

# VACUÛMISOLATIEPANELEN TOEGEPAST IN GEBOUWEN

## DEEL 1: THERMISCH GEDRAG

Recent is aan de Technische Universiteit Delft een promotieonderzoek afgerond naar de toepassing van vacuümisotatiepanelen (VIPs) in gebouwen [1]. Vacuümisotatiepanelen vormen een nieuw isolatiemateriaal bestaande uit een meso-poreuze kern die achtereenvolgens vacuüm wordt gezogen en wordt verpakt in een barrièrefolie. Deze barrièrefolie heeft tot doel om waterdamp en atmosferische gassen zo goed als mogelijk buiten het kernmateriaal te houden. Mede vanwege de lage gasdruk in het kernmateriaal is de warmtegeleidingscoëfficiënt van een VIP een factor 5 tot 10 geringer dan van conventionele alternatieven. In dit artikel zal het thermisch gedrag van VIPs worden besproken. In een volgend artikel, dat verschijnt in Bouwfysica 1-2011, zal thermische veroudering worden toegelicht.



dr. ir. arch. M.J. (Martin) Tenpierik, TU Delft, Bouwkunde, Bouwfysica



dr. ir. W.H. (Wim) van der Spoel, TU Delft, Bouwkunde, Bouwfysica, en Landstra bureau voor bouwfysica, Doesburg



prof. ir. J.J.M. (Hans) Cauberg, TU Delft, Bouwkunde, Bouwfysica, en Cauberg-Huygen raadgevend ingenieurs, Maastricht

### INLEIDING

De dreiging van klimaatverandering noodzaakt ons om de uitstoot van broeikasgassen drastisch te verlagen. Een belangrijke bijdrage aan deze emissies wordt geleverd door de verbranding van fossiele brandstoffen voor het genereren van warmte, koude en elektriciteit voor gebouwen. Residentiële en commerciële gebouwen en daarmee verband houdende processen waren in 2001 verantwoordelijk voor ongeveer 36% van het primaire energiegebruik in Europa [2]. Meer dan de helft van deze energie werd gebruikt voor ruimteverwarming [3]. Naast de verminderde uitstoot van broeikasgassen is een vermindering van de energievraag van gebouwen belangrijk voor het faciliteren van de toepassing van duurzame en hernieuwbare energiebronnen in de gebouwde omgeving. Het vermogen van deze bronnen is immers voorlopig onvoldoende voor de huidige hoge energievraag.

Eén manier om het energiegebruik voor verwarming van gebouwen in hun gebruiksfase te verminderen kan worden gerealiseerd door verhoging van de thermische weerstand van de (niet-transparante) gebouwomhulling. Twee strategieën voor deze verbetering kunnen worden gevolgd. In de eerste plaats kan de dikte van de warmte-isolerende laag worden vergroot. In de afgelopen decennia is langs deze weg al een enorme verbetering van de energieprestatie van gebouwen bereikt. Dikke gevelconstructies hebben echter vele nadelen: een ongunstige verhouding van het netto tot het bruto vloeroppervlak, een toegenomen complexiteit van details, een verminderde mogelijkheid voor het ontwerpen van slanke gevels en een gereduceerde daglichttoetreding, om maar enkele te noemen. In de tweede plaats kunnen effectievere isolatiematerialen worden gebruikt. Eén van deze effectievere isolatoren is een vacuümisotatiepaneel, afgekort VIP.

### Vacuümisotatie

Een vacuümisotatiepaneel (figuur 1 en 2) is een thermische isolatiecomponent bestaande uit een meso-poreus kernmateriaal – de meeste poriën hebben een grootte tus-

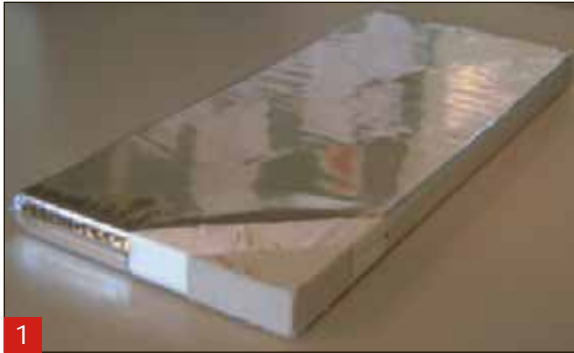
sen 2 en 50 nm – dat na vacuümzuigen wordt ingepakt in een luchtdichte verpakking. Mede als gevolg van de lage gasdruk (luchtdruk plus waterdampspanning) in de poriën van de kern is de warmtegeleidingscoëfficiënt van het product sterk gereduceerd, variërend van  $2 \cdot 10^{-3}$  tot  $8 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K) (figuur 3). In het ideale geval is een VIP van slechts 20 mm daardoor thermisch gelijkwaardig aan ongeveer 185 mm minerale wol (figuur 4). Deze diktereductie is een van de meest interessante eigenschappen voor toepassing van vacuümisotatiepanelen in gebouwen.

Om het vacuüm echter voor een zo lang mogelijke periode op peil te houden, is een barrièrefolie nodig met een lage doorlaatbaarheid voor vooral waterdamp, stikstof en zuurstof. In de loop der jaren zijn hiervoor diverse typen folielaminaten ontwikkeld. Voor VIPs worden twee typen veelvuldig gebruikt: 1) aluminiumfolielaminaten bestaande uit een PE seallaag, een 6 tot 20 µm dikke aluminiumfolie en een beschermende toplaag en 2) gemetalliseerde kunststof-folielaminaten bestaande uit twee of drie gemetalliseerde PET folies en een beschermende toplaag. Van deze twee typen folielaminaten heeft het eerste type de beste barrière-eigenschappen maar tevens ook de hoogste warmtegeleiding. In Europa worden VIPs voor toepassing in de bouw meestal van het tweede type laminaat voorzien.

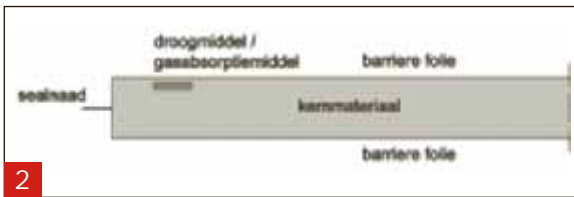
### Onderzoeksopzet

De integratie van vacuümisotatiepanelen in gevels dient zorgvuldig te worden uitgevoerd om verschillende redenen:

- Een VIP moet worden beschouwd als een bouwcomponent, met als gevolg dat het niet kan worden gezaagd en gevormd op de bouwplaats en een zorgvuldige planning vooraf vereist is.
- Een VIP is zeer kwetsbaar waardoor een zorgvuldige behandeling tijdens het bouwproces vereist is.
- Vanwege koudebruggen langs de randen van het paneel is een goed ontwerp nodig.
- Er dient rekening gehouden te worden met een afname van de thermische prestatie in de tijd, vooral voor



1 Een vacuïsolatiepaneel met een kern van kiezelzuur en een gemetalliseerd kunststoffolielaminaat als barriërfolie



2 Doorsnede door een typisch vacuïsolatiepaneel met een dunne barriërfolie (folie-VIP)

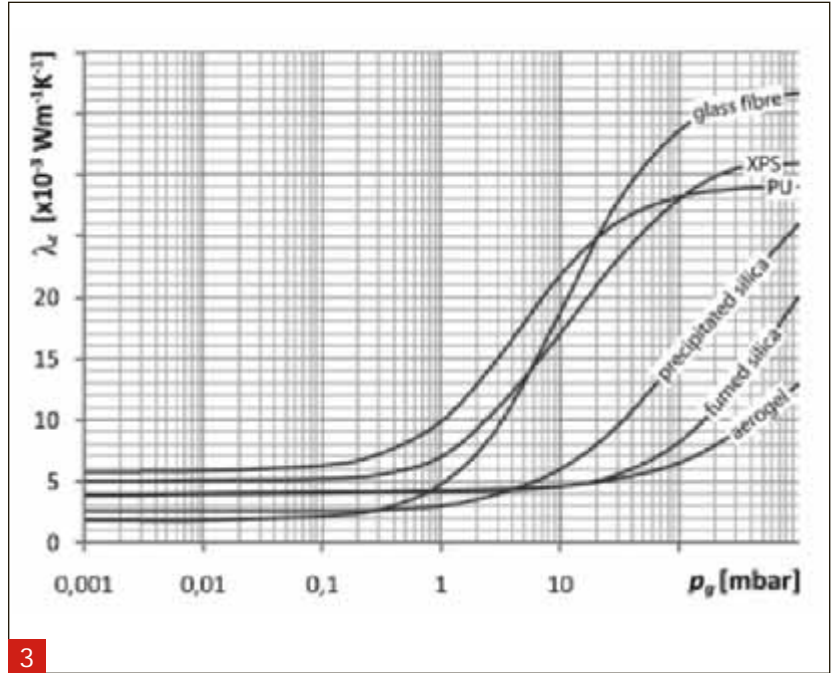
toepassingen met een lange levensduur of onder 'agressieve' omgevingscondities.

Een VIP is dus een complex materiaal waarvan de eigenschappen en het gedrag moeten worden begrepen voordat een succesvolle integratie mogelijk is. De voornaamste doelstellingen van het promotieonderzoek waren daarom:

- De ontwikkeling van rekenhulpmiddelen en -methoden ter bepaling van thermische, hygrothermische en constructieve aspecten van vacuïsolatiepanelen en bouwcomponenten met vacuïsolatiepanelen ter ondersteuning bij het ontwerp- en ontwikkelproces.
- En - op basis van deze instrumenten en methoden - de ontwikkeling van richtlijnen voor een succesvolle integratie van vacuïsolatiepanelen in bouwcomponenten en gevelconstructies met betrekking tot thermische, hygrothermische en constructieve aspecten.



4 De diktereductie die met een vacuïsolatiepaneel kan worden verkregen is een van de meest interessante aspecten voor groot-schalige toepassing in de bouw



3 Verband tussen warmtegeleidingscoëfficiënt en poriegasdruk voor diverse poreuze materialen ('fumed silica' is kiezelzuur)

Om de bijbehorende onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn verschillende aspecten – thermisch gedrag, levensduur en constructief gedrag – onderzocht op zowel het niveau van een vacuïsolatiepaneel als op het niveau van bouwcomponenten met VIPs. Bovendien zijn drie concrete gevallen – EPS ingekapselde VIPs, met VIP geïntegreerde gevelsystemen en een dun met VIP geïntegreerd vloerverwarmings- en vloerkoelingssysteem – bestudeerd vanuit het perspectief van ontwerp en onderzoek. Al deze studies hebben geresulteerd in diverse modellen en methoden voor de berekening van de totale thermische prestatie van VIPs en met VIP geïntegreerde bouwcomponenten, voor het schatten van hun levensduur en voor de berekening van hun constructieve prestaties onder buiging. In dit artikel zal uitsluitend de totale thermische prestatie van VIPs worden besproken. In een volgend artikel in Bouwfysica 1-2011 zullen de levensduur en thermische veroudering aan bod komen.

### KOUDEBRUGEFFECTEN

#### Effectieve thermische prestatie

Bij een homogeen isolatiemateriaal wordt de isolatiewaarde gekarakteriseerd door zijn warmteweerstand,  $R$  [ $m^2 \cdot K/W$ ], of warmtedoorgangscoefficiënt,  $U$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]. Omdat het kernmateriaal van een VIP volledig wordt omsloten door een barriërfolie ontstaat een koudebrug op de plaats waar deze folie van de warme zijde van het paneel doorloopt naar de koude zijde. De thermische prestatie van een VIP kan daardoor niet meer volledig worden gekarakteriseerd door de warmtedoorgangscoefficiënt van het midden van het paneel,  $U_{cop}$ , alleen; koudebruggeffekten als gevolg van de folie dienen meegenomen te worden in de karakterisering. In diverse normen [4, 5, 6] is daarom de zogenaamde lineaire warmtedoorgangscoefficiënt,  $\psi$  [ $W/(m \cdot K)$ ], geïntroduceerd welke de extra warmtestroom weergeeft door een paneel met een koudebrug ten opzichte van een 'identiek' paneel zonder koudebrug. Onder verwaarlozing van effec-

ten nabij de hoeken kan de effectieve warmteovergangscoefficiënt van het gehele VIP,  $U_{\text{eff}}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)], dan worden bepaald overeenkomstig [7, 8]:

$$U_{\text{eff}} = U_{\text{cop}} + \frac{1}{S_p} \sum_{j=1}^m l_j \psi_{\text{vip};j} \quad (1)$$

Onder verwaarlozing van de warmteovergangswaarden en de warmteweerstand van de barriërfolie kan ook een effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt worden gedefinieerd als:

$$\lambda_{\text{eff}} \approx \lambda_c + \frac{d_p}{S_p} \sum_{j=1}^m l_j \psi_{\text{vip};j} \quad (2)$$

Zie het kader op pagina 16 voor de symboolverklaring.

### Lineaire warmteovergangscoefficiënt: analytische formules

De lineaire warmteovergangscoefficiënt van een rand van een VIP kan nauwkeurig experimenteel of numeriek worden bepaald. Dergelijke methoden geven echter niet direct inzicht in de verbanden tussen alle relevante parameters en kunnen tijdrovend zijn. Vandaar dat gedurende het promotieonderzoek een analytische formule is afgeleid waarmee het koudebruggeffect nauwkeurig kan worden bepaald. Deze analytische formule is vergeleken met numerieke resultaten verkregen met behulp van TRISCO en COMSOL Multiphysics [3, 9, 10] en met enkele experimentele resultaten verkregen door Ghazi Wakili et al [11].

Om de analytische formule te kunnen afleiden zijn de volgende aannames gedaan:

- De lengte van het vacuümisolatiepaneel is oneindig. Vanaf een zekere afstand vanaf de koudebrug wordt de temperatuur van de folie,  $T_{\text{fi}}$ , dan niet meer beïnvloed door de koudebrug.
- De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan elke zijde van het VIP,  $\alpha_i$ , wordt constant verondersteld over het gehele oppervlak aan deze zijde.
- De temperatuur in de folie wordt verondersteld niet te variëren over de dikte van de folie.
- Er vindt geen laterale warmteoverdracht plaats tussen twee naast elkaar liggende VIPs.

Op grond van deze veronderstellingen kan worden afgeleid dat de lineaire warmteovergangscoefficiënt als gevolg van een dunne folie rondom een vacuümisolatiepaneel kan worden berekend met [3, 9]:

$$\psi_{\text{vip}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_c}{\alpha_1 d_p} + \frac{\lambda_c}{\alpha_2 d_p}} \left[ \frac{\alpha_1 (N_1^2 - B)}{\frac{d_p t_f \lambda_f}{t_f \lambda_f} (N_1^2 N_2^2 - B^2) - \lambda_1 \sqrt{N_1^2 N_2^2 - B^2} \left(1 + \frac{2B}{\sqrt{D}}\right) - \lambda_2 \sqrt{N_1^2 N_2^2 - B^2} \left(1 - \frac{2B}{\sqrt{D}}\right)} \right] \quad (3)$$

De warmtegeleidingscoëfficiënt van de folie,  $\lambda_f$  [W/(m·K)], wordt vanwege de meerlaagse structuur van de folie berekend als een laagdikte gewogen warmtegeleidingscoëfficiënt (=  $\Sigma(\lambda_i t_i / t_f)$ ; zie tabel 1). Om de zijkant en eventuele naden of foliedikteverschillen te karakteriseren kan de verhouding  $\varphi$  [-] worden geïntroduceerd welke de verhouding van  $\lambda_f t_f$  tot  $\lambda_i t_i$  geeft. De parameters  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $B$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  en  $D$  worden berekend als:

$$N_i = \sqrt{\frac{\alpha_i}{t_f \lambda_f} + \frac{\lambda_c}{t_f \lambda_f d_p}} \quad (4)$$

$$B = \frac{\lambda_c}{t_f \lambda_f d_p} \quad (5)$$

$$\lambda_1 = -\frac{\sqrt{(N_1^2 + N_2^2) - \sqrt{(N_1^2 - N_2^2)^2 + 4B^2}}}{2} \quad (6)$$

$$\lambda_2 = -\frac{\sqrt{(N_1^2 + N_2^2) + \sqrt{(N_1^2 - N_2^2)^2 + 4B^2}}}{2} \quad (7)$$

$$D = (N_1^2 - N_2^2)^2 + 4B^2 \quad (8)$$

### Lineaire warmteovergangscoefficiënt: algemeen gedrag

Figuur 5 laat het berekende algemene verloop van de lineaire warmteovergangscoefficiënt van de rand van een vacuümisolatiepaneel zien als functie van de paneeldikte,  $d_p$ , en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het kernmateriaal,  $\lambda_c$ . Zoals kan worden gezien neemt allereerst de  $\psi$ -waarde toe met toenemende paneeldikte tot een maximum waarde en vervolgens af tot nul. Dit algemene verloop geldt voor alle typen folies rondom een VIP. Het voor de bouw relevante diktegebied (tussen 10 en 50 mm) is in de figuur met grijs gearceerd. Zoals kan worden gezien neemt binnen dit dikte-interval en bij dit type folie de lineaire warmteovergangscoefficiënt af met toenemende paneeldikte. Dit betekent dat bij toenemende dikte van het vacuümisolatiepaneel zowel de warmteweerstand door het midden van het paneel toeneemt als het koudebruggeffect aan de randen van het paneel afneemt. Grofweg geldt voor VIPs dikker dan 20 mm en met een gemetalliseerde kunststoffolielaminaat dus dat een verdubbeling van de dikte van het VIP leidt tot een verdubbeling van zijn totale warmteweerstand. Voor een VIP met een aluminiumfolielaminaat gaat dit echter niet helemaal op. Hier is het koudebruggeffect zodanig sterk dat een verdubbeling van de dikte van het VIP leidt tot minder dan een verdubbeling van de effectieve warmteweerstand.

### Lineaire warmteovergangscoefficiënt: vereenvoudigde formules

Met behulp van de hiervoor beschreven formules kan vrij nauwkeurig het thermisch gedrag van een afzonderlijk VIP worden bepaald. Omdat deze formules echter nog vrij ingewikkeld zijn voor een snelle handberekening is ook gekeken of deze formules vereenvoudigd kunnen worden met behoud van voor de praktijk voldoende nauwkeurigheid. Uit analyses met formule 3 en de numerieke resultaten bleek dat het thermisch gedrag van een VIP met een goed geleidende metaalfolie sterk wordt bepaald door de koudebrug en dat de warmtestromen door het kernmateriaal te verwaarlozen zijn. Voor dit type vacuümisolatiepaneel kan daarom formule 3 vereenvoudigd worden door de limiet voor  $\lambda_c \downarrow 0$  te nemen. Dan ontstaat de formule voor het bepalen van de lineaire warmteovergangscoefficiënt van een vacuümisolatiepaneel met  $\lambda_c = 0$  W/(m·K):

$$\psi_{\text{vip},0} = \frac{1}{\frac{d_p}{t_f \lambda_f} + \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 t_f \lambda_f}} + \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 t_f \lambda_f}}} \quad (9)$$

Tabel 1: Warmtegeleidingscoëfficiënt van twee gangbare folies

| 6 µm aluminiumfolielaminaat |        |             | 3-laags gemetalliseerde folielaminaat |        |             |
|-----------------------------|--------|-------------|---------------------------------------|--------|-------------|
|                             | t [µm] | λ [W/(m·K)] |                                       | t [µm] | λ [W/(m·K)] |
| HDPE                        | 50     | 0,32        | HDPE                                  | 61     | 0,32        |
| PET                         | 25     | 0,24        | PET                                   | 3x12   | 0,24        |
| aluminium                   | 6      | 225         | metallisatie                          | 3x0,04 | 200         |
| laminaat                    | 81     | 17          | laminaat                              | 97     | 0,54        |

Deze laatste vergelijking was al eerder door prof. ir. Hans Cauberg afgeleid [12]. Uit dit promotieonderzoek is naar voren gekomen dat deze laatste formule een zeer goede benadering geeft van het koudebruggeffect als gevolg van een metaalfolielaminaat rondom een VIP met een dikte van meer dan 20 mm.

Tevens bleek uit analyses met formule 3 en de numerieke resultaten dat de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt van een VIP dikker dan 20 mm met een kunststoffolielaminaat afneemt met toenemende paneeldikte. Deze VIPs bevinden zich dus rechts van de piek in ψ-waarde in figuur 5. Als vereenvoudiging van formule 3 kan dus voor deze vacuümisolatiepanelen als uitgangspunt genomen worden dat de paneeldikte, d<sub>p</sub>, groot is. Op basis hiervan ontstaat de volgende vergelijking:

$$\psi_{vip} \approx \frac{\lambda_f t_f}{d_p} \quad (10)$$

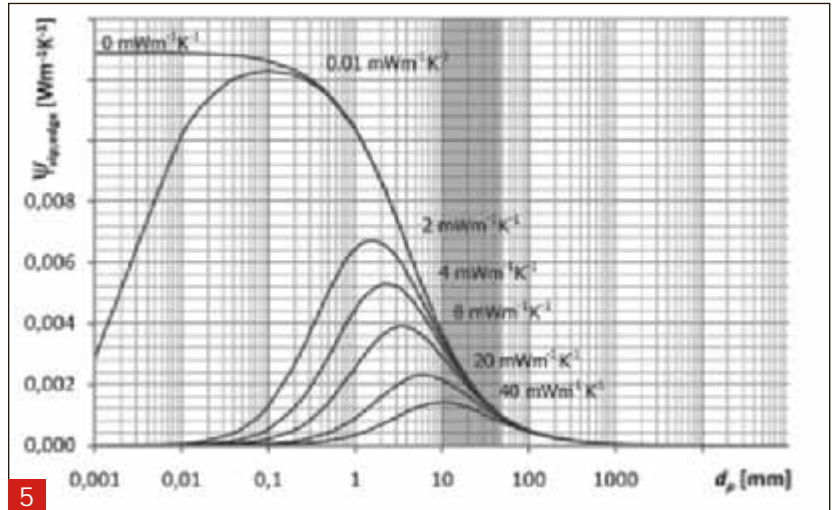
Deze formule blijkt voor een VIP met een dikte groter dan 20 mm en omhuld met een barrière van gemetalliseerde kunststoffolie voor de praktijk voldoende nauwkeurige resultaten op te leveren.

Indien in de praktijk geen nadere gegevens bekend zijn omtrent de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt, kan als een veilige bovenwaarde voor een VIP met een gemetalliseerde folie de waarde van 5 · 10<sup>-3</sup> W/(m·K) worden gehanteerd en voor een VIP met een aluminiumfolielaminaat met een aluminiumdikte van maximaal 6 µm de waarde van 5 · 10<sup>-2</sup> W/(m·K).

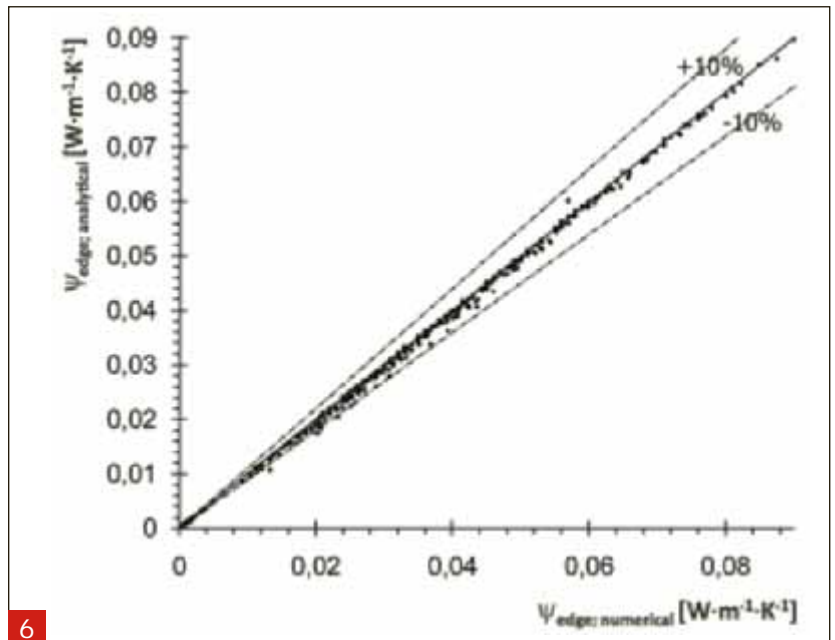
**Vergelijking met numerieke modellen en beperkingen**

De hiervoor besproken analytische formule ter bepaling van het koudebruggeffect als gevolg van de barrièrefolie is getest door de resultaten van de formule te vergelijken met numerieke resultaten verkregen met behulp van TRISCO en COMSOL Multiphysics. Diverse parameters zijn gevarieerd om een voor de praktijk zo breed mogelijke vergelijking te krijgen: de warmtegeleidingscoëfficiënt van het kernmateriaal is gevarieerd van 0 via 4 · 10<sup>-3</sup>, 8 · 10<sup>-3</sup>, 20 · 10<sup>-3</sup> tot 40 · 10<sup>-3</sup> W/(m·K); de dikte van het vacuümisolatiepaneel van 10 via 20, 25, 30 tot 40 mm; en het type en de dikte van de barrièrefolie (aluminiumfolielaminaat variërend met diktes tussen 6 µm en 20 µm; rvs folielaminaat tussen 25 µm en 200 µm; en een gemetalliseerde kunststoffolielaminaat met twee of drie metallisatielagen).

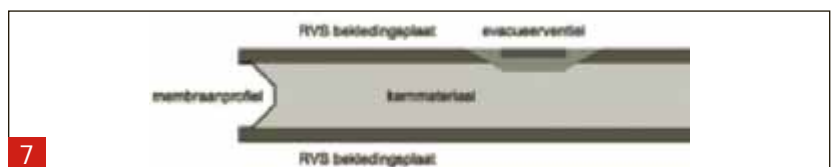
Figuur 6 geeft een overzicht van de vergelijking tussen de numeriek (TRISCO) en analytisch berekende ψ-waardes



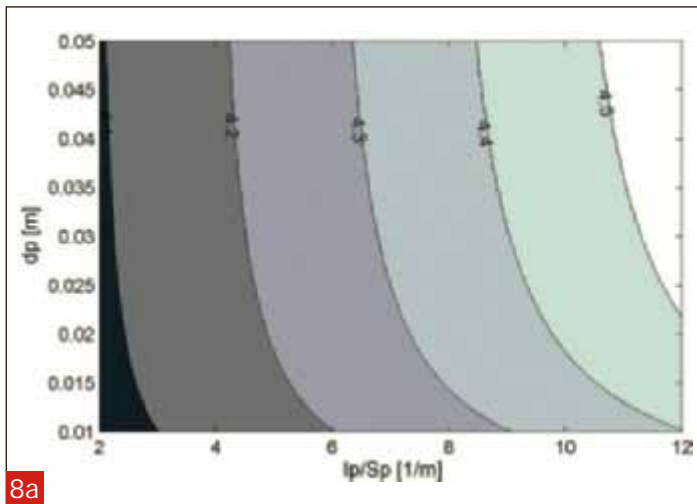
Algemeen gedrag van de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt van een typische 3-laags gemetalliseerde kunststoffolielaminaat als functie van de paneeldikte en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het kernmateriaal. De getallen in de figuur representeren de warmtegeleidingscoëfficiënt van het kernmateriaal. Bij de berekening is uitgegaan van de volgende getallen: λ<sub>1</sub> = 0,54 W/(m·K); λ<sub>c</sub> = 4 · 10<sup>-3</sup> W/(m·K); φ = 1; α<sub>1</sub> = 7,8 m<sup>2</sup>·K/W; α<sub>2</sub> = 25 m<sup>2</sup>·K/W



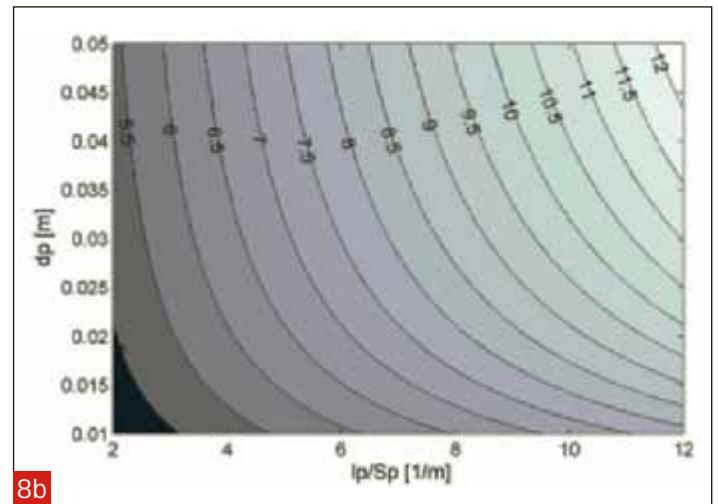
Verskil tussen de resultaten verkregen met de analytische formules en met het numerieke model



Doorsnede door een typisch vacuümisolatiepaneel met een dikke metalen omhulling



8a



8b

Effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt ( $10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) van een vacuïsimislatiepaneel als functie van de dikte (verticale as) en verhouding tussen omtrek en oppervlakte (horizontale as) van het paneel. Figuur 8a: een VIP met een gangbare 3-laags gemetalliseerd kunststoffolielaminaat. Figuur 8b: een VIP met een gangbaar aluminiumfolielaminaat met  $6 \mu\text{m}$  aluminium.  $\lambda_c = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\varphi = 1$

van alle 325 gesimuleerde varianten. Uit deze vergelijking is gebleken dat de verschillen tussen beide modellen bij 80% van alle gesimuleerde varianten kleiner is dan 5% en bij 94% van alle gesimuleerde varianten kleiner dan 10%. Deze verschillen zijn zeker voor de bouwpraktijk zodanig klein dat het analytische model goed gebruikt kan worden. De grootste relatieve verschillen worden overigens gevonden bij lage  $\psi$ -waarden met als gevolg dat de absolute verschillen dus ook in deze gevallen – voor de bouwpraktijk verwaarloosbaar – klein zijn.

De analytische formule is afgeleid voor vacuïsimislatiepanelen met een zeer dunne barrièrefolie. Naast deze variant bestaan er echter ook vacuïsimislatiepanelen met een dikkere roestvast stalen omhulling. Deze VIPs bestaan aan beide zijden van het kernmateriaal uit een enkele millimeters dikke metalen plaat die aan de zijkanalen afgesloten is met een 0,3 mm dik geprofileerd randmembraan (figuur 7). Deze vacuïsimislatiepanelen worden soms ook wel vacuïsimislatie sandwichpanelen genoemd [13, 14, 15]. Als gevolg van de complexere rand bij deze panelen ontstaat een grotere afwijking tussen de analytische vergelijking en numerieke modellen. Om het koudebruggeffect optredend bij dergelijke vacuïsimislatiepanelen, maar ook bij bouwcomponenten met geïntegreerde VIPs, te kunnen berekenen is door de auteurs ook een uitgebreidere analytische vergelijking afgeleid die hier niet nader wordt besproken [1, 16].

#### BETEKENIS VOOR DE PRAKTIJK

##### Thermische prestatie

Met behulp van de hiervoor besproken analytische formules 1, 2 en 3 is het nu mogelijk om de thermische prestatie van een vacuïsimislatiepaneel weer te geven als functie van de paneeldikte,  $d_p$  [m], en de verhouding van de omtrek tot het oppervlak van het paneel,  $I_p / S_p$  [ $\text{m}^{-1}$ ].

Figuur 8 laat de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt zien van een VIP met  $\lambda_c = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , zowel met

een aluminiumfolielaminaat met  $6 \mu\text{m}$  aluminium (figuur 8b) als een drie-laags gemetalliseerde kunststoffolielaminaat (figuur 8a). Zoals duidelijk is te zien aan deze twee voorbeelden en volkomen in overeenstemming met de verwachting, is het koudebruggeffect van een aluminiumfolielaminaat beduidend sterker dan van een gemetalliseerd kunststoffolielaminaat; de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt is immers groter. Vooral bij kleine vacuïsimislatiepanelen, dus bij een grote verhouding  $I_p / S_p$ , zijn aluminiumfolielaminaten vanuit thermisch oogpunt niet geschikt. Zoals zal blijken uit een volgend artikel in Bouwfysica 1-2011, zijn aluminiumfolielaminaten beter bestand tegen hoge temperaturen dan gemetalliseerde kunststoffolielaminaten. Vooral bij hoge temperatuur toepassingen, kan het soms daarom toch beter zijn om te kiezen voor een aluminiumfolielaminaat.

##### Vergelijking met conventionele alternatieven

De thermische prestatie van VIPs kan ook worden vergeleken met die van alternatieve isolatiematerialen. Hiervoor kunnen twee situaties worden bekeken: enerzijds de beginconditie van een vacuïsimislatiepaneel en de conditie na 25 jaar gebruik. Zoals in het vervolgartikel zal worden besproken, is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de kern van een vacuïsimislatiepaneel niet constant gedurende de tijd. Deze neemt langzaam maar geleidelijk toe door toetreding van vooral stikstof, zuurstof en waterdamp in het kernmateriaal. Simmler en Brunner [8] hebben op basis van langdurige metingen grofweg vastgesteld dat voor VIPs met een drie-laags gemetalliseerde kunststoffolielaminaat en voor VIPs met een aluminiumfolielaminaat de warmtegeleidingscoëfficiënt van het kernmateriaal na 25 jaar is toegenomen van  $4 \cdot 10^{-3}$  tot  $8 \cdot 10^{-3}$  respectievelijk  $6 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  bij voor de bouw standaard paneelafmetingen en omgevingscondities. Deze waarden zijn ook aangehouden voor de berekening van de effectieve warmtedoorgangcoëfficiënt na 25 jaar in tabel 2.

1 Ter verduidelijking van de grootte  $I_p / S_p$  hieronder enkele getalvoorbeelden: paneel van  $0,3 \times 0,4 \text{ m}^2$  geeft  $I_p / S_p = (0,3+0,3+0,4+0,4)/(0,3 \times 0,4) = 11,7/\text{m}$ ; paneel van  $0,3 \times 0,6 \text{ m}^2$  geeft  $I_p / S_p = 10/\text{m}$ ; paneel van  $0,6 \times 1,0 \text{ m}^2$  geeft  $I_p / S_p = 5,3/\text{m}$ ; paneel van  $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$  geeft  $I_p / S_p = 4/\text{m}$ ; paneel van  $2,0 \times 2,0 \text{ m}^2$  geeft  $I_p / S_p = 2/\text{m}$ .

Tabel 2: Effectieve warmtedoorgangscoefficiënt van kenmerkende VIPs en enkele conventionele isolatiematerialen

| $d_p$ [mm] | $U_{eff}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |                  |                         |      |                            |      |                         |      |           |         |      |         |
|------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------|------|----------------------------|------|-------------------------|------|-----------|---------|------|---------|
|            | VIP 0,6x1,2 m <sup>2</sup>        |                  |                         |      | VIP 0,3x0,6 m <sup>2</sup> |      |                         |      | cellulose | glaswol | PU   | aerogel |
|            | na productie <sup>a</sup>         |                  | na 25 jaar <sup>a</sup> |      | na productie <sup>a</sup>  |      | na 25 jaar <sup>a</sup> |      |           |         |      |         |
|            | AF6 <sup>b</sup>                  | MF3 <sup>b</sup> | AF6                     | MF3  | AF6                        | MF3  | AF6                     | MF3  |           |         |      |         |
| 10         | 0,60                              | 0,40             | 0,76                    | 0,72 | 0,82                       | 0,42 | 0,97                    | 0,74 | 2,55      | 2,38    | 1,85 | 1,13    |
| 20         | 0,38                              | 0,21             | 0,47                    | 0,39 | 0,57                       | 0,22 | 0,65                    | 0,40 | 1,63      | 1,49    | 1,10 | 0,63    |
| 30         | 0,29                              | 0,14             | 0,35                    | 0,27 | 0,45                       | 0,15 | 0,51                    | 0,28 | 1,20      | 1,09    | 0,78 | 0,43    |
| 40         | 0,24                              | 0,11             | 0,28                    | 0,20 | 0,38                       | 0,11 | 0,42                    | 0,21 | 0,94      | 0,85    | 0,61 | 0,33    |
| 50         | 0,20                              | 0,09             | 0,24                    | 0,16 | 0,32                       | 0,09 | 0,36                    | 0,17 | 0,78      | 0,70    | 0,49 | 0,27    |

NB:  $\varphi = 0,67$ ;  $\alpha_1 = 7,8$  W/(m<sup>2</sup>·K);  $\alpha_2 = 25$  W/(m<sup>2</sup>·K);  $\lambda_{cellulose} = 45 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K);  $\lambda_{minwol} = 40 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K);  $\lambda_{PU} = 27 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K);  $\lambda_{aerogel} = 14 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K).

<sup>a</sup> Initiële conditie van alle VIPs:  $\lambda_c = 4 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K); condities na 25 jaar: AF 6  $\mu$ m:  $\lambda_c = 6 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K); MF3:  $\lambda_c = 8 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K).

<sup>b</sup> De hier gebruikte afkortingen AF6 en MF3 staan voor een aluminiumfolielaminaat met een aluminium laagdikte van 6  $\mu$ m respectievelijk een 3-laags gemetalliseerde kunststoffielaminaat.

Tabel 2 geeft een vergelijking tussen de effectieve thermische prestatie van een VIP met standaardafmetingen (0,6x1,2 m<sup>2</sup>), een VIP met kleine afmetingen (0,3x0,6 m<sup>2</sup>) en enkele gangbare isolatiematerialen. Hieruit valt duidelijk op te maken dat VIPs met standaardafmetingen eigenlijk altijd thermisch beter presteren dan even dikke conventionele isolatiematerialen, zelfs als rekening wordt gehouden met de prestatie na 25 jaar. Bij kleine panelen ligt het iets anders. Daar gaat het koudebrugeffect een dominantere rol spelen, zeker indien gebruik wordt gemaakt van relatief dikke metaallagen in de barriërfolie. In die gevallen kunnen nano-poreuze aerogel isolatiedekens [17] – de meeste poriën hebben een grootte kleiner dan 2 nm – thermisch soms beter presteren dan VIPs. Alleen de VIPs met een gemetalliseerd kunststoffielaminaat blijven beter presteren dan alternatieve isolatiematerialen.

### CONCLUSIES

Een belangrijk aspect van vacuümisolatiepanelen zijn koudebrugeffecten. Deze koudebrugeffecten zijn inherent aan VIPs omdat zij worden veroorzaakt door de barriërfolie rondom het kernmateriaal. Samen met de thermische eigenschappen van het kernmateriaal bepalen deze koudebrugeffecten de effectieve thermische prestatie van een VIP.

Het koudebrugeffect als gevolg van het laminaat wordt gekarakteriseerd door de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt. Over het algemeen geldt dat hoe dikker en meer geleidend de barriërfolie is, hoe groter de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt is; en dat hoe lager de warmtegeleidingscoëfficiënt van het kernmateriaal is, hoe groter de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt is. Daarnaast geldt in het algemeen dat de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt eerst toeneemt naar een maximum en vervolgens afneemt naar nul indien de paneeldikte toeneemt. In het voor de bouw relevante diktegebied,  $d_p > 20$  mm, geldt dat de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt afneemt met toenemende paneeldikte. Alles bij elkaar genomen genieten

gemetalliseerde kunststoffielaminaten vanuit thermisch perspectief de voorkeur boven aluminiumfolielaminaten.

Voor de berekening van de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt is een analytische formule gepresenteerd die vergelijkbare resultaten geeft als numerieke berekeningen met zowel TRISCO als COMSOL Multiphysics. Voor VIPs met een dikte van meer dan 20 mm en een gemetalliseerd kunststoffielaminaat kan deze formule echter worden vereenvoudigd tot  $\lambda'_f t'_f / d_p$ . Als nog sterkere vereenvoudiging kunnen als bovengrens voor de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt van een VIP met een 3-laags gemetalliseerde kunststoffielaminaat respectievelijk een aluminiumfolielaminaat met maximaal een 6  $\mu$ m dikke aluminium laag de waardes  $6 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K) en  $5 \cdot 10^{-2}$  W/(m·K) worden gehanteerd.

Op basis van de analytische formules kan de effectieve thermische prestatie van een VIP worden berekend en vergeleken met alternatieve isolatiematerialen. Uit deze vergelijking blijkt dat VIPs, zeker de grote panelen en de panelen met een slecht geleidende barriërfolie, vrijwel altijd beter presteren dan deze alternatieven; alleen kleine panelen met een aluminiumfolielaminaat als barriërfolie kunnen na 25 jaar thermisch slechter presteren dan aerogel isolatiedekens. Daarmee zijn vacuümisolatiepanelen dus in potentie zeer interessant voor de bouwsector. Andere overwegingen zoals kwetsbaarheid, kosten en lange termijn gedrag kunnen echter toch leiden tot de keuze voor één van de alternatieven. In het vervolgartikel dat in Bouwfysica 1-2011 verschijnt, zal daarom het lange termijn gedrag van VIPs nader worden beschouwd en zullen voorbeelden van toepassing in gevelementen worden getoond. ■

Voor meer en uitgebreidere informatie over vacuümisolatiepanelen wordt verwezen naar het proefschrift [1] dat tegen een vergoeding van 30 euro verkrijgbaar is bij de auteur (m.j.tenpierik@tudelft.nl).



## BRONNEN

- [1] Tenpierik, M.J., Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft, 2010
- [2] Earthtrends, Earthtrends Data Tables: Energy Consumption by Sector 2005, tabel, [online], beschikbaar op: [http://earthtrends.wri.org/pdf\\_library/data\\_tables/ene3\\_2005.pdf](http://earthtrends.wri.org/pdf_library/data_tables/ene3_2005.pdf), [20 oktober 2008]
- [3] Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi Wakili, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H., Cauberg, J.J.M., Tenpierik, M.J., Johannesson, G.A., Thorsell, T.I., Erb, M. en Nussbaumer, B., Vacuum Insulation in the Building Sector – Systems and Applications – Subtask B, IEA ECBCS Annex 39, Parijs, 2005
- [4] NEN 1068:2001, Thermische isolatie van gebouwen – Rekenmethoden, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 2001
- [5] NEN-EN-ISO 10077-1:2004, Thermische eigenschappen van ramen, deuren en luiken – Berekening van de warmtedoorgangscoefficiënt – Deel 1: Algemeen, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 2004
- [6] NEN-EN 13947:2000, Thermische eigenschappen van vliesgevels – Berekening van de warmtegeleiding – Vereenvoudigde methode, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 2000
- [7] Schwab, H., Stark, C., Wachtel, J., Ebert, H.-P en Fricke, J., Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Facades, Journal of Thermal Envelope and Building Science 28 (4): 345-355, 2005
- [8] Simmler, H. en Brunner, S., Vacuum insulation panels for building application – Basic properties, aging mechanisms and service life, Energy and Buildings 37 (11): 1122-1131, 2005
- [9] Tenpierik, M.J. en Cauberg, J.J.M., Analytical Models for Calculating Thermal Bridge Effects Caused by Thin High Barrier Envelopes around Vacuum Insulation Panels, Journal of Building Physics 30 (3): 185-215, 2007
- [10] Tenpierik, M.J., Spoel, W.H. van der en Cauberg, J.J.M., Analytical Model for Predicting Thermal Bridge Effects due to Vacuum Insulation Panel Barrier Envelopes, Bauphysik 30 (1): 38-45, 2008
- [11] Ghazi Wakili, K., Bundi, R. en Binder, B., Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation panels, Building Research and Information 32 (4): 293-299, 2004
- [12] Cauberg, J.J.M., Vacuümisolatiepanelen – mogelijkheden voor de bouw, Bouwfysica 12 (1): 4-8, 2002
- [13] Willems, W.M. en Schild, K., The use of vacuum insulated sandwiches (VIS) in building constructions, In: Proceedings of the 4th European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, ENTPE, Lyon, November 20-22, 2006
- [14] Willems, W.M., Schild, K. en Hellinger, G., Numerical Investigation on Thermal Bridge Effects in Vacuum Insulating Elements, In: M. Zimmermann (ed.), Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, EMPA, Dübendorf, September 28-29, 2005
- [15] Cauberg, J.J.M. en Tenpierik, M.J., 4.1 Vacuümisolatiepanelen en andere noviteiten, In: D.W. Dicke en E.M. Haas (eds.), Praktijkhandboek Duurzaam Bouwen, Uitgeverij Weka, Amsterdam, 2005
- [16] Tenpierik, M.J., Spoel, W.H. van der en Cauberg, J.J.M., An Analytical Model for Calculating Thermal Bridge Effects in High Performance Building Enclosure, J. of Building Physics 31 (4): 361-387, 2008
- [17] Aspen Aerogels, Ultra thin spaceloft® insulation, brochure, Aspen Aerogels Inc., Northborough, 2007

## SYMBOLLEN

|                  |  |                         |
|------------------|--|-------------------------|
| B                | parameter in de formule voor de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt              | [m <sup>-2</sup> ]      |
| d <sub>p</sub>   | dikte van het kernmateriaal  | [m]                     |
| D                | parameter in de formule voor de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt              | [m <sup>-4</sup> ]      |
| l                | lengte van een zijrand van een paneel  | [m]                     |
| N                | parameter in de formule voor de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt              | [m <sup>-1</sup> ]      |
| R                | warmteweerstand  | [m <sup>2</sup> ·K/W]   |
| S <sub>p</sub>   | oppervlakte van een paneel   | [m <sup>2</sup> ]       |
| t <sub>f</sub>   | dikte van de barrièrefolie   | [m]                     |
| t' <sub>f</sub>  | dikte van de barrièrefolie aan de zijkant van een VIP                            | [m]                     |
| U <sub>cop</sub> | warmtedoorgangscoefficiënt van het midden van een paneel                         | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
| U <sub>eff</sub> | effectieve warmtedoorgangscoefficiënt van een geheel paneel                      | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
| α                | warmteoverdrachtscoefficient   | [W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
| λ <sub>c</sub>   | warmtegeleidingscoefficient van het kernmateriaal                                | [W/(m·K)]               |
| λ <sub>eff</sub> | effectieve warmtegeleidingscoefficient van een VIP                               | [W/(m·K)]               |
| λ <sub>t</sub>   | warmtegeleidingscoefficient van de folie   | [W/(m·K)]               |
| λ' <sub>t</sub>  | warmtegeleidingscoefficient van de folie aan de zijkant van een VIP              | [W/(m·K)]               |
| λ <sub>1,2</sub> | eigenwaarde van lineair stelsel differentiaalvergelijkingen                      | [m <sup>-1</sup> ]      |
| φ                | verhouding van λ <sub>t</sub> t <sub>f</sub> tot λ' <sub>t</sub> t' <sub>f</sub> | [-]                     |
| ψ <sub>vip</sub> | lineaire warmtedoorgangscoefficiënt van een zijkant van een VIP                  | [W/(m·K)]               |