

S P R E N G E R I N S T I T U U T
Haagsteeg 6, 6708 PM Wageningen
Tel.: 08370-19013

*(Publikatie uitsluitend met
toestemming van de directeur)*

RAPPORT NO. 2244

Ir. G. van Beek

INVLOED VAN DE WISSELENDE LUCHTBEWEGING
RONDOM STAPELINGEN OP DE WARMTEGELEIDING
IN DE STAPELING

Uitgebracht aan de directeur van het Sprenger Instituut (juni 1983)
Project no. 147

Samenvatting

Bij de berekening van afkoelsnelheden van produktstapelingen in langsstroomsystemen bepaalt de warmtegeleidingscoëfficiënt de afkoelsnelheid. De warmtegeleidingscoëfficiënt is gebaseerd op warmtegeleiding en warmtestraling.

Tot nu toe werd geen rekening gehouden met de invloed van lucht, die in de ruimte tussen de produkten kan bewegen onder invloed van drukverschillen die over de verpakking ontstaan. De theoretische waarde voor de warmtegeleidingscoëfficiënt kan met circa 15% worden vergroot als gevolg van wisselende luchtsnelheden (en dus drukverschillen) rondom de stapeling.

Summary

The thermal conductivity is an important property to calculate the cooling down time properly. The thermal conductivity is based on conduction and radiation. Until now the influence of air moving around the products in the packages is neglected. The air can have alternating small velocities because of the alternating air speed around the packages. The theoretical value of the thermal conductivity can be increased by 15% as a consequence of alternating pressure differences around the packages.

Inleiding

Het doel van dit rapport is om aan te geven met welke toename van de warmtegeleiding in verpakkingen voor tuinbouwprodukten gerekend kan worden als de lucht in deze verpakking beweegt.

De lucht in de verpakking wordt in beweging gebracht door hoge lichtsnelheden rondom de verpakking. Variaties in deze hoge lichtsnelheden veroorzaken kleine drukverschillen over de verpakking, zodat onder invloed van die drukverschillen de lucht in de verpakking gaat bewegen.

De theoretische warmtegeleidingscoëfficiënt van tuinbouwprodukten in bulk kan berekend worden met de parallelle vergelijking [1]:

$$\lambda_{th} = \sum \lambda_i \epsilon_i \quad (1)$$

waarin:

ϵ	$\frac{m^3}{m^3}$	volumefractie
λ	W/(m·K)	warmtegeleidingscoëfficiënt
i		component

Deze vergelijking houdt geen rekening met luchtstroming door de bulk, gedwongen of natuurlijk, en straling. Indien het mogelijk is om de lichtsnelheid in de bulk te berekenen, dan geven de volgende vergelijkingen de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt:

Volgens Schlünder [2]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{th} + \frac{1}{8} v_o \cdot D_u (c\rho)_1 \quad (2)$$

Volgens Smith [3]:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{th} + 0,1 (c\rho)_1 \cdot v_o \cdot D_u \quad (3)$$

waarin:

v_o	m/s	lichtsnelheid betrokken op de lege doorsnede
D_u	m	diameter van de deeltjes

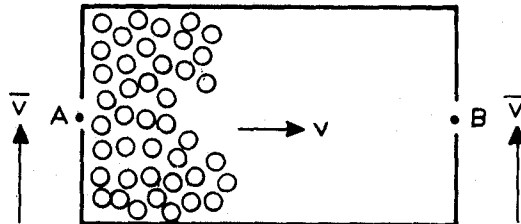
Drukverschil over de verpakking

We gaan ervan uit dat rondom een verpakking met ventilatie-openingen lucht stroomt met de gemiddelde snelheid \bar{v} (zie figuur 1). De afwijking van de lichtsnelheid in de punten A en B t.o.v. het gemiddelde zijn een fractie γ van \bar{v} . De minimum

en maximum luchtsnelheid zijn dus respectievelijk $\bar{v} - \gamma \cdot \bar{v}$ en $\bar{v} + \gamma \cdot \bar{v}$.
 Uit experimenten blijkt dat $\gamma \approx 0,2$.

Volgens de wet van Bernoulli geldt voor ieder punt in de luchtstroom dat

$$\frac{1}{\rho} dp + \bar{v} dv = 0 \quad (4)$$



Figuur 1. Op punt A en B ontstaan wisselende drukken, zodat de lucht in de verpakking heen en weer stroomt

De drukverschillen tussen punt A en B zijn gelijk aan:

$$\Delta p = dp_A - dp_B = \rho \bar{v} (dv_B - dv_A) \quad (5)$$

Als de snelheidsvariaties in tegengestelde fase zijn dan geldt voor $dv_B - dv_A = 2\gamma \bar{v}$ zodat het maximale drukverschil is:

$$\Delta p = 2 \cdot \rho \cdot \gamma \bar{v}^2 \quad (6)$$

Het gemiddelde drukverschil is een deel (f) van het maximale drukverschil zodat het gemiddelde drukverschil is:

$$\Delta p = f \cdot 2 \cdot \rho \cdot \gamma \bar{v}^2 \quad (7)$$

De waarde van $f \approx 0,3$ dus

$$\Delta p \approx 0,3 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 0,2 \bar{v}^2 = 0,144 \bar{v}^2 \quad (8)$$

Luchtsnelheid door de stapel

Het verband tussen drukverschil en luchtsnelheid in een verpakking met bolvormige tuinbouwprodukten is:

$$\Delta p_{pr} = \frac{170 \cdot \rho \cdot 2X \cdot v (1 - \epsilon)^2}{D_u^2 \cdot \epsilon^3} v_o + \frac{1,75 (1 - \epsilon) \cdot 2X}{D_u \epsilon^3} v_o^2 \quad (9)$$

waarin:

Δp	Pa	drukverschil
ρ	kg/m ³	dichtheid lucht
X	m	afstand centrum tot oppervlak
ν	m ² /s	kinematische viscositeit
ϵ	m ³ /m ³	porositeit
D_u	m	diameter produkt
v_o	m/s	luchtsnelheid

De drukval over de verpakkingwand met gaten is:

$$\Delta p_{wa} = \frac{1}{2} \rho \frac{v_o^2}{\xi^2} \quad (10)$$

waarin:

ξ	m ² /m ²	oppervlak van de openingen
-------	--------------------------------	----------------------------

Het totale drukverschil over de verpakking is dus:

$$\Delta p_t = \left(\frac{\rho}{\xi^2} + \frac{3,5 X (1 - \epsilon)}{D_u \epsilon^3} \right) v_o^2 + \left(\frac{340 \rho X \nu (1 - \epsilon)^2}{D_u^2 \epsilon^3} \right) v_o \quad (11)$$

Uit deze vergelijking van de tweede graad volgt de luchtsnelheid:

$$v_o = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (12)$$

$$a = \frac{\rho}{\xi^2} + \frac{3,5 X (1 - \epsilon)}{D_u \epsilon^3} \quad (13)$$

$$b = \frac{340 \rho X \nu (1 - \epsilon)^2}{D_u^2 \epsilon^3} \quad (14)$$

$$c = - \Delta p_t \quad (15)$$

Traagheid van de lucht

Het drukverschil over de verpakking varieert in tijd en richting. De bovenstaande theorie geldt voor een langdurig constant drukverschil.

De vraag is nu hoe lang het duurt voordat lucht uit stilstand op volle snelheid

komt. Als de frequentie van de drukwisselingen te hoog is, zal de lucht niet de tijd krijgen om in beweging te komen. De versnelling en de luchtsnelheid van de lucht in de verpakking moeten dus berekend worden.

In de afleiding wordt de weerstand van het produkt en de twee wanden verwaarloosd. De versnelling van een luchtkolom met lengte $2X$ en daarover een drukverschil van Δp is:

$$a = \frac{\Delta p}{2 X \rho} \quad (16)$$

De bewegingsvergelijking voor de lucht is:

$$v = at = \frac{\Delta p}{2 X \rho} t \approx \frac{0,576 \sqrt{v^2}}{2 X \rho} \cdot t \quad (17)$$

waarin:

a m/s² versnelling
t s tijd

In tabel 1 wordt aangegeven na hoeveel tijd de luchtsnelheid in de verpakking veranderd is van 0 naar 1 mm/s.

Tabel 1. Tijd(s) om 1 mm/s snelheid te bereiken

gemiddelde luchtsnelheid rondom verpakking in m/s	totale afmeting verpakking in m	
	0,2	1
0,3	0,006	0,026
1	< 0,001	0,005

Het blijkt dat de snelheid van de lucht in de verpakking na $t = 0,03$ s minstens 1 mm/s is.

Na circa 0,1 s is de maximum snelheid bereikt.

Voorbeeld

Tabel 2 toont een met het computerprogramma SCHLUNDER·BAS berekend voorbeeld. De theoretische warmtegeleiding is 0,3 W/(m·K), terwijl de effectieve warmtegeleiding 14% groter is omdat de gemiddelde luchtsnelheid langs de verpakking 1 m/s is.

Tabel 2. Berekening van de effectieve warmtegeleiding in de verpakking onder invloed van de luchtbeweging rondom de verpakking

warmtegeleiding	=	0,3 W/mK
dichtheid lucht	=	1,2 kg/m ³
soortelijke warmte lucht	=	1000 J/kgK
deeltjes diameter	=	0,04 m
gemiddelde luchtsnelheid om verpakking	=	1 m/s
fractie ventilatie-openingen	=	0,1 m ² /m ²
lengte verpakking	=	0,5 m
porositeit	=	0,4 m ³ /m ³
kin. viscositeit	=	1,70000E-05 m ² /s
effectieve warmtegeleiding	=	0,34 W/mK
drukval over verpakking	=	0,444 Pa
luchtsnelheid in verpakking	=	8 mm/s
toename warmtegeleiding		14 %

De invloed van de verandering van de parameters op de effectieve warmtegeleiding is in tabel 3 af te lezen. Iedere parameter is een factor 2 groter of kleiner dan de voorbeeldwaarde, en vervolgens is de effectieve warmtegeleiding berekend met het computerprogramma (zie bijlage 1). De deeltjesdiameter en de luchtsnelheid zijn de belangrijkste factoren. De porositeit varieert in de praktijk zo weinig, zeker geen factor 2, dat de invloed daarvan op de effectieve warmtegeleiding geringer is dan de tabel aangeeft.

Tabel 3. Invloed van de parameters op de effectieve warmtegeleiding. In het voorbeeld is de effectieve 14% groter dan de theoretische geleiding. De effectieve is altijd groter dan de theoretische geleiding.

parameter	x 2	x ½
deeltjes diameter	+ 54%	+ 2%
luchtsnelheid	+ 37	+ 4
ventilatie-openingen	+ 14	+ 12
lengte verpakking	+ 8	+ 21
porositeit	+ 51	+ 1

Literatuur

1. G. van Beek en C.H. Veerkamp

Een programma voor het berekenen van de thermische eigenschappen van voedingsmiddelen.

Voedingsmiddelentechnologie 15(19)63(1982).

2. J.E. Rooda

Warmtetransport in verpakkingen met modelprodukt.

Sprenger Instituut, Rapport no. 1761, 1971.

3. J.M. Smith en E. Stammers

Fysische transportverschijnselen.

DUM B.V. Delft, 1973, blz. 114.

Wageningen, 17 juni 1983

GvB/MJ

Bijlage 1.

```

10 REM -----( SCHLUNDER.BAS )-----
20 REM WARMTEGELEIDINGSCOEFF IN EEN VERPAKKING ALS DRUKVERSCHILLEN
30 REM RONDOM DE VERPAKKING AANWEZIG ZIJN
40 REM ----- G.van BEEK -----
42 PRINT "Wilt U een toelichting (J/N)";
44 INPUT I$
46 IF I$="J" THEN GOSUB 1400
48 IF I$="J" THEN GOSUB 1400
50 OPEN "R.LST" FOR OUTPUT AS FILE #1
60 PRINT #1,
70 PRINT #1,"SPRENGER INSTITUUT          DATUM :";DAT$
80 PRINT #1,"ABC-PAKKET : SCHLUNDER.BAS"
82 PRINT #1,"Berekening van de effectieve warmtegeleiding"
84 PRINT #1,"in de verpakking onder invloed van de lucht-"
86 PRINT #1,"beweising rondom de verpakking."
90 PRINT #1,
95 GO TO 1100
100 REM -----
110 REM ALLE STARTPARAMETERS
120 REM -----
130 RESTORE
140 I1=9
150 FOR I=1 TO I1
160 READ G$(I),G(I),E$(I)
170 NEXT I
180 DATA warmtegeleiding,0.3,W/mK
190 DATA dichtheid lucht,1.2,kg/m3
200 DATA soortelijke warmte lucht,1000,J/kgK
210 DATA deeltjes diameter,.04,m
220 DATA gemiddelde luchtsnelheid om verpakking,1,m/s
230 DATA fractie ventilatie openingen,.1,m2/m2
240 DATA lengte verpakking,.5,m
250 DATA porositeit,.4,m3/m3
260 DATA kin viscositeit,1.7e-5,m2/s
270 RETURN
300 REM -----
310 REM invoer van de gegevens
320 REM -----
330 F9=1
340 I1=1 \ I2=9 \ GOSUB 400
350 RETURN
400 REM -----
410 REM INVOER GEGEVENS DEEL 2
420 REM -----
430 PRINT
440 FOR I=I1 TO I2
450 PRINT I;G$(I);TAB(45);"=";G(I);TAB(60);E$(I)
460 NEXT I
470 PRINT
480 PRINT "goed zo (J/n)";
490 INPUT I$
500 IF I$="J" THEN RETURN
510 IF I$="J" THEN RETURN
520 PRINT "nummer te veranderen srootheid";
530 INPUT I
540 IF I<I1 THEN PRINT Z$(1) \ GO TO 470
550 IF I>I2 THEN PRINT Z$(1) \ GO TO 470
560 PRINT G$(I);" in ";E$(I);" =";

```

```

570 INPUT G(I)
580 GO TO 430
600 REM -----
610 REM OMZETTEN INVOER- IN REKENSYMBOLLEN
620 REM -----
630 L1=G(1)
640 R1=G(2)
650 C1=G(3)
660 D1=G(4)
670 V1=G(5)
680 F1=G(6)
690 X1=G(7)
700 E1=G(8)
710 N1=G(9)
720 RETURN
800 REM -----
810 REM BEREKENINGEN
820 REM -----
830 P1=.144*V1*V1 \ REM DRUKVERSCHIL OVER DE VERPAKKING
840 A1=R1/F1/F1+3.5*X1*(1-E1)/D1/E1/E1/E1
850 B1=340*R1*X1*N1*(1-E1)*(1-E1)/D1/D1/E1/E1/E1
860 C2=-P1
870 V2=(-B1+SQR(B1*B1-4*A1*C2))/2/A1
880 L2=L1+.1*C1*R1*V2*D1
890 RETURN
900 REM -----
910 REM DE UITVOER VAN DE INVOER
920 REM -----
930 PRINT #1,
940 FOR I=1 TO 9
950 PRINT #1,G$(I);TAB(45);"=";G(I);TAB(60);E$(I)
960 NEXT I
970 PRINT #1,
980 RETURN
1000 REM -----
1010 REM RESULTAAT BEREKENING
1020 REM -----
1030 FOR R6=0 TO 1
1035 PRINT #R6,
1040 PRINT #R6,"effectieve warmtegeleiding" =";L2;" W/mK"
1050 PRINT #R6,"drukval over verpakking" =";P1;" Pa"
1060 PRINT #R6,"luchtsnelheid in verpakking" =";V2*1000;" mm/s"
1065 PRINT #R6,"toename warmtegeleiding" =";(L2-L1)/L1*100;" %"
1070 PRINT #R6,
1075 NEXT R6
1080 RETURN
1100 REM -----
1110 REM HOOFDPROGRAMMA
1120 REM -----
1130 GOSUB 100 \ REM STARTPARAMETERS INLEZEN
1140 GOSUB 300 \ REM INVOER GEGEVENS
1150 GOSUB 600 \ REM OMZETTEN SYMBOLEN
1160 GOSUB 800 \ REM BEREKENING
1170 GOSUB 900 \ REM UITVOER INVOER
1180 GOSUB 1000 \ REM UITVOER RESULTAAT
1200 REM -----
1210 REM WAT NU ROUTINE
1220 REM -----
1230 PRINT "1. stoppen"
1240 PRINT "2. gegevens veranderen"
1250 PRINT "3. opnieuw"
1260 PRINT "kies";

```

```
1270 INPUT I
1280 IF I=2 THEN 1140
1290 IF I=3 THEN 1130
1300 PRINT "resultaat in R.LST"
1310 GO TO 1600
1400 REM -----
1410 REM TOELICHTING
1420 REM -----
1425 PRINT \ PRINT
1430 PRINT "De warmtegeleiding van de inhoud van een verpakking"
1440 PRINT "wordt bepaald door de samenstellende componenten."
1450 PRINT "Veel lucht heeft een isolerend effect, veel water"
1460 PRINT "een doorsevend effect. De theoretische warmtegeleiding"
1470 PRINT "kan berekend worden met het programma COSTHERM.TSK of"
1480 PRINT "THERM.BAS"
1490 PRINT
1500 PRINT "Als de verpakking ventilatiesaten heeft en er drukver-"
1510 PRINT "schillen over de verpakking bestaan dan stroomt er"
1520 PRINT "lucht door de verpakking. Deze luchtstroom versmooit de"
1530 PRINT "warmtegeleiding. "
1540 PRINT
1550 PRINT "Het programma vraagt eerst om een aantal gegevens en"
1560 PRINT "berekent daarna de effectieve warmtegeleiding."
1570 PRINT
1572 PRINT "return";
1574 INPUT I$
1580 RETURN
1600 END
```