aan Martin Tenpierik, Arthur Horeman

van Evert Hasselaar

Datum 19 januari 2012

Betreft concept eindversie artikel :

Isoleren met reflecterende folie: fabel of innovatie?

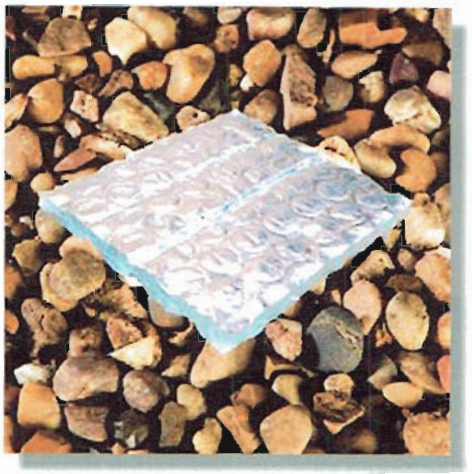
1. Inleiding

De aandacht voor energiebesparing als economische noodzaak en tegen klimaatverandering brengt innovatieve producten voort. Isolatiematerialen worden verbeterd: nieuwe soorten schuim, isolatie op basis van vlas of papier, vacuümisolatie en meerlaagse dunne lagen gescheiden door reflectiefolies. Dit artikel gaat over reflecterende folies met diverse scheidingsmaterialen ertussen en met geringe diktes, tot 30 mm. De onderzoekswereld en de markt vertonen tegengestelde reacties op de meerlaagse folies: van enthousiast tot verwijzend naar het land van fabels. Soms worden de geclaimde hoge isolatiewaarden niet door attesten bevestigd. De discussie spitst zich uiteindelijk toe op de toepasbaarheid van de voorgeschreven hot box (NEN-EN-ISO8990:2007) of hot plate (ISO8302:1991) testmethode voor isolatiematerialen. Fabrikanten claimen met alternatieve testmethoden een R-waarde van 5 tot 6 m^2K/W, waar de hot box methode en praktijktests een *R*-waarde in de orde van 1,7 m^2K/W aangeven.

Als het materiaal goed werkt, verdient de toetsing een betere behandeling. Maar als dit materiaal of een specifieke oplossing niet doet wat beloofd, dan moet de bouwwereld tegen toepassing ervan gewaarschuwd worden.

Voor de behandeling van isolatiematerialen kiezen we voor de niet-lichtdoorlatende constructies, zoals gevels, dake en vloeren. Bovendien kiezen we voor isolatie van verwarmde ruimtes en valt het reflecteren van zonnewarmte hie buiten. Het artikel begint met een literatuurverkenning van berekeningen, laboratorium tests en praktijkmetingen, zowel van fabrikanten als van onderzoeksinstellingen. Daarna volgt de behandeling van de natuurkundige principes van isolerende constructies. Vervolgens presenteren we een rekenvoorbeeld die de werking van reflecterende folie isolatiematerialen toegankelijker maakt.

http://www.bbacerts.co.uk/PDF



Reflex-Air™ DOUBLE Bubble REFLECTIVE Insulation

Figuur 1: Voorbeelden van isolatiemateriaal gebaseerd op reflecterende folie. (http://www.bbacerts.co.uk/PDF).

2. Historische ontwikkeling

De bekendste toepassing van de isolerende eigenschappen van reflecterend materiaal is de thermosfles, een combinatie van vacuümisolatie met reflectiestop om gekoelde of hete vloeistoffen op temperatuur te houden. De eerste toepassing van folie is van platgeslagen tin. Rond 1900 kwam aluminiumfolie in de aandacht. De isolerende eigenschappen werden in 1907 door Neher en Lauder in Zwitserland herkend. Neher en Zonen begonnen in 1910 met fabrieksmatige productie van aluminiumfolie. In de Verenigde Staten werd folie vanaf 1913 geproduceerd. De belangrijkste toepassing was de verpakking van voedsel. De combinatie aluminium en plastic folie wordt toegeschreven aan de ruimtevaartorganisatie NASA, die in de jaren 1950 zocht naar een ruimtebesparend isolatiemateriaal om ruimtevaartuigen en astronauten te beschermen tegen extreme stralingstemperaturen. Deze kennis leidde tot de huidige generatie folies met opgedampte aluminium laag. Sinds de marktintroductie in de jaren 1960 volgde al snel de toepassing als isolatiemateriaal in de bouw, met name als dampdichte laag en als reflecterende laag onder de dakbedekking.

Van een reflecterende folie kan geen *U*-waarde of *R*-waarde gegeven worden, omdat het materiaal zelf geen isolerende eigenschappen heeft. Na toepassing kan van een constructie wel een *R*-waarde worden bepaald. Vandaa dat in de communicatie over het product de nadruk ligt op vergelijkbare isolatiewaarden. Verder worden de histori (ruimtevaart), het geringe volume en gewicht (handig bij transport) en de gemakkelijke verwerkbaarheid door de leveranciers onder de aandacht gebracht; daarnaast wordt veelvuldig verwezen naar vele duizenden vierkante meters toepassing. Enige vechtersmentaliteit spreekt uit die communicatie-uitingen.

De recente discussie over reflecterende isolatiefolies woedt sinds een praktijktest in Engeland in 2005, die op verzoek van zich nadelig beconcurreerd voelende fabrikanten van "traditionele" isolatiematerialen werd "overgedaan" door de British Research Establisment (BRE); dit laatste instituut vond veel lagere warmteweerstanden. Daarop werd weer een nadere analyse gedaan door een fabrikant van reflectiefolies en ontstond een heftige strijd over de prestaties, die van Engeland op het vasteland van Europa oversloeg. De reclamecodecommissie gaf concurrenten van reflectiefolies in Engeland in 2005 gelijk en veroordeelde de claim var hoge isolatiewaarde tot misleidende informatie. Een internetforum dat van maart 2006 tot maart 2007 aandacht aa reflecterende isolatiefolies besteedde, presteerde het om in anderhalf jaar 148 pagina's aan reacties te produceren wat neerkomt op een kleine duizend berichten. Zelfs op de laatste pagina's was de mening over het product nog nie uitgekristalliseerd (http://www.greenbuildingforum.co.uk/forum/index2.php?DATEIN=tpc_wlpssdlpg_1142805843&showpage=148).

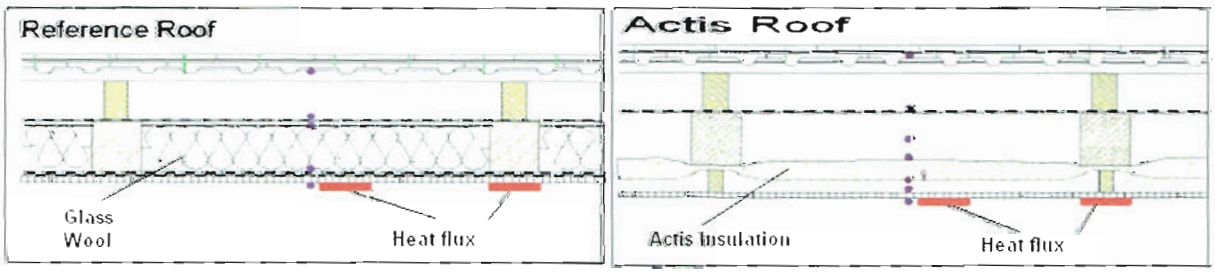
De discussie leverde interessante vragen op, bijvoorbeeld deze opmerking: "Martian, I'm confident that when you c become convinced about how multifoils work (well in dynamically changing temp scenarios, hardly at all in steady-state) then you'll be instrumental in LABC circles; also in pointing out that conventional insulations do the opposite (well in steady-state, hardly at all in dynamically changing temp scenarios) " (geplaatst op 02-02-2007) of "The poin about vacuum/radiation is that it seems probable this product originated for space applications, to protect against the intense radiation of the sun. In houses on earth, conduction, convection and air leakage losses are far more important than radiation losses, and so MF might be a case of an excellent material being sold for the wrong application ..." (geplaatst op 14-02-2007). Daarnaast ontstond ook de vrees om door producenten aangeklaagd te worden voor kritiek op de geclaimde kwaliteit. Het is daarom niet verwonderlijk dat het product nog steeds beroering veroorzaakt, ook in de wereld van certificaten en attesten. Dat vormt een uitdaging om ons erin te verdiepen.

3. Literatuurverkenning

Frawley (2009) analyseerde diverse onderzoeksrapporten en concludeerde dat reflectiefolie een duidelijk isolerend effect heeft als het als enige isolatie in de schil wordt toegepast. Ook werkt isolatie met schuimplaten of minerale wol dekens iets beter met reflecterende folie als buitenste laag. Het effect van de reflectiestop lijkt af te nemen naarmate het isolatiepakket dikker wordt. De studie geeft diverse meetsituaties weer en verklaart dat de claims va de hoge isolatiewaarde voortkomen uit praktijkmetingen, waarbij men twee ruimten ('huisjes') voorzien van reflecterende respectievelijk minerale wol isolatie aan de buitencondities blootstelt. Beide ruimten zijn in een winterperiode op een constante temperatuur gehouden, waarna men het energiegebruik van de ruimte als basis voor de warmteweerstand van het isolatiemateriaal neemt.

Om deze situatie zorgvuldig te reconstrueren werd een testopstelling gebouwd in een klimaatruimte met gecontroleerde omstandigheden. Daaruit kwam hetzelfde goede resultaat naar voren, namelijk dat bij lage buitentemperaturen een meerlaagse isolatie op basis van reflectiefolie van 25 mm vergelijkbaar isoleert als 20 cm minerale wol. Bij een stationaire conditie van -5 °C aan de ene kant en kamertemperatuur aan de andere kant isoleert het materiaal nog beter dan 200 mm minerale wol; bij kleinere temperatuurverschillen ongeveer gelijkwaardig.

Ook BM Trada (2009) heeft een praktijktest gedaan met drie identieke daksegmenten, speciaal gebouwd voor de proef en respectievelijk niet geïsoleerd, geïsoleerd met meerlaagse folie en geïsoleerd met minerale wol. Ook uit deze test, die vijf weken liep, bleek de meerlaagse folie van 25 mm vergelijkbaar tot beter te presteren dan 21 cm minerale wol. In de testwoningen in Duitsland was bovendien de minerale wol aan de binnenzijde afgewerkt met ee folie. Soortgelijke resultaten werden geboekt in twee testwoningen van het Fraunhofer instituut in Duitsland en in Limoux in Frankrijk van SFRIMM (gebaseerd op Frawley, 2009).



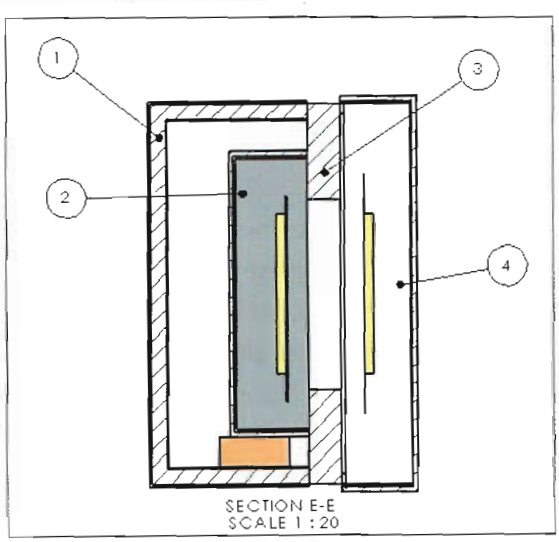
Figuur . Doorsnede over het referentiedak en het dak geisoleerd met minerale wol

Toen kwamen resultaten van metingen volgens de hot box-methode. Deze hot box bestaat uit twee kamers, die ieder op temperatuur gehouden worden, met een gecontroleerd verschil van 10 graden. De scheiding tussen de twee kamers bestaat uit het te testen materiaal of constructie. In geval van reflecterende folies wordt de folie tusse twee platen bevestigd, opdat twee spouwen ter weerszijden van de reflectiefolies meetellen met het gemeten effect. De via deze methode bepaalde isolatiewaarden is een derde of minder van de waarde die eerder volgde uit praktijktests. Door het National Physics Laboratory in Engeland (Williams en Ballard, 2007) en ook door het Building Research Establishment in Schotland (Ward, T.I. en S.M. Doran, 2005) werd daarmee de geringe isolatiewaarde bewezen en werden de praktijktests als niet bruikbaar verklaard. Wel dook in de discussie het verschil in omstandigheden op: in de hot box is de lucht bijna stilstaand en zijn de condities stabiel, terwijl in praktijkomstandigheden veel lucht langs het materiaal stroomt en de temperaturen buiten fluctueren. Wisseling in temperatuur geeft vanwege de thermische capaciteit van minerale wol een kleine verschuiving in tijd, terwijl reflectiefolies temperatuurschommelingen nauw volgen.

Het WTCB in België (Flamand et al., 2006) heeft zowel metingen als berekeningen gemaakt, echter ook uitgaande v stilstaande lucht in de spouw. De aanpak was zeer zorgvuldig en weloverwogen vanwege de actuele discussies. De conclusie van het WTCB is dat reflecterende folies niet beter werken dan de dikte van het materiaal uitgedrukt in isolatiemateriaal plus een toeslag voor het effect van de reflectiestops aan de buitenzijde. Ook dat levert bij vergelijking met dikke pakketten minerale wol op dat men eerder van een derde isolatiewaarde moet uitgaan.

De fabrikanten van reflecterende folie-isolatie bestreden met succes dat alleen de Hot Box methode bruikbaar is voor accreditatie, waarmee de fabrikanten dus op basis van praktijktests nog steeds in staat zijn om de praktijkwaarde van hun producten onder de aandacht te brengen en daarmee marktaandeel te behouden. De concurrentiestrijd met de fabrikanten van schuimen en minerale wol is daardoor in hevigheid toegenomen.

Guarded of callibrated hot box methode



1: Guard Box
2: Metering Box
3: Surround Panel
4: Cold Box

Fig. hot box

De gekalibreerde hot box is voor isolatiematerialen en voor complexe grote constructies het meest erkende meetsysteem. De hot box kan in alle richtingen gedraaid worden. Samengestelde bouwkundige elementen met een

grootte van enkele m^2 kunnen ingebouwd worden. De totale warmteoverdracht van de warme naar de koude kame wordt gemeten. Er is sprake van een stationaire toestand in de koude respectievelijk de warme helft in de box, waardoor minder convectie zal optreden aan de gemeten oppervlakken dan in praktijksituaties.

In tabel 1 geven we de uitkomsten van metingen aan diverse folie-isolatiematerialen onder verschillende condities gemeten met de guarded of calibrated hot box. Deze metingen uitgevoerd onder laboratoriumomstandigheden lat heel duidelijk een isolatiewaarde van reflecterende folie-isolatie zien in de orde van 1.5 tot net boven de 2.0 m^2K/W bij een isolatiedikte van rond de 20 mm (Celotex, 2004; Flamand et al., 2006; Williams en Ballard, 2007; König, 2007 Hauser et al., 2011; Frawley, 2009). De precieze waarde hangt onder andere af van de precieze dikte, de richting va de warmtestroom en van de waarde van de emissiecoëfficiënt. Duidelijk valt uit de resultaten tevens af te leiden da reflecterende folie-isolatie het beste presteert indien de warmtestroom naar beneden gaat, dus indien het isolatiemateriaal onder een vloer hangt, met luchtspouwen. De metingen van het Fraunhofer IBP (König, 2007; Hauser et al., 2011), twee metingen van Dublin Institute of Technology (Frawley, 2009) en een meting van het Brits Board of Agrément (BBA, 2006/2007) laten een iets lagere warmteweerstand zien. De belangrijkste reden hiervoor dat in die metingen er geen spouw aan weerszijden van het isolatiemateriaal aanwezig was terwijl dat bij de overig Hot Box metingen wel het geval was. Bij de metingen van het Fraunhofer IBP grenst het isolatiemateriaal aan beide zijden direct aan de ruimtelucht en bij de twee metingen van Dublin Institute of Technology grenst het isolatiemateriaal aan een zijde aan een spouw en aan de andere zijde aan de ruimtelucht. In de gemeten waarden i wel de lagere warmteoverdrachtcoëfficiënt voor straling aan de oppervlaktes grenzend aan de ruimtelucht verdisconteerd.

(Guarded of Callibrated) Hot Box methode										
test-instituut	jaar	dikte isolatie [mm]	spouwdikte langs isolatie [mm]	ε_{folie}	ΔT [k]	T_{gem} [°C]	R_{tot} [m²K/W]			bronnen
							Warmte-stroom ↑	Warmte-stroom ↓	Warmte-stroom →	
FIW München	2001	25	n.a.[a]	n.a.	n.a.	n.a.	1.21			Celotex, 2004
NPL	2004	7.49	2x20	0.06 ± 0.01	n.a.	n.a.	-	1.60 ± 0.06	-	Celotex, 2004; Flamand et al., 2006; Williams en Ballard, 2007
		25[b]	1x90	niet gemeten	n.a.	n.a.	±1.40 / ±1.46[c]	-	1.60	
		25[b]	2x45	niet gemeten	n.a.	n.a.	1.71 / ±1.80[c]	-	1.89	
WTCB	2006	7.5	2x20	0.06 ± 0.01[d]	10	10	1.05 ± 0.06	1.53 ± 0.09	-	Flamand et al., 2006
		18.8	2x20	0.18 ± 0.02[d]	10	10	1.55 ± 0.09	1.61 ± 0.10	-	
		19.2	2x20	0.19 ± 0.11 / 0.16 ± 0.13[d]	10	10	1.26 ± 0.08	1.63 ± 0.10	-	
NPL	2007	23 (gemiddeld)	±43 en ±83	niet gemeten	19	10	1.89 ± 0.08	2.88 ± 0.12	2.04 ± 0.08	Williams en Ballard, 2007
Fraunhofer IBP	2007	n.a. n.a.	geen[a]	niet gemeten	20.7	10.5	-	-	0.72	König, 2007
		n.a.	n.a.		20.8	9.7	-	-	n.t.h.	
		n.a.	n.a.		20.8[e]	9.7	-	-	n.t.h.	
			n.a.		0.0[f]	25.0	-	-	n.t.h.	
BBA	2006-2007	30	±25 en ±70	0.16	n.a.	n.a.	1.69[g]	-	-	BBA, 2007
		30	geen[a]	0.16	n.a.	n.a.	0.91[g]	-	-	
Fraunhofer IBP	2007-2008	n.a.	geen[a]	0.05	n.a.	n.a.	-	-	1.00	Hauser et al., 2011
Dublin Institute of Technology	2009	25	50 en 32	niet gemeten	25.6	n.a.	-	-	1.68 ± 0.30[i]	Frawley, 2009
		25	95 en groot[h]		26.7	n.a.	-	-	1.00	
			95 en groot[h]		27.1	n.a.	-	-	0.70	

Tabel 1: Overzicht van uitgevoerde onderzoeken naar meerlaagse reflecterende folie-isolatie op basis van de Hot Box methode.

N.t.h. betekent 'niet te herleiden uit de gepresenteerde data'.
N.a. betekent 'gegevens niet beschikbaar'.
[a] *Bij deze metingen was het folie-isolatiemateriaal niet ingebouwd in een constructie maar als los materiaal getest. Het materiaal grensde dus direct aan de lucht in de ruimtes.*
[b] *de resultaten van aanvullende metingen voor drie warmtestroomrichtingen en spouwbreedtes kunnen in het rapport worden teruggevonden. De gemeten waarden variëren van net onder 1.1 m^2K/W tot ongeveer 1.4 m^2K/W voor twee spouwen van 30 mm en van net onder 1.3 m^2K/W tot ongeveer 2.0 m^2K/W voor twee spouwen van 60 tot 65 mm.*
[c] *de testopstelling stond onder een hoek van 45°.*
[d] *gemeten door TNO.*
[e] *aanvullend koud vlak aan de buitenzijde met -25°C straling onttrekkend van het buitenoppervlak van het dakcomponent.*
[f] *aanvullend warm vlak dat 600 W/m^2 straalt naar het buitenoppervlak van het dakcomponent.*
[g] *deze waarde houdt rekening met koudebrugeffecten van een houten frame. De metingen zijn verricht onder een hoek van 45°.*
[h] *aan een zijde grensde het folie-isolatiemateriaal aan de lucht van de ruimte (de lagere overdrachtscoëfficiënt straling aan het oppervlakte zit in deze waarde verdisconteerd).*
[i] *deze waarde omvat ook de gipsplaat aan een zijde van de constructie.*

Guarded hot plate methode

Bij een hot plate methode wordt het materiaal direct tegen geklimatiseerde warme en koude platen geplaatst. Deze methode is vooral geschikt voor homogene isolatieplaten. De metingen aan reflecterende folie-isolatiematerialen met behulp van een guarded hot plate apparaat tonen lagere isolatiewaardes dan de meeste metingen met de hot box (Flamand et al., 2006; Hauser et al., 2011). De belangrijkste reden hiervoor is dat in de hot box metingen de weerstand van de spouw aan weerszijden van het isolatiemateriaal meegerekend wordt als onderdeel van de warmteweerstand van het isolatiemateriaal. In het geval van een meting met een guarded hot plate apparaat is een dergelijke spouw niet aanwezig en grenst het isolatiemateriaal meestal aan een laag rubber dat tussen het isolatiemateriaal en de verwarmings- en koelplaten wordt gelegd. De guarded hot plate metingen laten ook lagere warmteweerstanden zien dan de guarded hot box metingen van het Fraunhofer IBP (König, 2007; Hauser et al., 2011) en de laatste twee metingen van Dublin Institute of Technology (Frawley, 2009). De verklaring hiervoor is gelegen in het wel of niet aanwezig zijn van overgangsweerstanden.

Guarded Hot Plate methode							
test-instituut	jaar	dikte isolatie [mm]	ε_{folie}	ΔT [k]	T_{gem} [°C]	R_{tot} [m^2K/W] Warmte-stroom	bronnen
WTCB	2006	7.5 18.8 19.2	0.06 ± 0.01 0.18 ± 0.02 0.19 ± 0.11 / 0.16 ± 0.13	10 10 10	10 10 10	0.205 ± 0.004 0.602 ± 0.012 0.469 ± 0.009	Flamand, et al., 2006
Fraunhofer IBP	2007-2008	n.a.	0.05	n.a.	n.a.	0.5	Hauser et al., 2011

Tabel 2: Overzicht van uitgevoerde onderzoeken naar meerlaagse reflecterende folie-isolatie op basis van de Guarded Hot Plate methode.

'Praktijkmetingen' – warmtestroommeter										
test-instituut	jaar	dikte isolatie [mm]	spouwdikte langs isolatie [mm]	ε_{folie}	ΔT [k]	T_{gem} [°C]	R_{tot} [m²K/W]			bronnen
							Warmte-stroom ↑	Warmte-stroom ↓	Warmte-stroom →	
BRE (in-situ)	2005	25	2x25	niet gemeten	n.a.	n.a.	-	-	1.72 ± 0.31	Ward en Doran, 2005
		25	430 en 15				0.96 ± 0.19	-	-	
		25	15 en geventileerde kruipruimte				-	1.85 ± 0.31	-	
Alba Building Sciences Ltd (in-situ)	2006	25	100 en 25	niet gemeten	23.8	n.a.	-	-	±1.90[a,b]	Rooney, 2006a; Rooney, 2006b
		25	100 en 25	niet gemeten	19.6	n.a.	-	-	±3.48[a,c]	
		25	100 en 25	niet gemeten	25.2	n.a.	-	-	±3.61[a]	
NPL (lab)	2007	23 (gemiddeld)	Totale spouw 85 mm	niet gemeten	20	10	1.73	2.47	-	Williams and Ballard, 2007
			Totale spouw 85 mm	niet gemeten	20	25	1.70	2.19	-	

Tabel 3: Overzicht van uitgevoerde onderzoeken naar meerlaagse reflecterende folie-isolatie op basis van in-situ metingen met een warmtestroommeter.

N.a. betekent 'gegevens niet beschikbaar'.
[a] Deze waardes zijn afgeleid van de gemeten U-waardes van de gehele muur. Aangenomen zijn hierbij de volgende waarden: warmtegeleidingscoëfficiënt van graniet en gipsplaat 2.2 resp. 0.17 W/m/K; vanwege de meetmethode alleen een overgangsweerstand aan de buitenzijde met een grootte van 0.04 m²K/W.
[b] Deze waarde bevat het resultaat van een eerste meting in het huis Victoria Road 139b, Aberdeen uit februari 2006 (Alba, 2006a).
[c] Deze waarde bevat het resultaat van een tweede meting in het huis Victoria Road 139b, Aberdeen uit maart 2006 (Alba, 2006b).

In-situ metingen met warmtestroommeter

Een warmtestroommeter is geschikt voor homogene materialen. De meting gaat uit van oppervlaktetemperaturen op omhullende vlakken, waarbij de isolatiewaarden van die vlakken wordt gecorrigeerd. Anders dan bij de hot box methode is de lucht in de omhullende luchtlagen veel meer in beweging en is er geen stabiele situatie.

Ook de praktijkmetingen uitgevoerd door het BRE op basis van een warmtestroommeter laten isolatiewaardes zien die in dezelfde orde van grootte liggen als de metingen gedaan in de hot box (Ward en Doran, 2005). In beide gevallen wordt ook hetzelfde gemeten, namelijk de warmteweerstand van het reflecterende folie-isolatiemateriaal inclusief aangrenzende spouwen. Het verschil is dat de hot box metingen onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden plaatsvinden terwijl de in-situ metingen met een warmtestroommeter onder praktijkcondities worden uitgevoerd. Het verschil is duidelijk terug te vinden in de verschillen in meetonzekerheid van beide metingen. De in-situ gemeten isolatiewaardes van reflecterende folie-isolatie door Alba Building Sciences Ltd zijn echter veel hoger dan de metingen onder laboratoriumomstandigheden (Rooney, 2006a; Rooney, 2006b). Opvallend is tevens dat Alba Building Sciences Ltd achtereenvolgens twee keer in-situ metingen heeft uitgevoerd aan dezelfde gevel waarvan de uitkomsten bijna een factor 2 van elkaar verschillen. De verklaring die Alba Building Sciences Ltd na inspectie hiervoor geeft is dat het reflecterende folie-isolatiemateriaal waarin de uitkomst 1.86 m^2K/W is, deels los hing.

Testhuisjes methode

Frappant is daarnaast dat de metingen met de testhuisjes nog minder eenduidig zijn. De metingen in testhuisjes van het WTCB komen redelijk overeen met de door henzelf gemeten waarden uit de Hot Box en met berekende waarden (Flamand et al., 2006). Ook de metingen van het Fraunhofer IBP uit 2007-2008 (Hauser et al., 2011) en de metingen van het CSTB (CSTB, 2007) laten een isolatiewaarde zien van de reflecterende folie-isolatie die slechts iets hoger ligt dan de metingen uitgevoerd in de Hot Box door andere onderzoeksinstituten. Echter de metingen van Sheffield Hallam University, Trada UK, Fraunhofer IBP uit 2005-2007, SFRIMM en TNO Q&S laten veel hogere isolatiewaardes van de reflecterende folie-isolatie zien, tot zo'n 6.1 m^2K/W aan toe (Frawley, 2009; BM Trada, 2009; Lindauer en Sinnesbichler, 2007; Maat, 2010). Hoe kan dat?

'Praktijkmetingen' - huisjesmethode							
test-instituut	jaar	dikte isolatie [mm]	spouwdikte langs isolatie [mm]	ε_{folie}	R_{tot} [m^{2}K/W]		bronnen
					Warmte-stroom ↗ (dak)	Warmte-stroom →	
Sheffield hallam University, CIM	2004-2005 buiten	25	n.a.	niet gemeten	20 cm glaswol + 26%	-	Frawley, 2009
Sheffield hallam University, CIM	2005 labo	30 30 30	30/40 en groot 30/40 en groot 30/40 en groot	niet gemeten niet gemeten niet gemeten	20 cm glaswol + 39.8% [a] 20 cm glaswol + 8.7% [a] 20 cm glaswol + 2.8% [a]	-	Frawley, 2009
TRADA UK	2006	30	n.a.	niet gemeten	±21 cm glaswol	-	BM Trada, 2009; Frawley, 2009
WTCB	2006	7.5 18.8 18.8 19.2 19.2	2x20 2x20 2x10 2x20 1x10	0.06 ± 0.01 0.18 ± 0.02 0.18 ± 0.02 0.19 ± 0.11 / 0.16 ± 0.13 0.19 ± 0.11 / 0.16 ± 0.13	- - - - -	1.73 1.72 1.43 1.55 1.15	Flamand et al., 2006
Fraunhofer IBP	2007	25	120+160 (gescheiden) en 60	niet gemeten	±20 cm glaswol (warmtetoevoer) / ±3.33 (warmtestroommeter)	-	Lindauer en Sinnesbichler, 2007
SFRIMM	2007	n.a.	140 en 40	niet gemeten	20 cm glaswol + 28.4%	-	Frawley, 2009
CSTB	2005-2006	n.a.	80 en 100	niet gemeten	20 cm glaswol – 50.2%		CSTB, 2007
Fraunhofer IBP	2007-2008	n.a.	120+195 (gescheiden) en 45 120-240	0.05	2.0	-	Hauser et al., 2011
TNO Q&S	2010	24 [b] 40 [b]	n.a. n.a.	niet gemeten niet gemeten	- -	2.36 ± 0.02 3.42 ± 0.02	Maat, 2010

Tabel 4: Overzicht van uitgevoerde onderzoeken naar meerlaagse reflecterende folie-isolatie op basis van de huisjesmethode.

N.a. betekent 'gegevens niet beschikbaar'.
[a] de eerste meting uitgevoerd bij een binnen- en buitentemperatuur van 21°C en -5°C respectievelijk; de tweede meting bij 21°C en 0°C; de derde meting bij 21°C en 5°C.
[b] de buitenste lagen bestaan uit 2x8 mm bubbeltjesfolie en niet uit reflecterende folie.

4. Vergelijking diverse onderzoeken

Tabellen 1 tot en met 4 laten een overzicht zien van de resultaten van uitgevoerd onderzoek naar reflecterende folie-isolatiematerialen. Deze onderzoeken kunnen onderverdeeld worden in de guarded of calibrated hot box methode, de guarded hot plate methode, in-situ metingen met een warmtestroommeter en metingen in testhuisjes. Metingen met de hot box komen uit op een R_{totaal}-waarde variërend van 1,4 tot ruim 2 m^2K/W, waarbij de verschillen toegeschreven kunnen worden aan de spouwdikte (veel invloed), de richting van de warmtestroom (verschil tussen naar boven of beneden veel invloed) en de dikte van het isolatiemateriaal variërend tussen iets minder dan 1 cm tot bijna 3 cm (enige invloed). Bij metingen met de guarded hot plate methode is de isolatiewaarde veel lager: tussen 0,2 en 0,6 m^2K/W. Het verschil kan worden toegeschreven aan het feit dat alleen de folie is beproefd, waarbij stralingsoverdracht aan de oppervlakken niet wordt meegenomen. Bij metingen in speciaal gebouwde testhuisjes of testdaken komt de praktijksituatie het best tot zijn recht, echter dan bepalen de omstandigheden tijdens de testfase de uitkomsten, zoals temperatuurverschillen, bewolking, wind en neerslag. Bovendien blijkt dat ook onverwachte verschillen invloed kunnen hebben, zoals luchtdichtheid.

In documentatie over de werking van reflecterende isolatiematerialen wordt vaak gebruik gemaakt van thermografie. Door een hoge resolutie bij de temperatuurverdeling te kiezen worden geringe temperatuurverschillen duidelijk zichtbaar. Dit illustreert de werking, maar zegt op zich weinig over de effectiviteit van de isolatie.

De waarde in praktijktests wordt gebaseerd op de veronderstelde isolatiewaarden van 200 mm dikke minerale wol. Deze waarde wordt in de literatuur nergens betwist, maar dat lijkt niet terecht: er zijn luchtdichtheidsverschillen tussen de testhuisjes en de verwerking van het materiaal geeft verschillende invloed van koudebruggen.

Luchtdichtheidsverschillen

Het onderzoeksrapport van het Fraunhofer IBP (Lindauer en Sinnesbichler, 2007) toont in het ene testhuisje, geïsoleerd met 200 mm minerale wol in het dak nagenoeg een even groot warmteverlies als het andere testhuisje, geïsoleerd met ongeveer 20 mm reflecterende folie-isolatie. Vandaar dat aanvankelijk wordt geconcludeerd dat de folie-isolatie even goed presteert als 200 mm minerale wol. Echter, uit een blower door test in beide testhuisjes blijkt bij een drukverschil van 50 Pa dat de luchtdichtheid van het huisje met 200 mm minerale wol isolatie gelijk is aan n_{50} = 1.3 h^{-1} terwijl in het huisje met reflecterende folie-isolatie de luchtdichtheid gelijk is aan n_{50} = 0.9 h^{-1}. Ofwel de infiltratieverliezen in het huisje met minerale wol zijn ongeveer 45% hoger. Het is niet terecht om het effect van de hogere luchtdichtheid toe te schrijven aan de warmteweerstand van de reflecterende folie-isolatie. Uit metingen met een warmtestroommeter in het dak volgt een isolatiewaarde van ongeveer 3.33 m^2K/W voor het reflecterende folie-isolatiemateriaal, ongeveer 1/3 minder dan de waarde van 200 mm minerale wol. Uit een herhalingsonderzoek van het Fraunhofer IBP uit 2007-2008, waarin de luchtdichtheid van beide testhuisjes gelijk en tevens minimaal is, volgt een isolatiewaarde van 2.0 m^2K/W voor de reflecterende folie-isolatie met een dikte van 20 tot 22 mm (Hauser et al., 2011). Ook het onderzoek van het CSTB (CSTB, 2007) laat zien dat, bij gelijke lage luchtdichtheid van beide testhuisjes de 20 tot 25 mm dikke reflecterende folie- de helft isoleert van

het met 200 mm minerale wol geïsoleerde huisje. Een hogere luchtdichtheid mag niet toegeschreven worden aan de intrinsieke materiaal- of constructie-eigenschap om warmte te isoleren.

Geventileerde of niet geventileerde spouw

Een andere factor bij de test huismetingen was de wel of niet geventileerde spouw langs het reflecterende isolatiemateriaal. NPL toonde aan dat het openen van de spouw aan de koude zijde van een dakconstructie de warmteweerstand met 9% verlaagde. De verklaring hiervoor is dat indien de spouw sterk wordt geventileerd met buitenlucht de temperaturen van de oppervlaktes die grenzen aan de spouw bijna de temperatuur van de erlangs stromende lucht aannemen[1]. Daarmee wordt de isolerende werking van de spouw verminderd.

Koudebruggen

In het rapport van het Fraunhofer IBP wordt nog een derde factor genoemd die een rol kan spelen bij verschillen tussen de hot box metingen en de metingen met de testhuisjes: koudebruggen. De minerale wol platen zijn tussen de dakbalken bevestigd, de folie gaat onder de dakbalken door. Dit levert een relatief voordeel voor de reflecterende folie-isolatie ten opzichte van de minerale wol.

5. Principes van warmtetransport door een spouw en langs een materiaal

Temperatuurverschil veroorzaakt een warmtestroom van warm naar koud. Dit transport kan op drie manieren plaatsvinden: via convectie (stroming), conductie (geleiding) en radiatie (straling).

Convectie

Convectie vindt plaats in met gas (of vloeistof) gevulde ruimten en ontstaat door een drukverschil als gevolg van bijvoorbeeld een temperatuurverschil. Het gas of de vloeistof gaat stromen van de plek met hoge druk naar de plek met lage druk. In deze stroming wordt warmte door de moleculen meegenomen.

Aan het oppervlak van een materiaal treedt door luchtstroming overdracht van warmte op tussen de lucht en het materiaal. Hierbij moet rekening worden gehouden met een overgangsweerstand, die over enkele millimeters invloed heeft op de stromingssnelheid, die op het materiaal per definitie nul is. Die dikte is overigens erg afhankelijk van de luchtstroming langs dat oppervlak: bij wind is die laag erg dun, bij geringe beweging veel dikker. Dat betekent dat in een niet of zwak geventileerde luchtspouw van enkele millimeters en tot 8 - 15 mm er weinig warmteoverdracht door convectie optreedt. In luchtspouwen breder dan 15 mm of bij grote temperatuur- of drukverschillen en ook in geventileerde luchtspouwen speelt de warmteoverdracht door luchtstroming wel een belangrijke rol.

Van belang is de plaats van de warme ten opzichte van de koudere laag. Bij een luchtlaag onder een vloer in de kruipruimte mogen we uitgaan van een hogere temperatuur bovenin dan onderin deze laag. De warme luchtlaag hangt bovenin en er is geen verdringing. Het gevolg van dit natuurkundige principe is dat een spouw onder een vloer een hogere warmteweerstand heeft dan dezelfde spouw onder een dak, vanwege de richting van de warmtestroom (in de winter).

Geleiding

[1] Een kleine overgangsweerstand zorgt voor een klein temperatuurverschil.

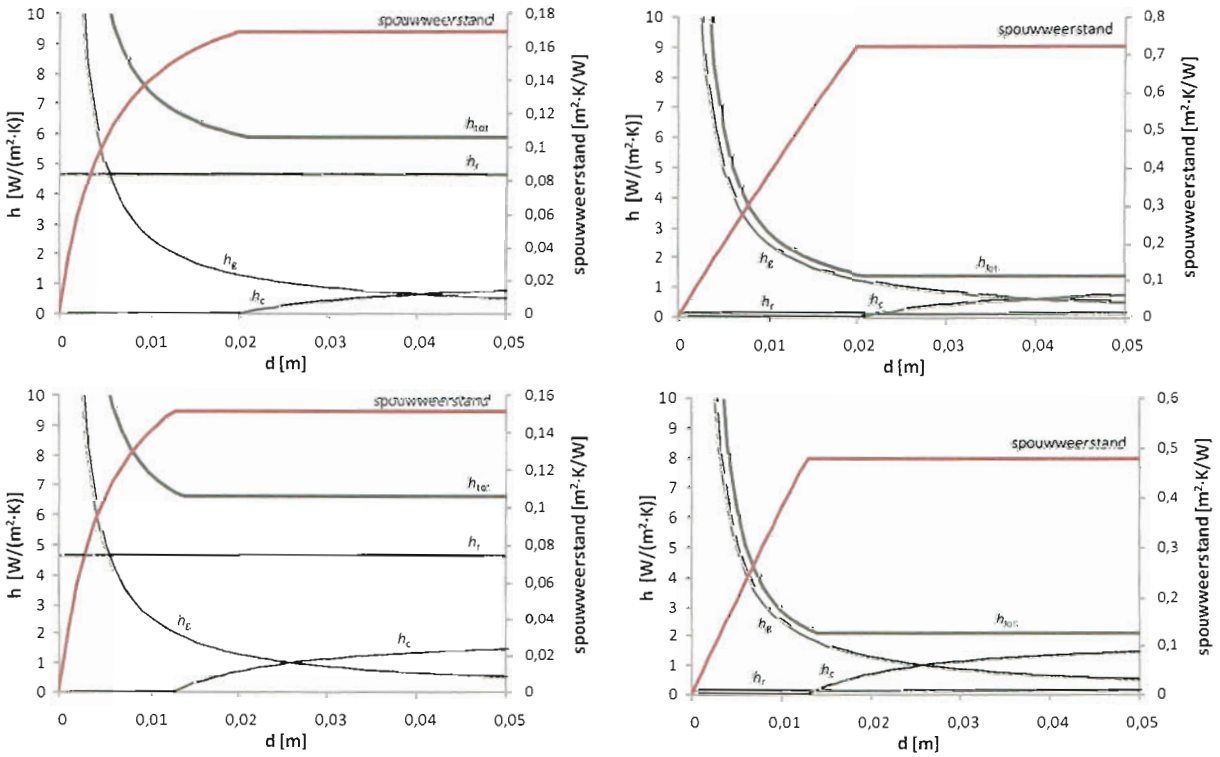
Geleiding kan enerzijds ontstaan door botsing van moleculen en daarbij overdracht van bewegingsenergie op elkaar (phononentransport), en anderzijds door het transport van vrije elektronen die als het ware de warmte met zich mee voeren (elektronentransport). De mate van geleiding is afhankelijk van de moleculaire opbouw, dus van de materiaaleigenschappen. Het transport van warmte via electronen gaat bijvoorbeeld veel sneller dan via phononen; om die reden geleiden metalen veel beter dan kunststoffen.

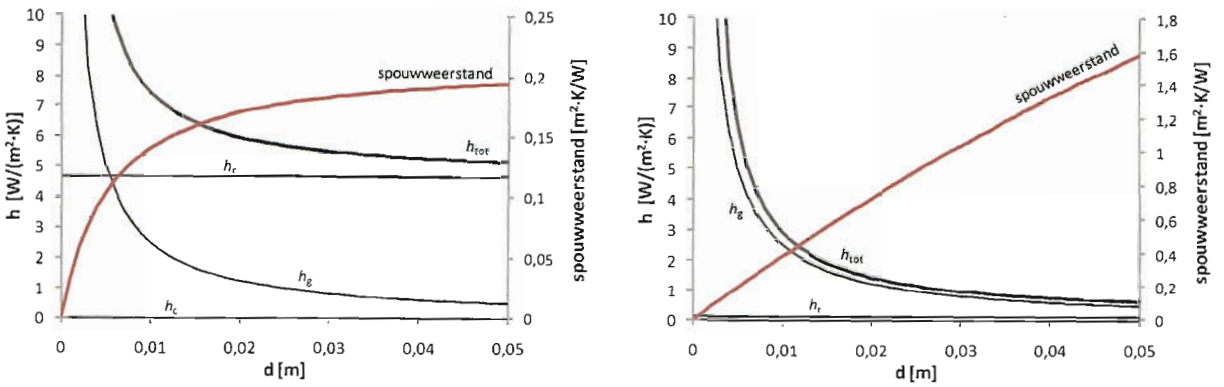
Aan het oppervlak van een materiaal en in een luchtspouw vindt ook warmtetransport door geleiding plaats. Daarbij geldt dat in dunne niet of zwak geventileerde spouwen over het algemeen de geleiding het dominante warmtetransportmechanisme is terwijl bij dikkere spouwen convectie de overhand heeft.

Straling

Ieder lichaam straalt energie uit met een intensiteit die evenredig is met de temperatuur tot de vierde macht. Omdat aangestraalde lichamen terugkaatsen en zelf ook stralen bij de gegeven temperatuur, is er sprake van stralingsuitwisseling tussen twee vlakken: warmteverlies of winst vanwege stralingstemperatuurverschillen.

De hoeveelheid (warmte)straling die door een object wordt uitgezonden wordt mede bepaald door de emissiecoëfficiënt van het vlak. Volgens de stralingswet van Kirchhoff is deze emissiecoëfficiënt gelijk aan de absorptiecoëfficiënt voor straling van dat vlak. Voor de meeste bouwmaterialen is deze coëfficiënt tamelijk hoog: in de orde van 95%. Daarnaast bestaan er spectraal selectieve lagen, waarvan het stralingsgetal afhangt van de golflengte. Dit principe wordt voor thermische zonnecollectoren toegepast: een hoge absorptie (specifiek geoptimaliseerd voor het golflengtespectrum van zonlicht) wordt gecombineerd met een lage emissie (voor warmtestraling, dus met een langere golflengte). Reflecterende lagen, zoals gepolijste glimmende metalen, spiegels, chroomlagen en aluminiumfolie hebben een lage emissiecoëfficiënt , tot 0.05 ofwel 5%. De belangrijkste toepassing in bouwmaterialen is de op glas of folie opgedampte reflectielaag, vaak erg dun, flexibel, goedkoop en met een lage emissiefactor.





Figuur 2: Overdrachtscoëfficiënten voor convectie (h_c), geleiding (h_g), straling (h_r) en totaal (h_{tot}) en weerstand van een luchtspouw als functie van de spouwdikte (d). boven: verticale spouw (bijv. in gevel); midden: horizontale spouw met warmtestroom omhoog (bijv. typisch in een dak (winter)); onder: horizontale spouw met warmtestroom omlaag (bijv. typisch in een vloer). Berekening overeenkomstig NEN-EN-ISO6946:2008. ***De emissiecoëfficiënt van beide oppervlaktes in de spouw bedraagt 0.95*** *en de temperatuur aan weerszijden van de spouw 10°C.*

Figuur 3: Overdrachtscoëfficiënten voor convectie (h_c), geleiding (h_g), straling (h_r) en totaal (h_{tot}) en weerstand van een luchtspouw als functie van de spouwdikte (d). boven: verticale spouw (bijv. in gevel); midden: horizontale spouw met warmtestroom omhoog (bijv. typisch in een dak (winter)); onder: horizontale spouw met warmtestroom omlaag (bijv. typisch in een vloer). Berekening overeenkomstig NEN-EN-ISO6946:2008. ***De emissiecoëfficiënt van beide oppervlaktes in de spouw bedraagt 0.05*** *en de temperatuur aan weerszijden van de spouw 10°C.*

Door stof, door corrosie of verval van de dragende folie kan de kwaliteit van de reflectielaag achteruit gaan. Een folie met opgedampte metaallaag kan in een laboratorium een emissiecoëfficiënt van 0.05 hebben; in de praktijk waar altijd sprake is van vervuiling kan deze waarde veel hoger liggen, zodat we bij praktijktoepassingen eerder van 0.1 tot 0.2 moeten uitgaan. Technisch verval en vervuiling kunnen een dramatisch gevolg hebben voor materialen die hun isolatiewaarde voor een belangrijk deel ontlenen aan deze stralingsstop.

Totale warmteoverdrachtscoëfficiënt

De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt in een spouw in nu gelijk aan de som van de overdrachtscoëfficiënten voor convectie, geleiding en straling. Figuur 2 geeft overeenkomstig NEN-EN-ISO6946:2008 deze coëfficiënten voor een verticale spouwconstructie, een horizontale spouw met warmtestroom omhoog en een horizontale spouw met warmtestroom omlaag bij een emissiecoëfficiënt van beide spouwoppervlakten van 0.95. Figuur 3 laat hetzelfde zien maar nu bij een emissiecoëfficiënt van beide spouwoppervlakten van 0.05. Zoals uit deze figuren valt af te leiden is de warmteoverdracht via straling bij alle oriëntaties en bij alle diktes gelijk; zij verschilt uiteraard wel bij verschillen in de emissiecoëfficiënten. Ook de warmteoverdracht via geleiding is bij alle oriëntaties en bij alle emissiecoëfficiënten gelijk; deze hangt echter wel af van de dikte van de spouw. De warmteoverdracht via convectie is verschillend zowel per spouworiëntatie als per dikte maar verschilt op het eerste gezicht niet bij verschillende emissiecoëfficiënt. Bovendien kan hieruit

afgeleid worden dat in niet of zwak geventileerde verticale luchtspouwen (in een gevel bijvoorbeeld) convectie pas vanaf een dikte van 15-20 mm een rol begint te spelen. De praktijk is complexer: als een spouw afgewerkt is met een reflectiefolie, dan zal de uitstraling naar bijvoorbeeld de bodem of een buitenspouwblad minder groot zijn, waardoor deze kouder is dan zonder reflectielaag. Een groter temperatuurverschil veroorzaakt meer convectie. Ook kan door het toepassen van meerdere lagen met folies de spouw worden opgedeeld in smallere spouwen, waarin de convectie vermindert. Met andere woorden: een deel van de thermische isolatie door minder stralingsverlies kan verloren gaan aan verhoging van het convectieverlies. Opdeling in smalle spouwen is een kleine verbetering.

Luchtlekkage

Poreuze of "losse" isolatiematerialen kunnen lucht doorlaten. Dit maakt voor de via officiële bepalingsmethoden gemeten warmte-isolerende eigenschappen van het materiaal geen verschil, maar in de praktijk kan er wel degelijk een verschil ontstaan tussen materialen die tegelijk de kierdichtheid van het gebouw verhogen en materialen die dat niet doen. Praktijkmetingen geven daarom vaak geen betrouwbare indicatie van materiaaleigenschappen.

6. Rekenvoorbeeld reflecterende folie-isolatie in een gevel

Aannames

In dit rekenvoorbeeld wordt gekeken naar een isolatiemateriaal dat opgebouwd is uit vier reflecterende folies met daartussen een 'vulmateriaal' van 8 mm. De totale dikte van het pakket wordt daarmee 24 mm. Allereerst wordt als vereenvoudiging hier aangenomen dat de lagen tussen de folies als een luchtlaag kunnen worden beschouwd. Dit is een te gunstige voorstelling van zaken omdat er in de spouw ook materiaal aanwezig is met een iets hogere warmtegeleidingscoëfficiënt (λ>0,025 W/(m·K)) dat bovendien een deel van het stralend oppervlak raakt en op die plaatsen is er geen sprake van een stralingsstop. Ook uit het onderzoek van het WTCB (Flamand et al., 2006) blijkt dat het materiaal tussen de folies zich hetzelfde gedraagt als isolatiemateriaal. De genoemde aanname is daarmee iets te gunstig.

In de berekening wordt het isolatiemateriaal toegepast in een verticale niet geventileerde spouw en met aan weerszijden een luchtspouw van 30 mm. De richting van de warmtestroom is horizontaal. De gevelconstructie is opgebouwd zoals in Figuur 4 aangegeven: van binnen naar buiten: 200 mm steens muur, 30 mm luchtspouw, 24 mm meerlaagse reflecterende folie-isolatie, 30 mm luchtspouw, 20 mm houten gevelbekleding. In de berekening wordt ervan uitgegaan dat de folies een emissiecoëfficiënt hebben 0.06 (prNEN-EN 16012:2010; met toeslag) terwijl de overige bouwmaterialen een emissiecoëfficiënt hebben van 0.95.

Rekenvoorbeelden

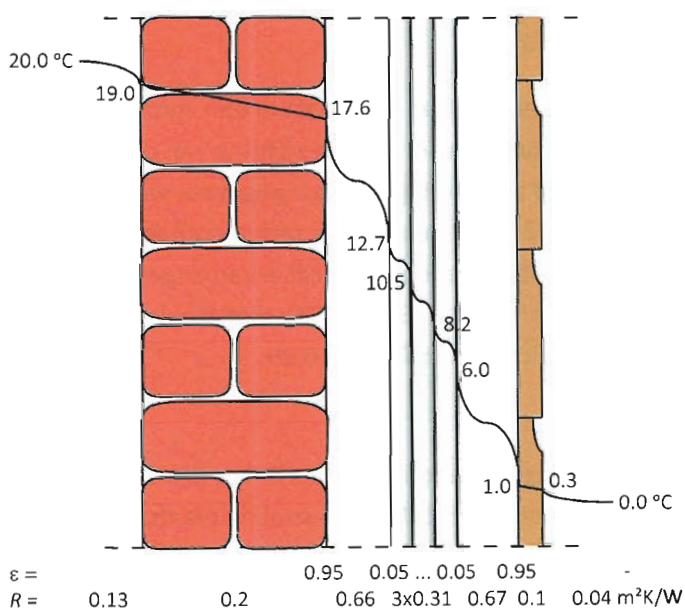
Omdat de spouw tussen de reflecterende folies slechts 8 mm dik is, vindt hier voornamelijk warmteoverdracht via geleiding door de lucht en via straling plaats. De overdracht voor geleiding in de spouw en niet rekening houdend met materiaal tussen de folies is h_g = 0.008/0.025 = 0,32(m^{2}K)/W. Om de warmteoverdracht voor straling te kunnen bepalen moet eerst de resulterende emissiecoëfficiënt worden bepaald. Deze is gelijk aan 0.03. Tevens moet de De Rosseland gemiddelde absolute temperatuur berekend worden. Deze is echter verschillend voor iedere spouw en hangt af van de warmteweerstand van de folie-isolatie en van de overige constructieonderdelen. Uit een

iteratieve berekening kan deze worden afgeleid. Met behulp van vergelijking (2) is bepaald dat de overdracht voor straling in alle drie de spouwen ongeveer gelijk is aan 0.16 W/(m^2·K). Hieruit kan vervolgens de weerstand van de spouw tussen de folies worden berekend als R_{spouw} =0,16 + 0,32 = 0,48 m^{2}K/W. Op identieke wijze kan voor de spouwen aan weerszijden van het folie-isolatiemateriaal berekend worden dat deze aan de warme zijde gelijk is aan 0.64 m^2·K /W en aan de koude zijde aan 0.65 m^2·K /W.

Voor deze situatie geldt dan dus dat het isolatiemateriaal met vier reflecterende folies en drie spouwen hiertussen met een totale dikte van 24 mm een isolatiewaarde van ongeveer 3*0.30 = 0.90 m^2·K/W heeft. Indien bovenop de genoemde waarde ook de weerstanden van de spouwen aan weerszijden van het isolatiemateriaal worden geteld, dan wordt de totale warmteweerstand gelijk aan 3*0.30 + 0.64 + 0.65 = 2.19 m^2·K/W.

Op dezelfde wijze kan ook berekend worden dat, indien alle emissiecoëfficiënten van de folies gelijk worden gesteld aan 0.95, de warmteweerstand van de folie-isolatie exclusief aangrenzende luchtspouwen gelijk wordt aan 3*0.13 = 0.39 m^2·K/W. Hieruit valt op te maken dat de stralingsstop dus inderdaad effect sorteert. Indien nu alle emissiecoëfficiënten van de folies gelijk worden gesteld aan 0, volgt voor de warmteweerstand van de folie-isolatie inclusief aangrenzende luchtspouwen 3*0.32 = 0.96 m^2·K/W. Hieruit volgt vervolgens dat zelfs indien het effect van straling volledig vervalt de prestatie nauwelijks beter is dan de basissituatie.

Ook voor een constructie met 6 reflecterende folies, 5 tussenspouwen en een totale dikte van 40 mm kan deze berekening worden herhaald. De resultaten staan in tabel 5. Een zelfde exercitie is ook uitgevoerd voor een laag van reflecterende isolatie van 24 mm met aan weerszijden een spouw van 30 mm en een emissiecoëfficiënt van 0.06 maar dan voor toepassing in een dak (warmtestroom verticaal omhoog) en in een vloerconstructie (warmtestroom verticaal omlaag). De resultaten staan in tabel 6.



Figuur 4: Berekening temperatuursprofiel en warmteweerstanden van een gevel geïsoleerd met dunne reflecterende isolatie van 24 mm (4 reflectiefolies en 3 tussenspouwen van elk 8 mm lucht; ε_{folie} = 0.05).

	Warmteweerstand [$m^2 \cdot K/W$]			
	24 mm dik – 4 reflectiefolies en 3 tussenspouwen van 8 mm		40 mm dik – 6 reflectiefolies en 5 tussenspouwen van 8 mm	
	Uitsluitend isolatiemateriaal	Isolatiemateriaal + 2 x 30 mm spouw	Uitsluitend isolatiemateriaal	Isolatiemateriaal + 2 x 30 mm spouw
ε_{folie} = 0.00	0.96	2.56	1.60	3.20
ε_{folie} = 0.06	0.90	2.19	1.52	2.80
ε_{folie} = 0.20	0.81	1.70	1.35	2.23
ε_{folie} = 0.95	0.39	0.73	0.65	0.99

Tabel 5: Berekening van de warmteweerstand van folie-isolatiemateriaal overeenkomstig het voorbeeld in figuur 4 voor verschillende emissiecoëfficiënten van het reflectiefolie en bij horizontale warmtestroom.

		Warmteweerstand [$m^2 \cdot K/W$]	
		24 mm dik – 4 reflectiefolies en 3 tussenspouwen van 8 mm	
		Uitsluitend isolatiemateriaal	Isolatiemateriaal + 2 x 30 mm spouw
ε_{folie} = 0.06	Warmtestroom (gevel) →	0.90	2.19
ε_{folie} = 0.06	warmtestroom ↑ (dak)	0.90	1.79
ε_{folie} = 0.06	warmtestroom ↓ (vloer)	0.90	2.66

Tabel 6: Berekening van de warmteweerstand van folie-isolatiemateriaal overeenkomstig de specificaties in figuur 3 voor verschillende oriëntatie van het reflectiefolie.

Overige praktijkervaringen

In de VS is reflectiemateriaal op daken getest. Dit werkte effectief tegen het verminderen van de zonbelasting en daarmee van de koellast in de zomer, echter er was nauwelijks invloed op het energiegebruik voor verwarming. Tevens was er geen effect op omstandigheden waarin piekwarmte optrad. Bij andere praktijktoepassingen is aangehaald dat de folies niet bijdragen aan de thermische massa, die bijdragen aan het dempen van temperatuurverschillen.

Bij toepassingen waar grote spouwen beschikbaar zijn wordt de reflectielaag vaak gecombineerd met minerale wol of kunststof isolatieplaten en situeert men de spouw met reflectielaag aan de buitenzijde. Daarbij sluit de folie het damptransport naar buiten af en dient men de isolatielaag volledig luchtdicht te verpakken.

7. Conclusies

Standaard isolatiematerialen worden in een laboratorium getest via de (guarded) hot plate methode of de (guarded of callibrated) hotbox methode. Met de eerste methode kan alleen het warmtetransport in een materiaal worden gekarakteriseerd; met de tweede methode kan ook de warmteoverdracht van het materiaaloppervlak aan lucht worden meegenomen en kunnen volledige bouwconstructies worden getest. Omdat de condities bij beide methoden gecontroleerd en beheerst kunnen worden, geven deze de meest betrouwbare meetresultaten. Andere meetmethodes, zoals de 'huisjesmethode' kennen te veel meetonzekerheden en zijn erg gevoelig voor de kwaliteit waarmee de huisjes zijn gebouw. Deze laatste methoden zijn daarom minder geschikt om betrouwbare uitspraken over de isolatiewaarde van een materiaal te kunnen doen. Dit geldt voor conventionele isolatiematerialen alsook voor isolatiematerialen gebaseerd op reflecterende folies.

Zeer hoge warmteweerstanden als intrinsieke eigenschap van 20 tot 30 mm dikke reflecterende folie-isolatiematerialen, in de orde van 5 tot 6 m^2K/W, kunnen op grond van deze studie niet worden bevestigd. Warmteweerstanden van zo'n 1.5 tot 2.5 m^2K/W zijn met behulp van dit type isolatiemateriaal en bij deze dikte wel haalbaar. Daarbij geldt dat de hoogste waardes gelden voor toepassing in vloeren en de laagste waardes bij toepassing in daken. Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat in deze waarde dan ook de weerstanden van de aangrenzende spouwen meegenomen zijn en dat de emissiecoëfficiënt van de folies in de orde van 0.05 tot maximaal 0.2 dient te liggen. Hierbij is het nog de vraag in hoeverre de genoemde lage emissiecoëfficiënten van de folies over langere tijd haalbaar zijn. De verwachting is dat de warmteweerstand na verloop van vele jaren zal dalen. Hier zal nog meer onderzoek naar gedaan moeten worden.

Uit onder andere het rapport van het WTCB (Flamand et al., 2006) maar ook uit het rekenvoorbeeld uit dit artikel kan worden geconcludeerd dat de isolerende werking van dunne reflecterende isolatiematerialen voor een groot deel bepaald wordt door de isolerende werking van de twee spouwen aan weerszijden van het isolatiemateriaal, door de dikte van het isolatiepakket zelf en dat er enige bijdrage is van de zogenaamde stralingsstop. Metingen in de praktijk hebben aangetoond hoe belangrijk het gedrag van de spouwen is. Indien de spouwen geventileerd worden neemt de isolerende werking van deze spouwen sterk af. Daarnaast, indien lucht vanuit de buitenste spouw in de binnenspouw komt, en dan het temperatuurverschil over het isolatiemateriaal verkleint, wordt de bijdrage van de reflectiestop sterk verminderd.

Voor de verklaringsmodellen zijn de verschillende metingen en proefopstellingen zinvol geweest. Het heeft geleerd dat de invloed van de straling in een spouw waarin geleiding en convectie een dominante rol spelen niet veel bijdraagt aan het totale warmtetransport en dat het effect van een stralingsstop beperkt is. In een vacuümsituatie is de bijdrage van straling wel bepalend. Daar zou een stralingsstop dus een sterker effect kunnen vertonen.

Het is van belang dat bij de door producenten vermelde isolatiewaardes wordt vermeld hoe dik de spouw aan weerszijden van het isolatiemateriaal moet zijn en voor welke toepassing deze waarde geldt. De warmteweerstand van de spouwen aan weerszijden van het isolatiemateriaal wordt immers bepaald door de richting waarin de warmtestroom plaatsvindt. Een alternatieve manier van presenteren van de gegevens zou kunnen zijn de warmteweerstand van het isolatiepakket zonder spouwen en een opgave van de emissiecoëfficiënten van de buitenste reflectielagen.

Als eindconclusie moet gesteld worden dat de toepassing alleen onder vloeren geschikt lijkt. In constructies waar ruimte moet worden gespaard levert een volledige vulling met isolatiemateriaal meer isolatiewaarde bij een gegeven dikte op. Thermische massa, akoestische demping van isolatiematerialen alsook brandwerendheid spelen in veel constructies eveneens een belangrijke rol.

Dit leidt ertoe dat bij afweging van materiaaltoepassingen de optimale keuze eerder voor traditionele toepassingen zal zijn, ook bij renovatie van bijvoorbeeld daken, waar de isolatiefolies een zekere populariteit genieten.

Literatuur

Anderson, B. (2006), Conventions for U value calculations, BR 443, BRE Scotland, Glasgow, <http://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/rpts/BR_443_(2006_Edition).pdf>

BBA (2006,2007), Multifoil Insulation – Product Sheet 1 – Thinsulex Silver, agrément certificate No 06/4379, Britsch Board of Agrément, Garston.

BBA (2010), Reflective foil insulation – Conventions for U value calculations, BBA Information Bulletin 3, Britsch Board of Agrément, Garston, <http://www.bbacerts.co.uk/PDF/BBA%20Information%20Bulletin%20No%203.indd.pdf>.

BM TRADA (2009), Q-mark Building Insulation Products, registratie certificaat, nummer BIPS-0102.

Brodt, K.H. (1995), *Thermal Insulations: CfcAlternatives and Vacuum Insulation*, proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft, 173 pagina's.

Celotex (2004), Multi-foiled – Multi-Foil Performance Claims Disputed after Independent Tests by The NPL, Technical Bulletin 001/04, Celotex Ltd, Ipswich, < http://just-insulation.com/pdfs/Celotex/Celotex_Multi-foil_Bulletin.pdf>

CSTB (2007), Comparative measurements of energy consumption of two cells put in external environment, rapport CSTB, CSTB, Marne-la-Vallee.

Flamand, G., P. Wouters, D. Lheureux, J.-M. Seynhaeve en Ph. Ngendakumana (2006), Initiële thermische prestaties van dunne reflecterende producten, WTCB rapport nr. 9 -2006, WTCB, Brussel.

Frawley, E. (2009), *Thermal testing of innovative building insulations*, MSc these, Dublin Institute of Technology, Dublin, 166 pagina's, < http://arrow.dit.ie/engmas/33>.

Hauser, G., M. Kersken, A. Schade en H. Sinnesbichler (2011),"Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien", *Bauphysik* 33 (11): 33-42.

Hendriks, N. (2011), "Enige bouwfysische aspecten van reflecterende isolatie – deel 1: het werkingsprincipe, *Dakenraad* 100: 39-41.

Hendriks, N. (2011), "Enige bouwfysische aspecten van reflecterende isolatie – deel 3: Soorten reflecterende isolatie, *Dakenraad* 102: 21-23.

Hottel, H.C. en A.F. Sarofilm (1967), *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York, 520 pagina's.

ISO8302:1991, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

König, N. (2007), Thermal insulation with IR-reflective multifoil products – on overview, presentatie, *Normapme congres*, 16 april 2007, Stuttgart.

Lindauer, E. en H. Sinnesbichler (2007), Field Tests regarding the Thermal and Energy Performance of an ACTIS Roof Insulation System compared to Conventional Mineral-fibre Insulation Materials, kort tussentijds rapport deel D, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen.

Maat, J.J.A. (2010), Bepalen van de isolatiewaarde van Isobooster materiaal, rapport 8969R-10.E09.25177, TNO Quality Services BV, Eindhoven.

NEN-EN-ISO6946:2008, Componenten en elementen van gebouwen - Warmteweerstand en warmtedoorgangscoëfficient – Berekeningsmethode, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

NEN-EN-ISO8990:2007, Thermische isolatie - Bepaling van de stationaire warmtegeleidingseigenschappen - Methode met de gekalibreerde en afgeschermde warmtekast, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

Oussoren, G. (2007), Thermoreflecterende spouwmuurisolatie en schuimbeton – verantwoord, *Eigen Huis Magazine* 2007 (februari): 28-29.

prNEN-EN16012:2010, Thermische isolatie voor gebouwen – Reflecterende isolatieproducten – Bepaling van de gedeclareerde thermische eigenschappen, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.

Rooney, G. (2006a), Thermal Insulation Performance Appraisal 139b & 141b Victoria Road Torry Aberdeen, rapport nummer 25035, Alba Building Sciences Ltd, Norham, <http://www.actis-isolation.com/pdf/albareport-firststudy.pdf>.

Rooney, G. (2006b), Thermal Insulation Performance Appraisal 139b Victoria Road Torry Aberdeen, rapport nummer 25038, Alba Building Sciences Ltd, Norham, < http://www.actis-isolation.com/pdf/albareport-secondstudy.pdf>.

Ward, T.I. en S.M. Doran (2005), The thermal performance of multi-foil insulation, rapport BRE, BRE Scotland, Glasgow, <http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/multi-foil-insulation_july2005.pdf>

Williams, R. en G. Ballard (2007), Evaluation of the thermal performance of insulation systems used in roof structures, NPL rapport MAT 8, NPL, Teddington.

http://www.insulation-actis.com/

http://www.greenbuildingforum.co.uk/forum/index2.php?DATEIN=tpc_wlpssdlpg_1142805843&showpage=124