

Ondichtheden in de wanden van koude ruimten

Het meten van luchtlekken

C. H. M. Machielsen*

In dit artikel zal worden ingegaan op de meetresultaten en ervaringen opgedaan bij het toepassen van de stationaire over- en onderdrukmethode en de niet-stationaire tracergasmethode voor het bepalen van de lekkarakteristiek van koel- en vriesopslagplaatsen. Deze luchtlekkagemetingen vormen een onderdeel van het project 'Optimalisatie Koel- en Vrieshuizen' van het Laboratorium voor Koudetechniek en Klimaatregeling van de Technische Hogeschool te Delft en dienden ter ondersteuning van de theoretische analyse van het gedrag van lekopeningen in gekoelde bewaarplaatsen [1].

Met welk doel willen we de luchtlekkage meten?

Doel van de meting kan zijn:

- 1 Vaststellen of de lekdichtheid van de koude ruimte aan de gestelde eisen voldoet; bijvoorbeeld *garantiemetingen*
- 2 Informatie verkrijgen over de aard en de grootte van de *lekopeningen*
- 3 Gegevens verkrijgen over de mate van *luchtuitswisseling* met de omgeving.
principe geeft de lekkarakteristiek: $\dot{V} = f(\Delta p)$, bepaald volgens de stationaire over/onderdrukmethode, in al deze gevallen, voldoende informatie.

Voor het verkrijgen van inzicht in het gedrag van de totale lekopening (geval 1 en 2) geeft Van Hiele [2] de volgende meetmethoden:

- stationaire lekstroommeting
- niet-stationaire lekstroommeting.

Beide methoden kunnen zowel met over- als onderdruk worden uitgevoerd.

Bij onze metingen hebben we gekozen voor de stationaire lekstroommeting en wel om de volgende voordelen: korte meettijd, invloeden van wind en schoorsteeneffect verwaarloosbaar en geen beïnvloeding door de elasticiteit van de constructie. Een nadeel is dat een nauwkeurige meting van de luchtstroom nodig is. Voor het direct meten van luchtlekkage onder heersende omstandigheden (geval 3) kan men o.a. gebruik maken van de niet-stationaire tracergasmethode.

Stationaire lekstroommeting

figuur 1 is het principe van de stationaire overdrukmeting schematisch weergegeven. De benodigde apparatuur bestaat uit:

- een ventilator;
- een volumestroommeter;
- een overdrukbeveiliging;
- een micromanometer voor drukverschilmeting.

De meetresultaten moeten leiden tot een verband tussen het drukverschil over de koelruimtwand en de luchtstroom. Uit het oogpunt van normering delen we de luchtstroom door het totale wandoppervlak van de koelruimte, hetgeen resulteert in de zgn. specifieke lekstroom. De presentatie is het duidelijkst in de vorm van een grafiek op dubbellogaritmisch papier waarbij het drukverschil is uitgezet als functie van de specifieke lekstroom (zie figuur 2).

- Bij het uitvoeren van de stationaire lekstroommeting heeft men te maken met de volgende punten:
- keuze tussen over- of onderdruk;
 - plaatsbepaling luchtdoorlaat;
 - bepaling maximum toelaatbaar drukverschil en beveiliging;
 - keuze van ventilator en meetapparatuur;

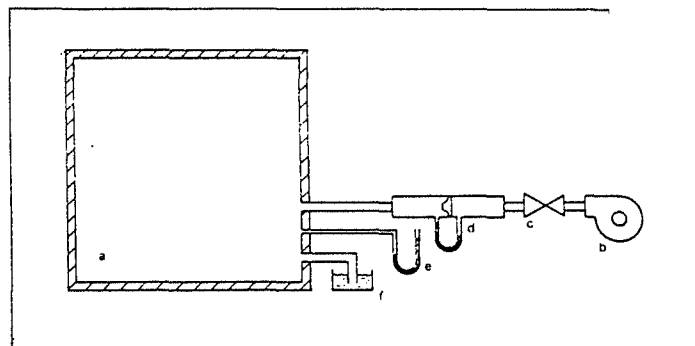


Fig. 1 Meetopstelling voor lekmetingen met de stationaire overdrukmethode

- a te meten koude ruimte
- b ventilator
- c smooftafsluiter voor regeling drukverschil
- d meetflens voor luchtdebietmeting
- e micro-manometer voor drukverschilmeting
- f beveiliging d.m.v. waterslot

— bepaling van statisch drukverschil over de wand en stuwdruk op de wand t.g.v. wind.

Over- of onderdruk?

Voor het meetprincipe maakt het geen verschil of over- of onderdruk wordt toegepast. In verband met het optreden van een sterke onderdruk bij het afkoelen van een ruimte die buiten gebruik is geweest, is de bouwconstructie vaak beter bestand tegen onderdruk.

Nadeel van het meten met onderdruk is echter dat de meetapparatuur voor debietmeting in contact komt met koude lucht hetgeen condensatie van waterdamp in de meetleidingen kan veroorzaken. Ook de lagers van de ventilator worden sterk afgekoeld waardoor de smering in gevaar komt.

Plaatsbepaling luchtdoorlaat

In verband met de luchtweerstand van de leidingen moet de luchtdoorlaatopening niet meer dan één meter boven de begane grond verwijderd zijn en liefst op een plaats die gemakkelijk bereikbaar is per voertuig. Dit laatste in verband met vervoer en plaatsing van de ventilator (zie figuur 4). Indien geen extra door-

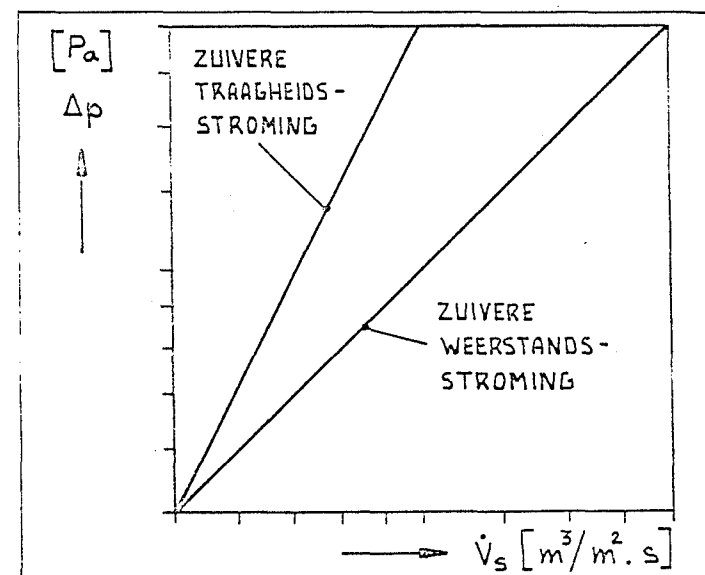


Fig. 2 Karakteristieken voor weerstands- en traagheidsstroming

* Ing. C. H. M. Machielsen, Lab. voor Koudetechniek, TH Delft

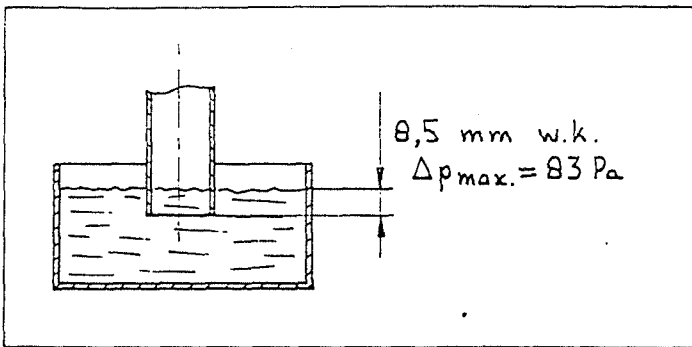


Fig. 3 Beveiliging tegen te grote overdruk d.m.v. een waterslot

voeringen in de wanden mogen worden aangebracht, moet worden uitgegaan van bestaande openingen, zoals vluchtluiken en de plaats waar zich normaal de overdrukbeveiliging bevindt.

Maximum toelaatbaar drukverschil en beveiliging

Het maximaal toelaatbare drukverschil kan berekend worden door uit te gaan van de zwakste schakel in de constructie nl. de plafondconstructie. Het plafond is vaak opgehangen aan een latenconstructie waarbij het eigen gewicht bepalend is voor het maximum drukverschil.

Voorbeeld:

200 mm polystyreeschuim met een massa van $10,4 \text{ kg/m}^2$ correspondeert met een drukverschil van $\Delta p = 10,4 \times 9,8 = 102 \text{ Pa}$.

Om het vrieshuis tegen een te grote over- of onderdruk te beschermen wordt gebruik gemaakt van een waterslot met grote doorlaat (zie figuur 3). Deze methode is eenvoudig en betrouw-

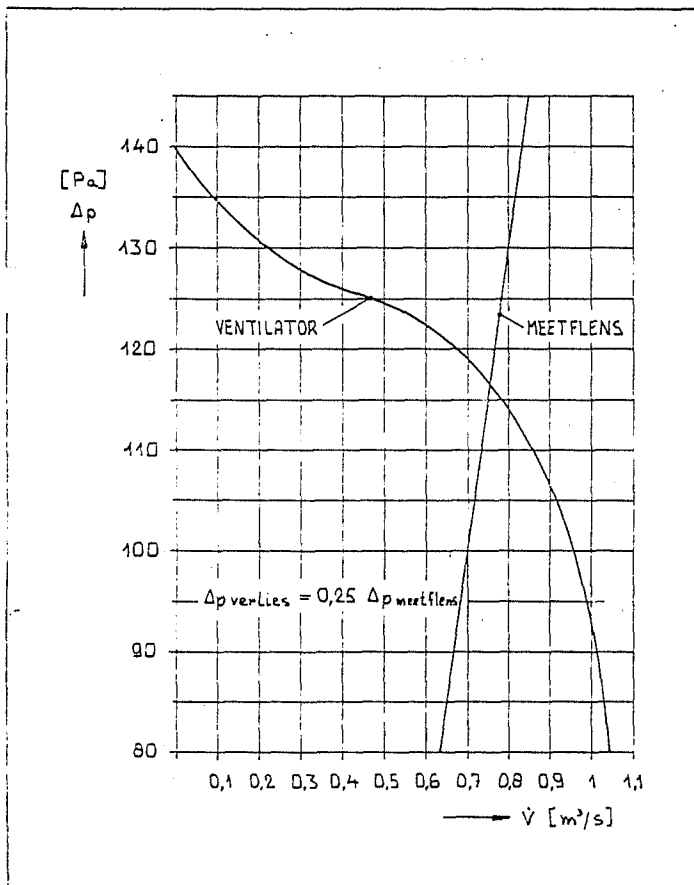


Fig. 5 Ventilator- en meetflens karakteristiek

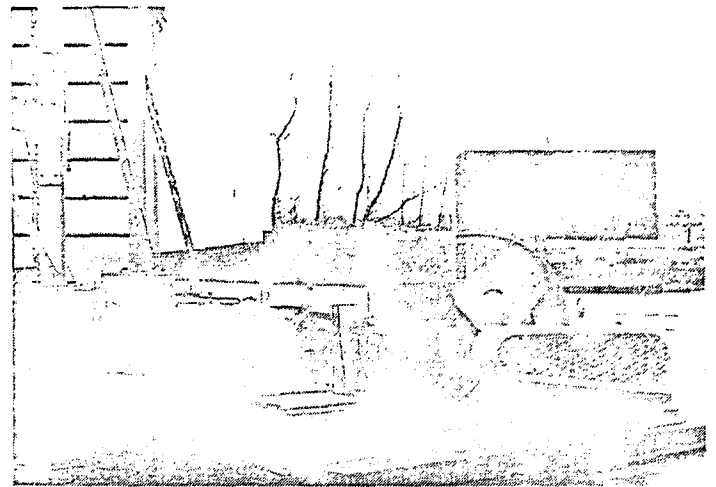


Fig. 4 Meetopstelling voor lekmetingen met de stationaire onderdruk methode

baar, mits het waterniveau goed is ingesteld en periodiek wordt gecontroleerd.

Keuze van ventilator en meetapparatuur

De te verwachten lekstroom bij maximaal toelaatbare Δp is in ons geval berekend op grond van meetresultaten van een overdrukproef bij een modelkoelruimte in het laboratorium.

Gegevens modelkoelruimte [6]:

- afmetingen: $4,88 \times 2,26 \times 2,26 \text{ m}$
- wanddikte: 100 mm
- $\Delta p = 70 \text{ Pa} \rightarrow \dot{V}_s = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

Voor een vrieshuis met hetzelfde wandmateriaal maar met dubbele wanddikte en een totaal wandoppervlak van 5500 m^2 bedraagt de geschatte volumestroom:

$$\dot{V} = 5500 \times 2,5 \cdot 10^{-4} / 2 = 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

Voor de volumestroommeting kan een meetflens worden toegepast (zie figuur 4).

Het drukverschil over de meetflens is een maat voor de volumestroom en wordt gemeten met een U-buismanometer. Om tot de keuze van een type ventilator te komen moet men behalve de volumestroom ook het optredende drukverlies kennen. Dit laatste wordt in hoofdzaak bepaald door het drukverlies van de meetflens. Voor het type meetflens dat hier gebruikt is, bedroeg dit ca 25% van de meetdruk. In verband met de grote drukval is gekozen voor een ventilator van het centrifugaal type. Meetflens- en ventilatorkarakteristiek zijn weergegeven in fig. 5.

Statische druk en stuwdruk

Voor het meten van het drukverschil tussen de statische druk binnen en buiten de koelruimte zijn de uiteinden van de meetleidingen van een T-stuk voorzien. Hierdoor ontstaat aan de binnenkant een laminaire grenslaag langs de pijpwand en nadert het aandeel van de stuwdruk in het midden bij het meetpunt tot nul (zie figuur 6). De wind-invloed mag tijdens de meting niet te groot zijn. Om het effect hiervan te controleren meten wij de stuwdruk op elke zijwand t.o.v. de statische druk buiten. Als maximum grens om nog te kunnen meten, zijn wij uitgegaan van een stuwdruk van 10 Pa . Dit komt overeen met een windsnelheid van $4,5 \text{ m/s}$ (windkracht 3), zodat de lekmeting nog bij zwakke tot matige wind kan worden uitgevoerd.

Beide drukverschillen zijn gemeten met een capacitieve drukopnemer (Setra Systems, type G204).

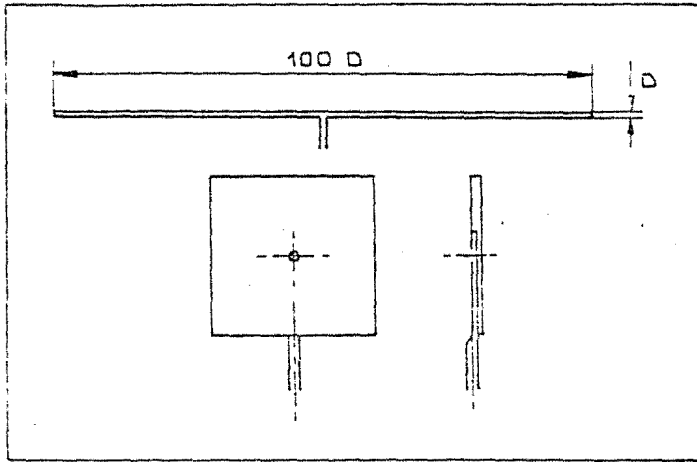


Fig. 6 Hulpstukken voor het meten van statische druk en overdruk

Metingen aan twee vrieshuizen

Overdrukmeting aan een vrieshuis dat reeds tien jaar in gebruik is

Afmetingen: 90 x 22 x 7 m

Inhoud $V = 13860 \text{ m}^3$

Wandoppervlak $A = 5528 \text{ m}^2$

De meting is tweemaal uitgevoerd, nl. met en zonder afdichting van de pijpen voor de ontdooiwaterafvoer. Deze 14 pijpen zijn elk 6 m lang en hebben een inwendige diameter van 30 mm.

Onderdrukmeting aan een vrieshuis dat slechts enkele maanden in gebruik is

Afmetingen: 50 x 35 x 9 m

Inhoud $V = 15750 \text{ m}^3$

Wandoppervlak $A = 5030 \text{ m}^2$

Bij het nieuwe vrieshuis kon bij geblokkeerde drukverschilbeveiliging tot -70 Pa geen waarneembare lucht lekkage worden gemeten. De gemeten lekkarakteristieken van het oude vrieshuis zijn weergegeven in figuur 7.

Het selo-diagram

De SELO (= S) ofwel *specifieke equivalente lekopening* is: de totale doorsnede van het aantal arbitrair gekozen standaardpijpjes (2 mm diameter en 200 mm lang) die samen evenveel lucht doorlaten als de wand bij hetzelfde drukverschil gemiddeld per vierkante meter doorlaat.

In formule-vorm:

$$S = \frac{\text{gemeten volumestroom door } 1 \text{ m}^2 \text{ wand}}{1/\pi \times \text{volumestroom door \u00e9\u00e9n pijpje}} \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} \right]$$

Uit de gemeten lekkarakteristiek kan m.b.v. de selo-formule de ondichtheid worden gekwantificeerd. Het is ook mogelijk om de selo-lijnen in het log $\Delta p, \dot{V}_s$ -diagram als parameter in te tekenen zodat de specifieke equivalente lekopening voor de betreffende koelruimte direct kan worden afgelezen (zie fig. 7). Dit diagram geldt voor -20°C ; een volumestroom die gemeten is bij een an-

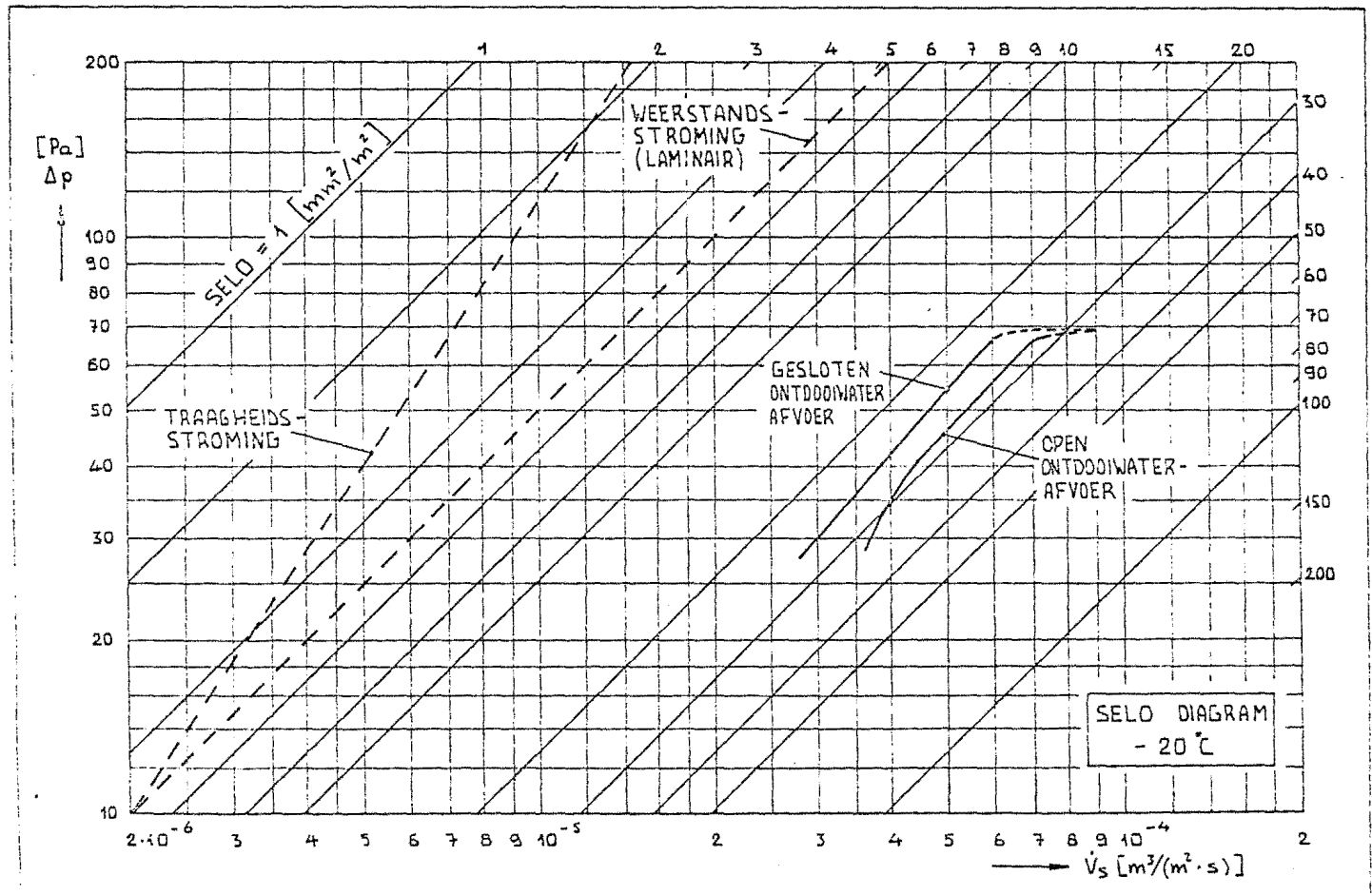


Fig. 7 Met de stationaire overdrukproef gemeten lekkarakteristieken, weergegeven in het SELO-diagram

dere temperatuur, moet daarom worden herleid naar -20°C ($\rho = 1,4 \text{ kg/m}^3$). In de literatuur wordt de selo bij verschillende temperaturen opgegeven.

Van Hiele e.a. [2] geeft als selo-formule:

$$S = \dot{V}_s / (0,039 \cdot \Delta p) = 25,6 \dot{V}_s / \Delta p$$

waarin: S de selo in mm^2/m^2 .

\dot{V}_s de gemiddelde lekstroom per wandoppervlakte in $\text{cm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ bij -20°C .

Δp het drukverschil in Pa.

Van Male [1] geeft als selo-formule voor $+20^{\circ}\text{C}$:

$$S = 30 \dot{V}_s / \Delta p$$

Standaardisatie van de selo

Bij gebruik van de selo-formule voor een bepaalde temperatuur heeft herleiding van \dot{V}_s naar de betreffende temperatuur weliswaar weinig invloed [1], maar de grootte van de selo-waarde verandert wel met de temperatuur waarop deze is gebaseerd. Om dit in te zien moeten we even teruggrijpen naar de basisformule voor het selo-pijpje ($L = 200 \text{ mm}$, $d = 2 \text{ mm}$) waarin de traagheidsterm van de drukval is verwaarloosd:

$$\Delta p = 40,74 \frac{\dot{V}_o \cdot L \cdot \eta}{d^4} \quad (1)$$

waarin η de dynamische viscositeit [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] van de lucht en \dot{V}_o het luchtdebiet [m^3/s] door een selo-pijpje voorstellen. Per definitie is de selo gelijk aan:

$$S = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2)$$

waarin \dot{V}_s en \dot{V}_o kunnen worden uitgedrukt in $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ resp. m^3/s en S en d in mm^2/m^2 resp. in mm .

Substitutie van \dot{V}_o volgens vgl. (1) in vgl. (2) resulteert in de selo-formule, welke als temperatuurafhankelijke termen de specifieke lekstroom en de dynamische viscositeit bevat.

Om tot eenduidige selo-waarden te komen zal men de selo-formule en het selo-diagram voor één standaardtemperatuur moeten vastleggen.

Meetresultaten en conclusies

Er is gemeten tot een overdruk van 70 Pa en met behulp van het selo-diagram (fig. 7) vindt men:

— voor gesloten ontdooiwaterafvoer: selo = $25 \text{ mm}^2/\text{m}^2$

— voor open ontdooiwaterafvoer: selo = $29 \text{ mm}^2/\text{m}^2$.

De helling van de lekkarakteristiek loopt vrijwel evenwijdig met zuivere weerstandsstroming. Hieruit mag men concluderen, dat kleine openingen hier de hoofdrol spelen.

De afvoerpipen hebben een grote diameter t.o.v. de overige lekopeningen, waardoor bij geringe drukverschillen de traagheidsstroming overheerst (afbuiging van de rechte lijn). Van Male heeft voor dit verschijnsel in een eerder verschenen artikel [1], een verklaring gegeven. Een tweede mogelijkheid is het dichtdrukken van een deel van het lek, wanneer de (vervormbare) isolatie tegen een stijve wand wordt gedrukt. Dit laatste is hier echter niet aannemelijk, omdat het verschil in selo tussen de twee gemeten karakteristieken correspondeert met de extra-lekkage door de afvoerpipen.

Een vreemd verschijnsel dat we waargenomen hebben, is het feit dat de druk bij toename van de volumestroom boven circa 70 Pa niet verder steeg. Achteraf is gebleken dat dit maximum wordt veroorzaakt door een ingebouwde begrenzing van de gebruikte micro-manometer en deze afbuiging heeft dus niets te

maken met de lekkarakteristiek van het betreffende vrieshuis.

Vergelijkt men deze resultaten met de 'toelaatbare lekopening', zoals die door Váhl [4] met arbitraire aannamen voor Δp en \dot{V}_s is gedefinieerd, dan blijkt de lek dichtheidskwaliteit van deze vriesruimte onvoldoende. Zoals gezegd berust deze berekening van de 'toelaatbare lekopening' op arbitrair gekozen waarden. De door de lekstroom veroorzaakte enthalpiestroom mag bij deze aanname niet meer dan 5% bedragen van de warmtetransmissie door de dicht geïsoleerde wand. Dit percentage zou aan de lage kant kunnen zijn. In ieder geval moet dit percentage zodanig gekozen worden dat de bijbehorende 'toelaatbare lekopening' groter is dan die selo, waarbij een ingebouwde drukbeveiliging onder normale bedrijfsomstandigheden nog net niet in werking treedt.

Ondergrens voor de 'toelaatbare lekopening'

Een drukbeveiliging dient in werking te treden als de maximaal toelaatbare over- of onderdruk waarvoor de koude ruimte geschikt is overschreden wordt. Deze maximaal toelaatbare druk zal in de praktijk [2] 100 à 300 Pa bedragen afhankelijk van de afmetingen van de ruimte. Gaat men er verder vanuit dat de drukbeveiliging alleen in werking mag treden bij extreme omstandigheden zoals bij storm en onweer en dus niet bij drukschommelingen veroorzaakt door de temperatuurregeling van de koude ruimte, dan resulteert dit voor een maximum toelaatbaar drukverschil van 100 Pa bij een temperatuuramplitude $\Delta T = 1 \text{ K}$ en een frequentie van $f = 1/\text{h}$ in een minimale selo van $5 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ [3].

Bij een temperatuuramplitude $\Delta T = 2 \text{ K}$ en een frequentie van $f = 1/\text{h}$ bedraagt de minimale selo $10 \text{ mm}^2/\text{m}^2$.

De toelaatbare lekopening hoort naar mijn mening boven een waarde te liggen, waarbij de drukbeveiliging onder normaal bedrijf niet steeds in werking behoeft te treden en zal dus in ieder geval afhankelijk van de temperatuuramplitude en de frequentie boven 5 respectievelijk $10 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ moeten liggen.

Niet-stationaire tracergasmethode

De niet-stationaire tracergasmethode is geschikt voor berekening van lekverliezen onder heersende omstandigheden, bijvoorbeeld om de lekverliezen t.g.v. temperatuurschommelingen en wind te meten.

Bij het laboratorium voor Koudetechniek van de TH-Delft [5] is ervaring opgedaan met deze methode en is deze vergeleken met de stationaire overdrukmethode.

Meetprincipe

De werking van deze methode is als volgt. In de ruimte wordt een tracergas geblazen, in dit geval helium, waarvan met behulp van een concentratiemeter de concentratie in de ruimte wordt bepaald. De meting kan op elk moment worden gestart door op de meter het verloop van de heliumconcentratie als functie van de tijd af te lezen. De relatieve afname van deze concentratie met de tijd is een maat voor het ventilatievoud R van de ruimte en daarmee voor de luchtuitwisseling die heeft plaatsgevonden. Massabalans tracergas [6]:

in — uit = ophoping

$$0 - \dot{V} \cdot c_g = \frac{d c_g}{dt} \cdot V$$

$$\int \frac{\dot{V}}{V} dt = - \int \frac{d c_g}{c_g}$$

$$R \cdot t = - \ln c_g + k$$

als $t = 0$ geldt $c_g = c_o$
hieruit volgt $k = \ln c_o$ en na substitutie geeft dit:

$$R \cdot t = - \ln c_g + \ln c_o$$

$$R = - \frac{2,303}{t} \lg \frac{c_g}{c_o} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Hierin is:

- c_g tracergasconcentratie [m^3/m^3]
- c_o tracergasconcentratie voor $t = 0$
- $R = \dot{V}/V$ ventilatievoud [s^{-1}]
- V volume van de ruimte [m^3]
- \dot{V} doorgaande luchtstroom [m^3/s]

Diagram ter bepaling van het ventilatievoud

Met behulp van het diagram in fig. 8 is het mogelijk om op een eenvoudige manier het ventilatievoud te bepalen uit de afname van de concentratie met de tijd. Door de gemeten punten kan men een rechte trekken die met een van de R-lijnen zal samenvallen. Bij de modelkoelruimte is deze meetmethode vergeleken met de stationaire overdrukmethode. Hierbij bedroeg het onderling verschil 5%. De formule voor het ventilatievoud geldt voor tracer-gassen die volledig met de lucht in de ruimte zijn gemengd. Aan deze voorwaarde kan in de praktijk niet altijd worden voldaan.

Samenvatting

Dit artikel beschrijft de doelstellingen van luchtlekkagemetingen en de bijbehorende meetmethoden, die men daarvoor het best kan gebruiken. Hierna wordt ingegaan op de meetresultaten en de ervaringen opgedaan bij het toepassen van de stationaire overdrukmethode en de niet-stationaire tracergasmethode. Voor potentiële gebruikers van deze beide methoden zijn twee diagrammen opgenomen die in de praktijk handig in gebruik zijn. Naar aanleiding van eerder verschenen artikelen over dit onderwerp, wordt een pleidooi gehouden voor verdere standaardisatie van de specifieke equivalente lekopening (selo) met name de temperatuur waarop deze gebaseerd is en aan de hand van een orbeeld wordt de ondergrens aangegeven voor een 'toelaatbare lekopening'.

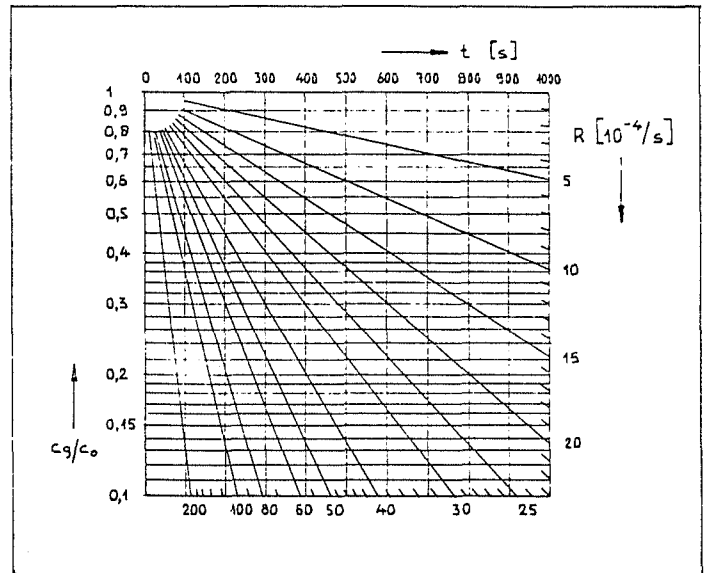


Fig. 8 Diagram ter bepaling van ventilatievoud met behulp van tracergas

Summary

Non-tightness of cold room walls Measurement of air leakage

The article describes the different goals of air leakage measurements and the measuring methods which fit best to the corresponding goal. Results and experiences of the author are discussed in connection with measurements done by applying the stationary overpressure method and the non-stationary tracer-gas method.

For potential users of these two methods two diagrams are given which are very useful in practice.

With reference to foregoing articles about this subject the author makes a plea for further standardization of the specific equivalent leak opening (SELO) especially the temperature on which it is based and a numerical example is given to calculate the lower limit of 'admissible non-tightness' of cold rooms.

Literatuur

- 1 Male, J. van. Ondichtheid van wanden in het koel- en vriesbedrijf (Deel I); Koeltechniek 73 (1980) nr 9, p. 196...200.
- 2 Hiele, T. van e.a. — Ondichtheden in de wanden van koude ruimten; Koeltechniek 73 (1980) nr 2, p. 24...31.
- 3 Male, J. van — Ondichtheid van wanden in het koel- en vriesbedrijf (Deel II); Koeltechniek 73 (1980) nr 10, p. 223...228.
- 4 Váhl, L. — Nieuwe inzichten over de lekdichtheid van gekoelde ruimten. Koeltechniek 73 (1980) nr 10, p. 229...232.
- 5 Groosjohan, F. A. — Energieverliezen door lekopeningen in koude ruimten. Delft 1979. Rapport S 707 Lab. v. Koudetechniek en Klimaatregeling TH-Delft.
- 6 Machielsen, C. H. M. en J. Rhijnsburger — Meting van koelvermogen, transmissieverlies en luchtlekstromen aan een modelkoelhuis. Delft 1978. Rapport K 76 Lab. v. Koudetechniek en Klimaatregeling TH-Delft.