luchtlekkage zijn eveneens standaard meetmethoden ontwikkeld. Hierbij wordt de luchtstroom gemeten voor het handhaven van een zekere overdruk in het laadruim (ISO, IIF-BTP). Deze methoden zijn geschikt om referentiewaarden te bepalen maar kunnen wederom geen gegevens verschaffen over de luchtlekkage tijdens bedrijf. De methode is echter zo eenvoudig, dat zij als routinemeting in het onderhoudsschema ingepast kan worden.

Bij het overschrijden van een zekere waarde moeten de lekopeningen worden opgespoord, bijvoorbeeld door middel van een rooktest en de dichtheid van deuren en luiken zonodig door bijstellen of vernieuwen van de afdichtingen verbeterd worden.

De luchtlekkage gehoorzaamt aan de algemene relatie.

**Tabel 11**

Temperatuur- en tijdcorrecties gemeten aan 6 container series

type	tijdcoëff.	temp. coëff.
	$\alpha$ jaar <sup>-1</sup>	$\beta$ °C <sup>-1</sup>
A	0,038	0,0123
B	0,032	0,0038
C	0,045	0,006
D	0,129	0,0142
E	0,070	0,0133
F	0,027	0,015

$$K_T = K_0 (1 + \alpha \tau + \beta t)$$

$K_0^+$  voor  $\tau = 0$  jaren en  $T = 0^\circ\text{C}$

$$\varnothing_L = \varnothing_{L,0} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right)^n \quad (2)$$

met:

symbool	omschrijving	eenheid
$\varnothing_L$	lekluchtstroom	m <sup>3</sup> /h
$\varnothing_{L,0}$	idem, test	m <sup>3</sup> /h
$\Delta P$	overdruk in de laadruimte	Pa
$\Delta P_0$	idem, test	Pa
n	exponent	—

Deze relatie is voor een aantal metingen in figuur 16 weergegeven. De metingen worden uitgevoerd met een overdruk tussen 250 Pa en 100 Pa.

Door omrekening op 10 of 12,5 Pa kan men een schatting voor de luchtlekkage tijdens bedrijf verkrijgen. Een beter gegeven levert de directe meting van de verdunning van een gemakkelijk te analyseren gas – CO<sub>2</sub> of ethyleen – in de laadruimte. Hierdoor kan de lekluchtstroom onder bedrijfsomstandigheden bij stilstand en tijdens de rit worden bepaald. Het blijkt dan, dat de luchtcirculatie veelal bepalend is en de rijsnelheid van ondergeschikte invloed.

Aan de hand van de resultaten van een dergelijke meting kan de correctie  $K_L$  van de 'K'-waarde worden gevonden volgens de vergelijking in het voorgaande hoofdstuk.

Een onderzoek aan 20 nieuwe 40' trailers in de USA leverde een gemiddelde testwaarde bij 250 Pa

$$\varnothing_L = 60 \pm 32,72 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} (P = 0,95) \text{ met } n = 0,69 \pm 0,2 (P = 0,95)$$

vergelijkbaar met een berekende operationele lekluchtstroom bij 12,5 Pa van  $7,6 \pm 4,2 \text{ m}^3/\text{h} (P = 0,95)$ .

Luchtlekkage kan een wezenlijke factor vormen in de warmtelast van een koelvoertuig. Een gemiddelde toename van 25% is niet ongewoon.

Constructie en onderhoud bepalen beide de luchtlekkage van een geïsoleerd vervoermiddel. Lekkage onder test-

omstandigheden verschilt in principe sterk van luchtlekkage tijdens bedrijf.

### Ventilatie – luchtverversing

Bij de verbetering van de lekdichtheid van geïsoleerde vervoermiddelen moet voor vervoer van levende lading meer aandacht worden geschonken aan de noodzakelijke luchtverversing. Hierbij moet immers de stofwisseling door aanvoer van zuurstof en afvoer van de stofwisselingsprodukten koolzuurgas en ethyleen in stand worden gehouden. Om onnodige warmtelast te voorkomen dient daarom de ventilatie-luchtstroom instelbaar te zijn.

Doelmatige luchtverversing in het gekoelde laadruim is gebonden aan het functioneren van de koelinstallatie in het bijzonder de luchtcirculatie en zal daar worden behandeld.

**Tabel 12**

Vermindering van de operationele specifieke warmtecapaciteit/waterwaarde (Wh/m<sup>2</sup>.K) van geïsoleerde voertuigen

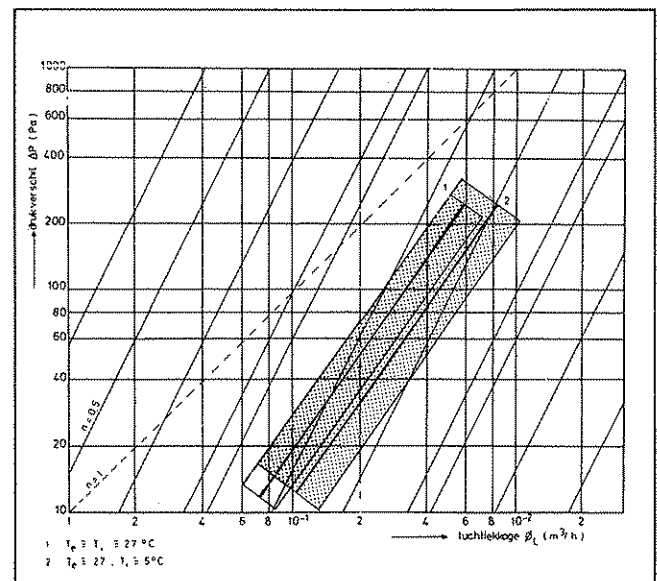
periode	spoorwagens	wegvoertuigen/containers
ca. 1920	16–8	
ca. 1950	10–4	7–4
ca. 1980	7–4	5–3

### Warmtecapaciteit

Het afkoelen van een geïsoleerde laadruimte kost extra energie. Dit moet zoveel mogelijk worden beperkt. De operationele warmtecapaciteit van koelvoertuigen is door ruimere toepassingen met metaal en kunststoffen en moderne constructiemethoden in de loop der jaren geleidelijk verminderd (tabel 12). Voor onderbroken koeibedrijf en geïsoleerd vervoer is het echter nog steeds nuttig om de warmtecapaciteit van het voertuig te kennen omdat aan de hand daarvan de energie- en tijdbehoefte voor afkoelen van de laadruimte kan worden beoordeeld tegen de achtergrond van opwarming van de lading.

De warmtecapaciteit kan eenvoudig worden bepaald uit de eerder genoemde methode voor de meting van de 'K'-waarde met inwendige opwarming bij constant vermogen (fig. 16). Zie ook het volgende hoofdstuk.

De warmtecapaciteit kan ook worden berekend uit de samenstelling van de constructie (tabel 13). Hierbij is van belang dat de binnenbekleding van het laadruim geheel, de iso-



**Figuur 16** Gemiddeld luchtlekkage van 17 nieuwe opleggers gemeten door de overdruktest bij  $T_0 = T_1 = 27^\circ\text{C}$  (1) en  $T_0 = 27; T_1 = 4^\circ\text{C}$  (2)

latie voor de helft en de buitenbekleding niet wordt gerekend.

#### 4.4.2 Energiehuishouding van een gekoeld voertuig

Het handhaven van een constante temperatuur in een laadruim vereist evenwicht tussen in- en uitgaande energiestromen. De energiehuishouding rond een koelvoertuig zal voor koel- en vriesbedrijf bij mechanische koeling worden beschreven.

Fig. 17 geeft een schematisch beeld van het koelvoertuig met de belangrijkste elementen.

Drie systemen zijn door hun begrenzingen aangeduid: **Systeem 1:** bevat de warmtestromen in (warmtelast) en uit (koelvermogen) die in evenwichtstoestand de temperatuur in het laadruim bepalen.

**Systeem 2:** bevat de mechanische koelinstallatie bestaand uit verbrandingsmotor – generator – electromotor – verdampers – condensor en de daarin omgaande energiestromen.

**Systeem 3:** bevat de systemen 1 en 2.

In het vervolg worden de drie systemen kort beschreven.

#### Systeem 1

De warmtebelasting van de gekoelde laadruimte bestaat uit:

- de warmtestroom door de geïsoleerde constructie, bepaald door K-waarde, oppervlak en temperatuurverschil tussen laadruim en omgeving. Door warmtestraling (zon en grond) kan de oppervlakte-temperatuur van de wanden tijdelijk hogere waarden bereiken, waardoor de warmtestroom door de isolatie toeneemt. Door de (rij)wind wordt dit effect afgevlakt.
- een luchtuitwisseling tussen laadruim en omgeving. Is dit ongewild dan spreekt men van lekkage. Doelbewust onderhouden is het: ventilatie. Dit aandeel in de warmtelast is meestal groter tijdens de rit en kleiner bij stilstand, zodat het effect van de warmtestraling gecompenseerd kan worden.
- warmteproductie van de lading. Dit is een eigenschap van levende ladingen met een zuurstof-koolzuurgas stofwisseling. Maar ook gevaarlijke ladingen zoals organische peroxyden produceren warmte.

De warmtelast wordt gebalanceerd door het koelvermogen. Voor mechanisch gedreven koelinstallaties wordt het netto koelvermogen aangegeven. Alle verliezen, zoals door de ventilator voor de luchtcirculatie en door montage elementen zijn op het opgewekte bruto koelvermogen in mindering gebracht.

In fig. 4 is het netto koelvermogen – koelvermogen vermindert met ventilatorvermogen en isolatieverliezen – voor de

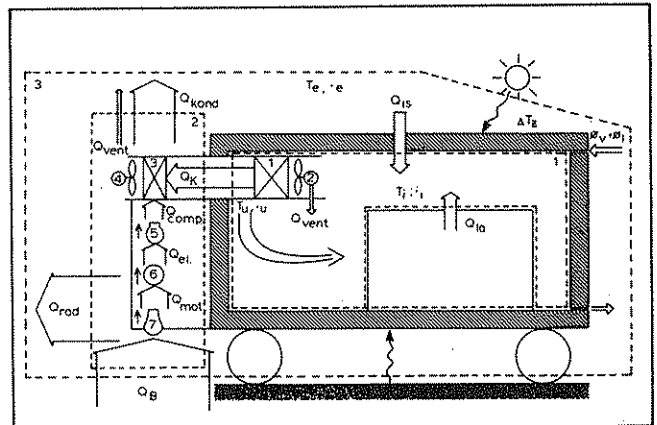
**Tabel 13**

Berekening van de warmtecapaciteit van een laadruimconstructie

element	oppervlakte materiaal		dikte	soort. massa	vlakte gew.	soort. warmte	massa	weeg fact.	warmte-cap
	m <sup>2</sup>		mm	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Wh/kgK	kg	–	Wh/K
bodemplaat	17	Al	3,5	2780	10	0,26	170	1	44,2
ondervloer	15	hout	15	800	12	0,50	180	1	90
bodemisolatie	15	PUR	100	60	6	0,53	90	0,5	24
wandbekleding	40	GVP <sup>1)</sup>	3	1500	4,5	0,40	180	1	72
wandisolatie	40	PVC	70	40	2,8	0,33	112	0,5	18,5
plafondbekleding	15	GVP	2	1500	3	0,40	45	1	18
plafondisolatie	15	PUR	120	40	4,8	0,53	72	0,5	18
									285
beschermprofiel	5	GVP	8	1500	4,5	0,4	22,5	1	9
									294
vleeshanginrichting		Al				0,26	200		52
		staal				0,13	200		26
									372

gemiddeld oppervlak 870 m<sup>2</sup>  
geïsoleerd volume 35 m<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> glasvezelversterkt polyester



**Figuur 17 Schematisch beeld van een mechanisch gekoeld voertuig met de drie systeemgrenzen voor de energiebalans**

koelinstallatie aangegeven: door middel van de temperatuurregeling wordt het beschikbare koelvermogen teruggebracht tot evenwicht met de warmtelast.

#### Systeem 2

Ingaande energiestroom is de motorbrandstof, uitgaand zijn de verliezen in de vorm van warmte: radiatorwarmte van de motor, omvormingsverliezen en mechanische verliezen bij generator, electromotor, compressor, ventilatoren, maar ook de condensatiewarmte van het koudemiddelcircuit. Terwijl de uitgaande en ingaande koudemiddelstroom elkaar compenseren tot het koelvermogen.

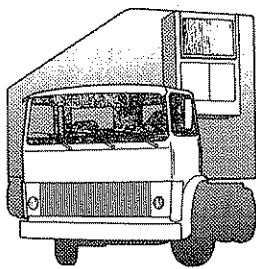
#### Systeem 3

Ten opzichte van het gehele koelsysteem inclusief de aandrijving worden toegevoerd:

- De motorbrandstof. Deze energie is door de onvermijdelijke rendementsverliezen een veelvoud van de benodigde mechanische energie voor de koelmachine. Bij elektrische aandrijving gaan de meest verliesrijke schakels ten koste van de energie-opwekking in een centrale.
- De warmtelast van de gekoelde ruimte door de isolatie heen en door ventilatie resp. lekkage.
- De afvalwarmte van de energie-opwekking in de aandrijfmotor.
- De condensatiewarmte van het koudemiddel in de kringloop.
- Het vermogen van de ventilator voor de condensor.

# Leergang

## Transport onder beheerste temperatuur



Curatorium:

H. F. Th. Meffert (vz.), Sprenger Instituut, Wageningen  
 P. C. Moerman (secr.), CIVO-Technologie TNO, Zeist  
 J. Bakker, NOB-Wegtransport, Rijswijk  
 J. H. Dijks, Stichting Vervoer en Havenopleidingen  
 W. M. Moret, EVO, Zoetermeer (tot en met 1983)  
 B. Kloosterman, Hoger Agrarisch Onderwijs, Utrecht (1984)

### Hoofdstuk 4 Grondslagen van het conditioneren in de transportketen (vervolg)

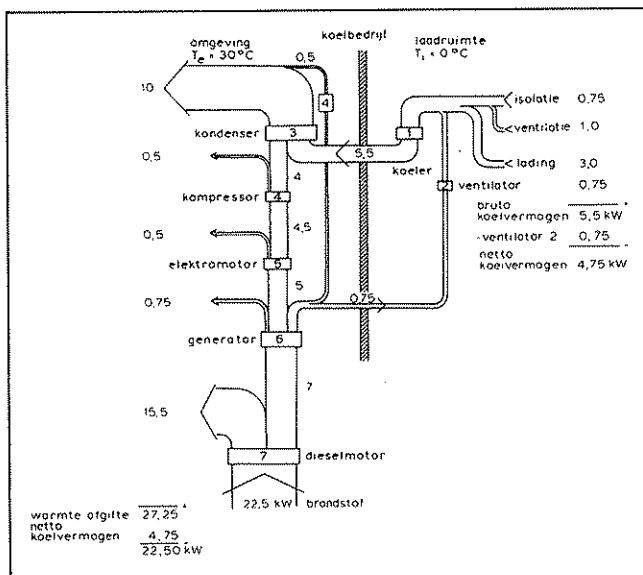
De energiestroomdiagrammen fig. 18 en fig. 19 geven een kwantitatieve indruk van de elementen in dit gebeuren. Opvallend is de ongunstige energiehuishouding rond de verbrandingsmotor. Door ruim gebruik te maken van elektrische energie overal waar dit mogelijk is wordt de energiebalans per voertuig veel gunstiger. Natuurlijk veroorzaakt de opwerking van de elektrische energie centraal ook de nodige ver-

liezen, maar de milieulast door de koelinstallatie wordt aanmerkelijk verminderd, reden om de electriciteitsvoorziening voor langer stilstaande koelvoertuigen algemeen te introduceren, bijv. op parkeerterreinen en op veerboten.

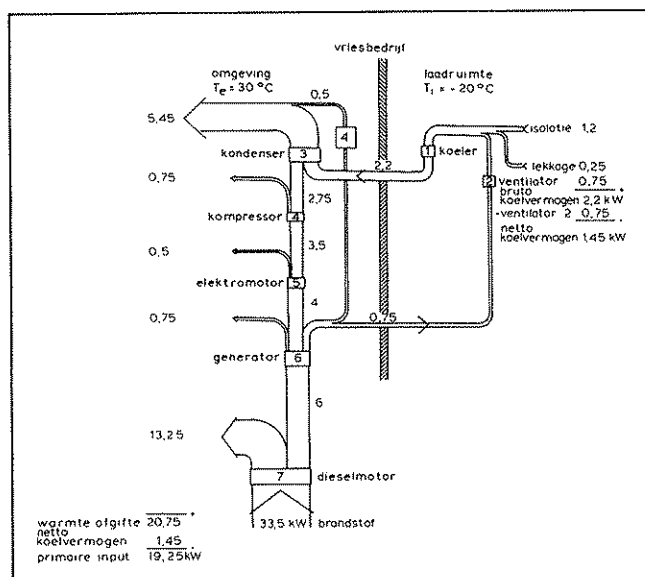
#### Literatuur

*International Institute of Refrigeration (IIR)*

- Proceedings of the 4th International Congress of Refrigeration. London, 1924, Vol. II, Section IV.
- Proceedings of the 14th International Congress of Refrigeration. Moscow, 1975, Vol. IV. Commission D2.
- Proceedings of the 15th International Congress of Refrigeration. Venice, 1979, Vol. IV. Commission D2.
- Proceedings of the 16th International Congress of Refrigeration. Paris, 1983, Vol. IV. Commission D2.
- Bulletin, Annexe 1978-4. Recent developments and trends in refrigerated transport. Vienna, 1978.
- Bulletin, Annexe, 1981-1. Developments in temperature controlled land transport. Prague, 1981.
- Bulletin, Annexe 1985-1. Long distance refrigerated transport: Land and sea. Rome, 1985.
- Technischer Überwachungsverein (TÜV) - Bayern, München. Besondere Beförderungsmittel für leicht verderbliche Lebensmittel
  - Teil 1, 1975
  - Teil 2, 1976
  - Teil 3, 1979
  - Teil 4, 1980
  - Teil 5, 1982
  - Teil 6, 1984



Figuur 18



Figuur 19

#### FOCWA

- De keten gesloten, deel 1 en 2. Oegstgeest, 1983.

#### DIN 8959-1982

- Prüfung von besonderen Beförderungsmitteln für leicht verderbliche Lebensmittel.
- Methods of measurement of the insulation and gastightness of insulated bodies for transport of perishable foodstuffs. Paris, 1970.
- Comparative tests of an insulated vehicle. Paris, 1970.

#### ASHRAE

- Handbook, Fundamentals, Chapter 19: thermal insulation and water barriers, p. 21-22.
- Handbook, Applications, Chapter 44: Trucks, Trailers, and Containers.

#### USDA

- Handbook 195. Protection of rail shipments of fruit and vegetables. Washington D.C., 1961.
- Handbook 105. Protecting perishable foods during transport by motor truck. Washington D.C., 1970.

## 4.5 Berekeningsgrondslagen

### 4.5.1 Conditioneren van het laadruim

#### 4.5.1.1 Koelen en verwarmen

##### Warmtebelans in evenwichtssituaties

De berekening van de behoefte aan koeling of verwarming voor een laadruimte van een voertuig is nodig om een juiste keuze te doen uit het grote aanbod van conditionerings-aggregaten. Vooral de juiste bepaling van de koel- of verwarmingscapaciteit is van belang voor een probleemloos functioneren van een geconditioneerd voertuig. Voordat een eenvoudige en algemeen bruikbare vergelijking wordt afgeleid om het koel- of verwarmingsvermogen te berekenen, worden eerst de factoren besproken die van belang zijn.

##### Instraling

Hiermee wordt de warmtestroom aangeduid die door de wanden van het laadruim van een vervoermiddel stroomt. De warmtestroom is rechtevenredig met het temperatuurverschil tussen de omgeving en het laadruim. Als het temperatuurverschil in plaats van 10°C toeneemt tot 20°C dan wordt de instralingswarmte 2 maal groter.

Ogenschijnlijk lijkt de bepaling van het temperatuurverschil weinig problemen te geven, omdat voor alle gebieden in de wereld gemiddelde, hoogste en laagste temperatuur bekend zijn. De temperatuur is evenwel de luchttemperatuur zodat met effecten als stralingswarmte geen rekening gehouden wordt. Dat zonnestraling oppervlakken danig verwarmt, is algemeen bekend. Het asfalt van een verkeersweg wordt zo heet op een zonnige dag, dat door de warmtestraling van de verkeersweg de onderzijde van de laadruimte van een vrachtwagen merkbaar in temperatuur oploopt.

Door het invoeren van een effectieve buitentemperatuur, ook wel de zonnetemperatuur genoemd, is het mogelijk gebleken met stralingseffecten rekening te houden.

De instralingswarmte is uiteraard ook evenredig met het totale oppervlak van de wanden van het laadruim. Bij voertuigen rijst de vraag of het uitwendig of inwendig oppervlak van het laadruim genomen moet worden. Het is dan gebruikelijk het meetkundig gemiddelde te gebruiken.

Verder wordt de instralingswarmte bepaald door de isolerende werking van het materiaal in de wanden van het laadruim. De aard en dikte van het materiaal kunnen in de zogenaamde  $K$ -waarde verrekend worden. De  $K$ -waarde van het laadruim van een voertuig is groter naarmate de isolerende werking geringer is. Een kleine  $K$ -waarde wijst op een goede isolatie. De instralingswarmte wordt berekend met vergelijking 1, waarin bovengenoemde elementen duidelijk herkenbaar zijn:

$$Q_{in} = K \cdot A \cdot (T_{buiten} - T_{laadruim}) \quad (1)$$

Het oppervlak  $A$  waardoor de warmte stroomt volgt uit het meetkundig gemiddelde van inwendig en uitwendig oppervlak:

$$A = \sqrt{A_{inwendig} \cdot A_{uitwendig}} \quad (2)$$

De correctie van de buitentemperatuur, als de zon schijnt, volgt uit:

$$T_{zon} = T_{buiten} + \frac{\epsilon \cdot J}{\alpha} \quad (3)$$

De warmtestroomdichtheid  $J$  als gevolg van de zonnestraling is afhankelijk van de stand van de zon.

De globale straling te De Bilt op een horizontaal oppervlak varieert van 24 W/m<sup>2</sup> in december tot 212 W/m<sup>2</sup> in juni. De maximaal mogelijke warmtestroomdichtheid is ongeveer 1000 W/m<sup>2</sup>. De absorptiecoëfficiënt  $\epsilon$  van oppervlakken die

niet spiegelend en schoon zijn, is ongeveer 0,86. Dit wil zeggen dat 86% van de invallende straling door een wand wordt opgenomen en in warmte omgezet, terwijl 14% wordt gereflecteerd.

De warmte-overdrachtscoëfficiënt  $\alpha$  is vooral afhankelijk van de luchtstromsnelheid langs de wand. Een aardige vuistregel is:

$$\alpha = 6 + 4 \cdot v \quad (4)$$

De zonnetemperatuur op het dak van een container die staat op een zonnige dag in Nederland is bijvoorbeeld 48,3°C als de windsnelheid  $v = 0$  m/s en de warmtestroomdichtheid  $J = 200$  W/m<sup>2</sup> is.

De  $K$ -waarde van de wand van een laadruim is afhankelijk van de dikte  $x$  en de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  van het materiaal en de warmte-overdrachtscoëfficiënten aan binnen- en buitenzijde:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{buiten}} + \sum \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{binnen}}} \quad (5)$$

Voor geïsoleerde wanden mag de invloed van de warmte-overdrachtscoëfficiënten verwaarloosd worden, zodat de vergelijking voor één materiaalsoort wordt:

$$K = \frac{\lambda}{x} \quad (6)$$

De dikte  $x$  van een goede isolerende wand is bijvoorbeeld 20 cm zodat de  $K$ -waarde  $0,02/0,2 = 0,1$  W/(m<sup>2</sup> K) is, als de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda = 0,02$  W/(m K).

Lage  $K$ -waarden zijn nodig om temperatuurverschillen in het laadruim klein te houden, vooral wanneer de lading als koudebrón op moet treden.  $K$ -waarden spelen een belangrijke rol bij internationale afspraken. Het ATP eist een  $K$ -waarde kleiner dan 0,4 W/(m<sup>2</sup>·K) voor het internationale vervoer van bevroren levensmiddelen.

##### Warmteproductie

Een grote groep van agrarische producten wordt in levende toestand vervoerd.

Zij vertonen een stofwisseling en produceren warmte. Ook chemische stoffen, zoals bijvoorbeeld peroxiden, produceren warmte. Bij levende producten is de geproduceerde warmte feitelijk een afvalproduct dat vrijkomt bij de processen waarmee het organisme zich in leven houdt.

De warmteproductie  $q$  is meestal uitgedrukt in W/ton en is vooral afhankelijk van de temperatuur. De warmteproductie van een mens in rust is ongeveer 1000 W/ton, gelijk bijvoorbeeld aan die van spinazie bij 30°C.

De warmteproductie van de meeste verse plantaardige producten wordt minder als de kooldioxideconcentratie in de lucht toeneemt.

Bij 3% CO<sub>2</sub> is de warmteproductie nog slechts de helft van de normale waarde. Pas beneden 8% heeft zuurstof duidelijke invloed op de warmteproductie.

Ethyleen is een gasvormig hormoon dat door tuinbouwproducten zelf geproduceerd wordt, maar dat ook voorkomt in de uitlaatgassen van verbrandingsmotoren.

Ethyleen heeft de eigenschap, vooral bij temperaturen boven 4°C, de warmteproductie te verhogen.

De massa produkt in een laadruim is, bij volledige benutting van de ruimte, afhankelijk van de stapeldichtheid van het produkt. Voor boerenkool is de ladingsdichtheid slechts 114 kg/m<sup>3</sup> terwijl tulpebollen 617 kg/m<sup>3</sup> halen.

De warmteproductie in een laadruim, met meerdere producten gevuld, volgt dus uit:

$$Q_{produktie} = \sum (m \cdot q) \quad (7)$$

## Ventilatie

Een laadruimte heeft altijd openingen die in verbinding staan met de omgeving. Deze openingen zijn of met opzet aangebracht, om bijvoorbeeld de ophoping van schadelijke gassen te voorkomen of zijn ondanks de zorgvuldige constructie aanwezig. In het eerste geval spreekt men van ventilatie-openingen, meestal twee, en in het laatste geval van lekopeningen. Door deze openingen stroomt buitenlucht de laadruimte in en vormt daarom een belasting voor de koeling of de verwarming. De belasting hangt af van het verschil tussen de warmte-inhoud (enthalpie) van de buitenlucht en de lucht in de laadruimte.

De warmte-inhoud  $h$  van vochtige lucht is af te lezen in een  $h,x$ -diagram of in tabellen. De warmte-inhoud van lucht met een temperatuur van 25°C en een relatieve vochtigheid van 60% is bijvoorbeeld 55 kJ/kg en bij 4°C en 90% slechts 16 kJ/kg (tabel 14).

De ventilatiehoeveelheid  $\dot{V}$  hangt af van de afmetingen van de ventilatie-openingen, de plaats ervan en de drukverschillen over de diverse openingen: Een rijdend voertuig vertoont meestal meer ventilatie dan een stilstaand voertuig.

De ventilatiehoeveelheid varieert in de praktijk tussen 0,01 en 0,001 m<sup>3</sup>/s, hetgeen overeenkomt met een ventilatievoud  $VV$  van 0,1 en 1 per uur voor een laadruim met een volume van 37,5 m<sup>3</sup> (6 m x 2,5 m x 2,5 m). Het ventilatievoud is gelijk aan het quotiënt van ventilatiehoeveelheid en leeg volume van het laadruim:

$$VV = \frac{\dot{V}}{V} \quad (8)$$

De belasting door ventilatie is dus:

$$Q_{\text{ventilatie}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot (h_{\text{omgeving}} - h_{\text{laadruim}}) \quad (9)$$

De dichtheid  $\rho$  van lucht is ongeveer 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabel 14**

Warmte-inhoud (enthalpie) van vochtige lucht (Wh/kg)

temp. °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$h$ (Wh/kg) bij relatieve luchtvochtigheid					$x$ kg/kg
		0	0,6	0,9	1		
40	1,13	11,2	31,3	41,3	45,6	0,0484	
30	1,16	8,4	20,1	25,8	28,3	0,0272	
20	1,25	5,6	11,9	15,1	16,2	0,0147	
10	1,25	2,8	6,07	7,78	8,35	0,00763	
0	1,29	0	1,66	2,44	2,67	0,00378	
-20	1,40	-5,6	5,17	5,07	5,01	0,00063	

## Ventilatorvermogen

De ventilatoren in het luchtkanaalsysteem van een laadruim brengen de lucht in beweging zodat de af- of aanvoer van warmte in de laadruimte naar de luchtbehandelingsinstallatie, de koeler bijvoorbeeld, voldoende snel geschiedt. De ventilator verzorgt de circulatie van lucht in het laadruim. Het ventilatorvermogen wordt omgezet in luchtstroom en drukverschil. Bijna alle energie die gebruikt wordt om de ventilatoren aan te drijven, komt uiteindelijk vrij als warmte in het laadruim.

Als de relatieve draaitijd  $n$  van de ventilatoren bekend is, ligt tussen 0 en 1, dan is het ventilatorvermogen (= circulatie):

$$Q_{\text{circulatie}} = \text{luchtstroom} \times \text{drukverschil} = n \cdot N_{\text{vent}} \quad (10)$$

## Koel- of verwarmingsvermogen

De luchtbehandelingsinstallatie koelt de lucht van het laadruim af als sprake is van gekoeld transport. Het koelvermogen van een luchtkoeler is evenredig met de verandering van de warmte-inhoud van de lucht die door de koeler stroomt en evenredig met de luchthoeveelheid.

$$Q_{\text{koelvermogen}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{uit}}) \quad (11)$$

Het koelvermogen van een luchtkoeler hangt vooral af van de constructie van de koeler, het temperatuurverschil tussen laadruimlucht en koudemiddel (meestal 5 tot 15°C), de aanwezigheid van een ijslaag op het oppervlak van de koeler en de daarmee samenhangende luchtstroom door de koeler.

## Warmtestroombalans

De bepaling van het koel- of verwarmingsvermogen of één van de andere behandelde warmtestromen, is mogelijk met behulp van een warmtebalans. Een warmtebalans over de lucht in het laadruim zegt dat de som van de warmtestromen die naar de lucht toegaan even groot is als de som van de warmtestromen die de lucht verlaten:

$$\Sigma Q_{\text{stromen in}} = \Sigma Q_{\text{stromen uit}} \quad (12)$$

Er ontstaat met deze werkwijze een vergelijking met, als het goed is, één onbekende, bijvoorbeeld het koelvermogen. Het enige probleem is om een goede schatting te krijgen van de waarde van de andere warmtestromen en geen vergissingen te maken met het teken, positief of negatief, van de warmtestromen. Het gebruik van de warmtebalans zal met enkele voorbeelden toegelicht worden.

## Koeling door ventilatie

Deze koelmethode is één van de oudst bekende mogelijkheden om bederfelijke produkten te beschermen tegen verrotting en vroegtijdig bederf.

Zodra de buitentemperatuur lager is dan de produkttemperatuur wordt buitenlucht tot het laadruim toegelaten. In dit voorbeeld wordt de benodigde ventilatieluchtstroom berekend om een container gevuld met bloembollen op een constante temperatuur van 20°C te houden. De temperatuur van de buitenlucht is 16°C zodat door de wanden van de container een warmtestroom optreedt die naar buiten toe gericht is:  $Q_{\text{instraling}} = KA(T_{\text{in}} - T_{\text{uit}}) = 120(20 - 16) = 480$  W. De warmtefactor voor deze container is  $KA = 120$  W/K. Een ventilator zuigt koude buitenlucht aan en perst de lucht door de lading naar de ventilatie-uitlaat. Het ventilatorvermogen is 1100 W en dit resulteert in een warmtestroom gericht naar de lucht in de container van 1100 W.

Een tweede warmtestroom gericht naar de lucht in de container is de warmteproductie van de bloembollen. De lading bestaat uit 20 ton bloembollen waarvan de warmteproductie 70 W/ton is.

De warmtestroom als gevolg van de ademhalingsactiviteit van het produkt is  $Q_{\text{produktie}} = 70 \cdot 20 = 1400$  W. De tweede warmtestroom die gericht is van container naar omgeving wordt veroorzaakt door de ventilatie. De koude buitenlucht neemt warmte op uit de warmere lading. Deze warmtestroom moet berekend worden en is dus de onbekende factor in de warmtebalans.

$$\Sigma Q_{\text{in}} = \Sigma Q_{\text{uit}} \quad (13)$$

$$Q_{\text{ventilatorvermogen}} + W_{\text{warmteproductie}} = Q_{\text{instraling}} + Q_{\text{ventilatie}}$$

of

$$Q_{\text{ventilatie}} = 1100 + 1400 - 480 = 2020 \text{ W.}$$

De koude buitenlucht voert 2020 W af uit de container als daarin de temperatuur precies 20°C blijft. De daarvoor benodigde luchthoeveelheid is eenvoudig te berekenen als de dichtheid en soortelijke warmte van lucht bekend zijn:

$$Q_{\text{ventilatie}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{uit}}) \quad (14)$$

of na hergroeperen

$$\dot{V} = \frac{Q_{\text{ventilatie}}}{\rho \cdot c \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{uit}})} = \frac{2020}{1005 \cdot 1,2 \cdot 4} = 0,42 \text{ m}^3/\text{s} = 1500 \text{ m}^3/\text{uur}$$

De ventilator dient dus 1500 m<sup>3</sup>/uur buitenlucht van 16°C door de container te persen om de temperatuur in de container op 20°C te houden. Bij deze berekening is geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat de bloembollen vocht kunnen afgeven. Vochtafgifte is, vanwege de verdampingswarmte van water, te beschouwen als een negatieve warmteproductie. Indien de vochtafgifte zo groot is dat de verdampingswarmte precies 1400 W is, dan is de effectieve warmteproductie van de bloembollen 0 W. De effectieve warmteproductie is de ademhalingswarmte verminderd met de verdampingswarmte en normaal gesproken is de effectieve warmteproductie de helft van de ademhalingswarmte. Bij zeer lage relatieve vochtigheden kan de vochtafgifte zo groot zijn dat de effectieve warmteproductie negatief is.

Onder bepaalde praktijkomstandigheden is dus  $Q_{\text{warmteproductie}} = 0$  W, maar ook  $Q_{\text{ventilatorvermogen}} = 0$  W als de ventilator de buitenlucht door de lading zuigt. De minimale warmtestroom de container uit als gevolg van ventilatie is dan:

$$Q_{\text{ventilatie}} = Q_{\text{ventilatorvermogen}} + Q_{\text{warmteproductie}} - Q_{\text{instraling}} = 0 + 0 - 480 = -480 \text{ W.}$$

Het negatief zijn van  $Q_{\text{ventilatie}}$  duidt erop dat er beter niet geventileerd kan worden omdat de lading dan zal afkoelen. Maar als er niet geventileerd wordt is er geen vochtafgifte en warmte de lading op als gevolg van de warmteproductie (= 1400 W) van de bloembollen. De ventilator moet dus voortdurend aan/uit geschakeld worden waarbij de aan/uit verhouding  $480/1400 = 0,34$  is. De looptijd van de ventilator is dus 34%.

### Koeling met waterijs

Het bestaan van ijskelders bij kastelen, burchten en oude steden bewijst dat deze koelmethode eeuwenlang is gebruikt. Het principe berust op de eigenschap dat ijs smelt als warmte aan het ijs wordt toegevoerd. De smeltwarmte van ijs bedraagt  $s = 333$  kJ/kg. Tegenwoordig wordt deze koelmethode nog veel gebruikt bij de spoorwegen. De vraag is nu hoeveel ijs nodig is om een spoorwagon met bloemkool gedurende 3 dagen te voorzien van waterijskoeling. Voor de oplossing is het opstellen van een warmtebalans over de lucht in de spoorwagon onvermijdelijk. Enkele warmtestromen komen de lucht in; namelijk  $Q_{\text{instraling}}$  want de buitentemperatuur is 15°C en in de spoorwagon heerst een voor bloemkool redelijke bewaartemperatuur van 5°C. De warmtefactor  $KA = 35$  W/K zodat  $Q_{\text{instraling}} = 35(15-5) = 350$  W. De lucht in de spoorwagon wordt voortdurend verversd met buitenlucht om de kooldioxide-concentratie van de lucht rondom de bloemkolen niet boven 1% te laten uitkomen. Met behulp van een kooldioxidebalans is berekend dat de ventilatiehoeveelheid  $\dot{V} = 27$  m<sup>3</sup>/uur =  $7,5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s dient te zijn. Met deze luchthoeveelheid komt warmte de spoorwagon ingestroomd:

$$Q_{\text{ventilatie}} = \dot{V} \rho (h_{\text{uit}} - h_{\text{in}}) \quad (15)$$

De enthalpie (warmte-inhoud) van buitenlucht met temperatuur 15°C en relatieve vochtigheid 60% is  $h_{\text{uit}} = 32$  kJ/kg; voor de lucht in de spoorwagon,  $T = 5^\circ\text{C}$  en  $\phi = 90\%$ , is de enthalpie  $h_{\text{in}} = 17$  kJ/kg.

$$Q_{\text{ventilatie}} = 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25 \cdot (32-17) = 0,14 \text{ kW} = 140 \text{ W.}$$

De laatste  $Q_{\text{in}}$  (warmtestroom naar de lucht in spoorwagon) is de ademhalingswarmte van 15 ton bloemkool. De warmteproductie bij 5°C is 100 W/ton zodat  $Q_{\text{warmteproductie}} = 1500$  W. De bovengenoemde drie warmtestromen moeten door het waterijs opgenomen worden:

$$Q_{\text{waterijs}} = Q_{\text{warmteproductie}} + Q_{\text{instraling}} + Q_{\text{ventilatie}} + Q_{\text{ventilatorvermogen}} = 1500 + 350 + 140 + 750 = 2740 \text{ W.}$$

De factor  $Q_{\text{ventilatorvermogen}}$  is een praktische noodzakelijkheid omdat een ventilator de lucht door het ijsbed en de bloemkolen moet persen. De benodigde hoeveelheid ijs volgt uit de smeltwarmtebalans:

$$\Delta m / \Delta t = \frac{Q_{\text{waterijs}}}{s} \quad (16)$$

Invullen van de smeltwarmte van ijs en de gevonden  $Q_{\text{waterijs}}$  geeft aan dat een behoorlijke hoeveelheid ijs meegevoerd moet worden:

$$\Delta m / \Delta t = 2740 / 333000 = 8,23 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} = 30 \text{ kg ijs/uur.}$$

Er is dus meer dan 2 ton ijs nodig om 15 ton bloemkolen 3 dagen te vervoeren in een spoorwagon. Voor een goede koelwerking van de ijsbunker is doorgaans een minimum vulling van 300 kg gewenst. Er is dus  $30 \cdot 24 \cdot 3 + 300 = 2460$  kg waterijs nodig.

Bij koeling met vloeibare stikstof of koolzuurijs verschilt de warmtebalans niet ten opzicht van koeling met waterijs. Alleen de omvormingswarmte voor koolzuurijs en vloeibare stikstof verschilt. Voor koolzuurijs en vloeibare stikstof is de omvormingswarmte 619 kJ/kg respectievelijk 414 kJ/kg. Verdere gegevens vindt u in tabel 2.

**Tabel 2**

Gegevens van vloeibare stikstof, koolzuurijs en waterijs van belang bij gebruik als koelmedium

koelmedium	latente warmte kJ/kg	temperatuur °C	dichtheid vloeistof of vaste stof kg/m <sup>3</sup>
kooldioxide = koolzuurijs	619	-78,5	1500
vloeibare stikstof			
0 bar, °C	403	-196	815
2,5 bar, °C	400	-184	755
5 bar, °C	385	-177	720
waterijs	333	0°C	930

symbol	eenheid	grootheid
a	1/h	constante
A	m <sup>2</sup>	oppervlak
b	K/h	constante
c	J/(kg K)	soortelijke warmte
h	J/kg of Wh/kg	enthalpie
J	W/m <sup>2</sup>	warmtestroomdichtheid
K	W/(m <sup>2</sup> K)	K-waarde
m	ton of kg	massa
n	—	relatieve draaitijd
n	—	aantal stops
N	W	vermogen
q	W/ton	warmteproductie
Q	W	warmtestroom
s	J/kg	latente warmte
t	s of h (= uur)	tijd
T	°C	temperatuur
v	m/s	luchtsnelheid
V	m <sup>3</sup>	volumen
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	volumestroom
$\dot{V}\dot{V}$	m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> .h)	ventilatievoud
x	m	dikte
x	kg/kg	absolute vochtigheid
$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	warmte-overdrachtscoëfficiënt
$\epsilon$	—	absorptiecoëfficiënt
$\Sigma$	—	sommeringsteken
$\theta$	°C/°C	dimensieloze temperatuur
$\lambda$	W/(m K)	warmtegeleidingscoëfficiënt
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid
$\nu$	h	tijdconstante
$\phi$	%	relatieve vochtigheid