Thermografie als graadmeter van de gebouwschil

Praktische gids voor de thermograaf



Katrien Maroy Kim Carbonez Marijke Steeman Sven Van De Vijver Nathan Van Den Bossche



Maak koudebruggen zichtbaar en voorkom energieverliezen!

Met een thermische camera identificeer je warmteverliezen met nog meer precisie!

testo NV • Industrielaan 19 • 1740 Ternat • Tel. 02/582 03 61 • info@testo.be

Thermografie als graadmeter van de gebouwschil

Praktische gids voor de thermograaf

1^{ste} uitgave

Katrien Maroy Kim Carbonez Marijke Steeman Sven Van De Vijver Nathan Van Den Bossche







Ing. Katrien Maroy Prof.dr.ir.arch. Marijke Steeman Dr.ir.arch. Nathan Van Den Bossche Universiteit Gent Vakgroep Architectuur en Stedenbouw Onderzoeksgroep bouwfysica, constructie en klimaatbeheersing Sint-Pietersnieuwstraat 41 9000 Gent België

Cover en achterflap: Infraroodfoto en bijbehorende analoog beeld van een massieve gevel in Gent (Kim Carbonez)

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of vermenigvuldigd door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteurs.

Dit boekje is een gids voor iedereen die op een betrouwbare wijze thermografie in gebouwen wil toepassen en de resultaten wil interpreteren. Dit handboek kwam tot stand in het kader van het TETRA 130210 - onderzoeksproject "Thermografie als graadmeter van de gebouwschil: richtlijnen voor een kwalitatieve en kwantitatieve analyse" (1/1/2014-30/9/2015). In dit boek worden de belangrijkste resultaten uit het onderzoeksproject toegelicht.

Het project werd mogelijk door de steun van volgende bedrijven en organisaties: De Woonstudie, Sanidetectif, E-consulting, Infrared Services, Think Energy, @home energiezuinig bouwen, adviesbureau Dirk De Groof, Egeon, Bureau Bouwtechniek, Studiebureau Boydens, TESTO, Buro II & Archi+i, Wienerberger, Isover, Recticel, Thermo-Illbruck, Deceuninck, VMSW, Aluminium Center, FAC, Bond van Vlaamse Architecten. NAV, Confederatie Bouw, Bouwunie, Passiefhuisplatform, CIR Isolatieraad, BCCA, TCHN, Reynaers, FLIR, Van Beveren Aluminium nv. De onderzoekers zijn hen hiervoor zeer erkentelijk.

Daarnaast willen de auteurs ook de thesisstudenten Bieke Dewulf, Cleo Goetelen, Joke Haustraete, Steffen Van De Mergel en Sarah Beulque bedanken voor hun bijdrage in dit onderzoeksproject.

Ook aan de collega's van de onderzoekgroep bouwfysica, constructie en klimaatbeheersing een woord van dank voor alle inhoudelijke ondersteuning en het naleeswerk.

Dit handboek wordt gratis ter beschikking gesteld voor alle geïnteresseerden. De inhoud mag gebruikt worden mits bronvermelding.

Inhoud

Hoofdstuk 1: Introductie

1	Con	text	2			
2	Toepassingsgebied van dit boek					
3	Basi	sbegrippen thermografie	4			
	3.1	Wat is infraroodstraling?	4			
	3.2	Infraroodstraling en temperatuur van een voorwerp) 5			
	3.3	Hoofdwet thermografie	7			
Ноо	ofdstuk	2: Richtlijnen voor betrouwbare metingen				
1	Refl	ectie en emissiviteit van het oppervlak	10			
	1.1	Impact op de thermografische meting	10			
	1.2	In situ bepaling reflectie	15			
	1.3	In situ bepaling emissiviteit	17			
2	Omg	gevingsfactoren	20			
	2.1	Voor het inschatten van thermische prestaties	22			
	2.2	Voor de optimale zichtbaarheid van gebreken	43			
3	Invl	oedsfactoren bij een IR-camera	52			
	3.1	Over lenzen en resolutie	53			
	3.2	Richtlijnen i.v.m. camera, lensgebruik en resolutie	56			
	3.3	Kalibratie van de meting	57			
4	Met	en: Welke stappen moeten overlopen worden?	61			
5	Verv	werking: Wat moet er in een verslag?	62			
Ноо	ofdstuk	3: Isolatiegebreken				
1	Wer	kwijze	71			
2	Aan	dachtspunten	72			
	2.1	Locatie t.o.v. luchtspouw	73			

	2.2	Geometrische bouwknopen	80
	2.3	Meetafstand en –richting	81
	2.4	Impact van stralingsbronnen: zon en verwarming	82
	2.5	Oppervlakte-eigenschappen - Case VIP	85
	2.6	Besluit	93
3	Mog	gelijke analysemethodes	93
	3.1	Gebruik van de temperatuurschaal	93
	3.2	Temperatuurprofielen	95
4	Besl	uit	95
Нос	ofdstuk	4: Beoordeling thermische prestaties	
1	Inle	iding	98
	1.1	De U- en R-waarde berekening	98
	1.2	De overgangscoëfficiënten hi en he	99
	1.3	Nauwkeurigheid U-waarde met thermografie	101
2	The	rmische prestaties van wanden: Twee cases	102
	2.1	Case 1: De massieve wand	103
	2.2	Case 2: De houtskeletwand	105
	2.3	Besluit	107
3	The	rmische prestaties van glas	108
	3.1	Glas en infraroodstraling	109
	3.2	De thermografische meting op glas	111
	3.3	Foutbronnen bij de U-waarde	114
	3.4	Welke glastypes zijn te onderscheiden?	119
Нос	ofdstuk	5: Thermografie en luchtdichtheid	
1	Wer	·kwijze	123
2	Exte	erne invloedsfactoren	125
	2.1	Aanbevelingen volgens de normen	125

2.2	Impact van het drukverschil	126
2.3	Impact van het temperatuurverschil	128
3 Int	terne invloedsfactoren	129
3.1	Oppervlakken aan het luchtlek	129
3.2	Luchtlek aan een koudebrug	131
3.3	Breedte van een luchtlek	132
4 An	alyse van IR-beelden van luchtlekken	134
4.1	Beoordeling	134
4.2	Onderlinge vergelijking is niet mogelijk	137
5 Be	sluit	138
Hoofdstu	k 6: Actieve thermografie	
1 Wa	at is actieve thermografie?	140
2 Aa	ndachtspunten	141
2.1	De juiste timing is belangrijk	141
2.2	Niet toepasbaar bij lage emissiviteit	142
2.3	Enkel fenomenen dicht bij het oppervlak	144
3 Be	sluit	147
D (),		

Referentielijst

Bijlage 2: Algemene checklist

Trefwoordenlijst

1 Context

Europa heeft grote ambities op het vlak van energie-efficiëntie en de uitstoot van broeikasgassen. In 2011 besliste de Europese Commissie dat het energieverbruik naar beneden moest, en wel met 20% tegen 2020 in vergelijking met het niveau van 1990 (1). Om dit te bereiken zijn er grote inspanningen nodig. Voor nieuwbouw worden de eisen steeds strenger en wordt het niveau bijna-energieneutraliteit vooropgesteld tegen 2021. Een uitstekende isolatiekwaliteit en luchtdichtheid en het inzetten van hernieuwbare bronnen zijn daarbij onontbeerlijk.

Toch representeert nieuwbouw slechts een fractie van het gebouwenpark. In ons land dateert 62% van de gebouwen van voor 1970. Ingrijpende renovaties van bestaande gebouwen vormen dus de sleutel tot de energiebesparing. Ook hier legt Vlaanderen vanaf 1/1/2015 eisen op aan gebouwen waarvan de technische installaties volledig worden vervangen of waarvan scheidingsconstructies minstens worden 75% van de (na)geïsoleerd. Maar hoe kunnen de thermische prestaties van bestaande en gerenoveerde constructies snel gecontroleerd worden? De meest correcte inschatting kan gebeuren aan de hand warmteflux-sensoren, maar deze meten slechts van de warmteweerstand op één enkel punt, en metingen worden pas betrouwbaar na een meetperiode van één tot twee weken.

Thermografie biedt groot potentieel voor het vaststellen van de bestaande toestand zowel bij nieuwbouw als bij renovatie: enerzijds om gebreken op te sporen, anderzijds om de uitvoering te controleren. Uit een enquête onder de leden van de gebruikersgroep blijkt dat thermografie in de gebouwschil momenteel voornamelijk wordt gebruikt voor luchtlekdetectie, het opsporen van isolatiegebreken en andere toepassingen zoals waterlekken, renovatie-advies en comfortanalyse.

Momenteel is er geen kwaliteitskader voorhanden voor thermografen zoals dat bijvoorbeeld wel recent werd ingevoerd voor uitvoerders van luchtdichtheidstesten. In ons land is enkel de norm NBN EN 13187: 1999 "Warmteprestatie van gebouwen -Kwantitatieve opsporing van thermische onregelmatigheden in de gebouwschil - infraroodmethode" voorhanden. Deze norm geeft echter weinig praktische richtlijnen met betrekking tot het gebruik van IR-analyse. Nochtans geeft 88% van de gebruikersgroep in het Tetraproject aan dat certificering wenselijk is.

2 Toepassingsgebied van dit boek

Infraroodthermografie is een technologie die in vele vakgebieden wordt ingezet. Ook vindt thermografie steeds vaker zijn weg in de bouwsector, onder andere als controleapparaat tijdens de bouw, als inspectietool van luchtdichtheid achteraf of voor het opsporen van koudebruggen of andere isolatiegebreken. Het goede gebruik van thermografie bij bouwapplicaties hangt echter samen met een grondige kennis van de bouwconstructie, de principes van warmte-, lucht en vochttransport én een basiskennis van alle invloedfactoren die een thermografische opname kunnen beïnvloeden.

Dit boekje verschaft inzicht tot alle aspecten die bij thermografie op de gebouwschil komt kijken. Eerst wordt een algemene inleiding over infraroodstraling gegeven waarin enkele basisprincipes van de thermografie worden verduidelijkt. Dit zal de lezer de nodige achtergrond geven voor de problematieken uit de volgende hoofdstukken. In het tweede hoofdstuk worden algemene richtlijnen tot betrouwbare metingen gegeven. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen materiaalgebonden parameters, cameragebonden parameters en omgevingsfactoren. Hoe kunnen de emissiviteit en de gereflecteerde temperatuur van een oppervlak bepaald worden? Welke lenzen en IR-resolutie moet ik gebruiken? Hoe lang moet ik wachten na zonnestraling indien ik een houtskeletwand wil inspecteren? De bestaande normen worden vergeleken met de onderzoeksresultaten van dit Tetraproject.

Vervolgens worden in hoofdstuk 3 tot 6 de mogelijke toepassingen van thermografie in de bouw toegelicht en wordt dieper ingegaan op de specifieke factoren. In hoeverre zijn luchtholtes in 3 spouwmuren nu echt zichtbaar? Welk temperatuurverschil is noodzakelijk bij het detecteren van luchtlekken? Hoe gaat de inschatting van U-waarden met thermografie praktisch in zijn werk? Wat is het potentieel van actieve thermografie? Al deze aspecten worden in hoofdstuk 3 tot 6 geïllustreerd aan de hand van praktijkvoorbeelden.

Tot slot is er achteraan dit boekje nog een emissiviteitstabel en checklist te vinden om tijdens metingen mee te nemen.

3 Basisbegrippen thermografie

3.1 Wat is infraroodstraling?

Alle voorwerpen met een temperatuur hoger dan 0 K (-273,15 °C) zenden elektromagnetische straling uit. Daar zit uv-straling en zichtbaar licht bij, maar ook infrarood straling. In het elektromagnetisch spectrum ligt infraroodstraling met golflengtes van 0,75 μ m tot 1000 μ m tussen het zichtbare licht en de microgolven (Figuur 1). Infraroodstraling is niet zichtbaar voor het menselijk oog, maar is wel voelbaar met de huid onder de vorm van warmte. Thermografische camera's vangen enkel straling op met golflengtes van 0,7 μ m tot 15 μ m, wat binnen het bereik is van de nabij- en middelinfraroodstraling (2) (3).



Figuur 1 Overzicht van het elektromagnetisch spectrum (gebaseerd op (3))

Niet ieder voorwerp zendt evenveel straling uit in alle golflengtes. Zo zal bijvoorbeeld een gloeilamp een kleine mate van zichtbaar licht uitstralen en groter aandeel infraroodstraling, terwijl bij zonlicht het aandeel zichtbaar licht en uv-straling groter is. Voor een zwarte straler wordt de intensiteitsverdeling van de straling in het elektromagnetisch spectrum gegeven door de wet van Planck (2) (4) (5) (6):

$$I_{(\lambda,\theta)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{(hc/\lambda k\theta)} - 1\right)}$$

Met:

h: de constante van Planck (6,626 x 10^{-34} J.s) c: snelheid van het licht (3 x 10^8 m/s) k: de constante van Boltzmann (1,381 x 10^{-23} J/K) λ : de golflengte (in μ m) θ : de temperatuur van het zwarte lichaam (in Kelvin)

3.2 Infraroodstraling en temperatuur van een voorwerp

De mate waarin een voorwerp straling uitzendt is afhankelijk van de temperatuur van het voorwerp en de emissiviteit van het oppervlak van het voorwerp. Dit principe wordt eenvoudig uitgelegd aan de hand van een zwarte straler. Dit is een object dat alle invallende energie absorbeert, maar geen straling reflecteert of doorlaat. Bijgevolg is alle straling die een zwart lichaam uitzendt afhankelijk van zijn eigen temperatuur en niet van reflectie of transmissie van energie uit de omgeving. De totale hoeveelheid uitgestraalde energie door de zwarte straler kan beschreven worden met de wet van Stefan-Boltzmann (5) (7) (8) (9) (10) waarin de temperatuur van het zwarte lichaam de enige veranderlijke is:

[1]

$$W = \sigma \theta^4$$

Met:

W: hoeveelheid energie die de zwarte straler uitzendt $[W/m^2]$ σ: Stefan-Boltzmann constante (5,67.10⁻⁸ W/m²/K⁴) θ: temperatuur van het zwarte lichaam [K]

In werkelijkheid zal de straling afkomstig van voorwerpen altijd bestaan uit straling afhankelijk van de temperatuur van het voorwerp, gereflecteerde straling van de omgeving en doorgelaten straling in het geval van transparante voorwerpen. De wet van Stefan-Boltzmann moet dus aangevuld worden met:

$$W = \varepsilon \, \sigma \theta^4 \tag{3}$$

Met ε wordt de emissiviteit aangeduid van een voorwerp, ofwel de mate waarin een voorwerp in staat is om straling, afkomstig van zijn eigen temperatuur, uit te zenden. De emissiviteit heeft altijd een waarde tussen 0 en 1 en kan als volgt beschreven worden (4) (7):

$$\varepsilon = \frac{W_{obj}}{W_{bb}} [-]$$
[4]

Hierin zijn:

 $W_{\text{obj}}\!\!:$ de energie uitgezonden door het object met emissiviteit ϵ $[W/m^2]$

 W_{bb} : de energie uitgezonden door een zwart lichaam op dezelfde temperatuur [W/m^2].

Ter illustratie

De meeste bouwmaterialen hebben een emissiviteit tussen 0,90 en 1. Als bijvoorbeeld een baksteen een emissiviteit van 0,93 heeft, is 93% van de infraroodstraling uitgezonden door de baksteen afkomstig van zijn oppervlaktetemperatuur. Aangezien de baksteen geen straling doorlaat, is de overige 7% straling van de omgeving die op het oppervlak van de baksteen gereflecteerd wordt.

De straling van een voorwerp is dus deels afkomstig van zijn eigen temperatuur, deels afkomstig van de straling van de omgeving die gereflecteerd op het voorwerp en in het geval van transparante materialen, deels doorgelaten door het voorwerp. De verhouding tussen deze drie componenten wordt beschreven door:

 $\varepsilon + \rho + \tau = 1$ Met: ε : emissiviteit ρ : reflectie τ : transmissiviteit (Bij opake materialen wordt τ =0) [5]

3.3 Hoofdwet thermografie

Met behulp van een thermografische camera wordt de straling, uitgezonden door een object, opgevangen en omgezet naar een matrix van temperaturen die het IR-beeld vormen. De omzetting van de hoeveelheid opgevangen straling naar oppervlaktetemperaturen gebeurt met de hoofdwet van de thermografie (4) (8) (11) (12) (13):

$$W_{tot} = \varepsilon.\tau_{atm}.W_{obj} + (1-\varepsilon).\tau_{atm}.W_{amb} + (1-\tau_{atm}).W_{atm} \quad [W/m^2]$$
[6]

Met:

 W_{tot} : de totale stralingsenergie opgevangen door de camera ϵ : de emissiviteit van het object

 τ_{atm} : de transmissie van de atmosfeer

 $W_{\text{obj}}\!\!:$ de geëmitteer
de energie van het object, afhankelijk van de temperatuur van het object

 $W_{\text{amb}}\!\!:$ de gereflecteerde energie van de omgeving, afhankelijk van de omgevingstemperatuur

 $W_{\text{atm}}\!\!:$ de geëmitteerde energie van de atmosfeer, afhankelijk van de temperatuur van de atmosfeer.



Figuur 2 Samenstelling van de uitgezonden straling van een object (11)

De transmissie van de atmosfeer τ_{atm} is de mate waarin de atmosfeer de straling doorlaat op weg naar de camera. Deze parameter is enerzijds afhankelijk van de meetomstandigheden, zoals de afstand voorwerp-camera en de relatieve vochtigheid van de lucht. Daarnaast is τ_{atm} ook afhankelijk van de golflengte waarin de camera opereert (2). In de golflengtes 3-5 µm en 8-14 µm wordt $\tau_{atm} = 1$, niet toevallig de twee golflengtes waarin de huidige thermografische camera's opereen.

Uit de term W_{obj} wordt de oppervlaktetemperatuur van het voorwerp berekend met de wet van Stefan-Boltzmann [3]. W_{amb} is via diezelfde wet afhankelijk van de omgevingstemperatuur gereflecteerd door het voorwerp. Om de thermografische camera in staat te stellen de correcte oppervlaktetemperaturen weer te geven, moeten dus de emissiviteit (ϵ) van het voorwerp en de gereflecteerde temperatuur van de omgeving (θ_{refl}) gekend zijn. In hoofdstuk 2 wordt uitgelegd hoe deze in-situ bepaald kunnen worden.

Hoofdstuk 2: Richtlijnen voor betrouwbare metingen

Tot een thermografisch beeld komen is doorgaans niet zo moeilijk, tot een betrouwbaar beeld komen des te meer. Een thermografisch beeld wordt immers beïnvloed door verschillende factoren zoals de weersomstandigheden tijdens en voorafgaand aan de infraroodopname, de emissiviteit van het oppervlak, de opnamerichting, enzovoort.

Het is van belang om de invloed van de verschillende condities en parameters op het uiteindelijke resultaat goed te begrijpen, zodat een infrarood beeld op een correcte manier wordt geïnterpreteerd. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op:

- de invloed van de reflectie en emissiviteit van het oppervlak;
- de invloed van de weersomstandigheden en omgevingstemperaturen;
- de impact van het lensgebruik, resolutie en belang van kalibratie.

Daarna wordt aandacht besteed aan de meetprocedure en de verwerking van thermografische metingen. Welke meetapparatuur kan nog van pas komen tijdens een thermografische inspectie? Wat moet er vermeld worden in een verslag volgens de EN-norm en volgens de conclusies van dit onderzoek?

1 Reflectie en emissiviteit van het oppervlak

1.1 Impact op de thermografische meting

Wanneer ervan uitgegaan wordt dat de transmissie van de atmosfeer gelijk is aan 1 en enkel opake materialen beschouwd worden, kan de hoofdwet van thermografie [6] vereenvoudigd worden tot:

$$W_{tot} = \varepsilon W_{obj} + \rho W_{amb} \operatorname{met} \varepsilon + \rho = 1$$
[7]

Met

 W_{tot} : de totale stralingsenergie opgevangen door de camera ϵ : de emissiviteit van het object

W_{obj}: de uitgezonden energie van het object

ρ: de reflectie van het object (ρ = 1-ε)

 $W_{\mbox{\scriptsize amb}}$: de energie geëmitteerd door de omgeving, in functie van de gereflecteerde temperatuur van de omgeving

De verhouding tussen de emissiviteit ϵ en de reflectiefactor ρ heeft invloed op de foutmarge van thermografische metingen.

- Als de emissiviteit ε klein is, wordt de term van de reflectie ρ en dus de gereflecteerde temperatuur belangrijker. Als daarenboven ook nog eens een groot verschil bestaat tussen de oppervlaktetemperatuur van het object en de gereflecteerde temperatuur, zal de fout op de oppervlaktetemperatuur des te groter zijn bij een foute bepaling van de gereflecteerde temperatuur.
- In geval van een hoge emissiviteit en een klein verschil tussen • gereflecteerde omgevingstemperatuur de en de oppervlaktetemperatuur, zal de fout de op oppervlaktetemperatuur bii foute de bepaling van gereflecteerde temperatuur kleiner zijn.

Ter illustratie: lage ε , $\theta_{refl} < \theta_e$ versus hoge ε , $\theta_{refl} = \theta_e$

Figuur 3 toont een IR-meting op een plaat uit geëxtrudeerd polystyreen (XPS), uiterst rechts in de raampartij. Het oppervlak heeft een emissiviteit van 0,75. De metingen vonden plaats bij heldere hemel, vlak voor zonsopgang. De oppervlaktetemperatuur gemeten met een temperatuursensor bedroeg 11,3 °C.

De oppervlaktetemperatuur gemeten met thermografie bedroeg echter 9,3 °C en 10,3 °C wanneer de gereflecteerde temperatuur op -20 °C werd geschat (Figuur 3a). Wanneer de gereflecteerde temperatuur hoger werd geschat (-15 °C op Figuur 3b), werd de oppervlaktetemperatuur gemeten met thermografie 8,0 °C en 9,1 °C. De afwijking tussen beide metingen bedraagt ongeveer 1,2 °C.



Figuur 3 Metingen op het oppervlak van een plaat uit geëxtrudeerd polystyreen (XPS). Deze plaat zat uiterst rechts in de raampartij met ϵ =0,75. De metingen vonden plaats onder een heldere hemel. De oppervlaktetemperatuur van de XPS-plaat gemeten met een sensor was 11,27 °C.

Figuur 4 toont een IR-meting op de oppervlakte van een baksteen. De linkerhelft van de steen werd behandeld met een rubberen coating (ϵ =0,99). Hoewel op Figuur 4c de gereflecteerde temperatuur 3,3 °C werd onderschat, blijft de aflezing ter hoogte van de rubberen coating gelijk, vergeleken met Figuur 4b, waar de gereflecteerde temperatuur wel correct ingesteld was.



Figuur 4 (a) Metingen op het oppervlak van een baksteen (ϵ =0,90). Ter hoogte van Sp2 werd het oppervlak behandeld met een rubbercoating (ϵ =0,99). (b) en (c): Wanneer de gereflecteerde temperatuur verkeerd wordt geschat (c), bedraagt de fout op het baksteenoppervlak slechts 0,5 °C, terwijl de rubbercoating geen afwijking vertoont.

Fabrikanten van thermografische camera's stellen veelal zelf standaardtabellen op met de emissiviteitswaarden van de meest voorkomende bouwmaterialen (Tabel 1), wat zeer handig is voor een snelle analyse. Voor metingen waar een hoge nauwkeurigheid ($\pm 0,5$ °C) vereist is, blijken deze waarden echter onvoldoende precies te zijn. Zo rapporteren verschillende fabrikanten bijvoorbeeld uiteenlopende waarden voor sterk gepolijst aluminium en beton. Voor glas zijn de emissiviteitswaarden dan weer hoger dan aangegeven in de norm EN673 (14), waar een emissiviteit van 0,837 vermeld wordt. Voor een volledige emissiviteitstabel wordt verwezen naar bijlage 1.

	Testo	Flir	Omega
Aluminium, sterk geoxideerd	(93°C) 0,20	(50-100°C) 0,2-0,3	(93°C) 0,20
Aluminium, sterk gepolijst	(100°C) 0,09	(100°C) 0,05	(577°C) 0,06
Beton	(25°C) 0,93	(17°C) 0,97	(0-1093°C) 0,94
Baksteen, mortel pleister	(20°C) 0,93	(20°C) 0,93	(21°C) 0,93
Chroom, gepolijst	(150°C) 0,06	(50°) 0,1	(150°C) 0,06
Gietijzer, geoxideerd	(200°C) 0,64	(260°C) 0,66	(199°C) 0,64
Glas	(90°C) 0,94		(0-93°C) 0,92- 0,94
Graniet	(20°C) 0,45	(20°C, gepolijst) 0,849	(21°C) 0,45
Gips	(20°C) 0,90	(20°C) 0,8-0,9	(20°) 0,8-0,9
Hout	(70°C) 0,94	(20°C, eik) 0,9	(38°C, eik) 0,91

Tabel 1 Emissiviteit van verschillende bouwmaterialen volgens Testo (15) Flir (16) en Omega (17). Voor een volledige lijst wordt verwezen naar bijlage 1.

Bovendien moet in het achterhoofd gehouden worden dat de emissiviteit ook afhankelijk is van de hoek waaronder gemeten wordt. Zo blijft de emissiviteitswaarde vrijwel constant voor de meeste materialen tot een observatiehoek van 40° t.o.v. de normaal van het oppervlak of tussen 70° en 110° t.o.v. het oppervlak. Wanneer de hoek groter wordt, verandert de emissiviteit gevoelig (8). Vooral niet-metalen zijn gevoelig voor de keuze van de observatiehoek (Figuur 5a). De emissiviteit wordt dus best bepaald binnen een hoek van 40°(Figuur 5b).



Figuur 5 (a) De afhankelijkheid van de emissiviteit ten aanzien van de observatiehoek (8). (b) Aangeraden observatiehoek tussen de IR-camera en het oppervlak.

Ten slotte kan de emissiviteit variëren naargelang de golflengte waarin de IR-camera opereert en de temperatuur. Die temperatuursafhankelijkheid is op zijn beurt verschillend per materiaal.

Ter illustratie: Impact temperatuur en golfbereik op ε

De emissiviteit van drie pleisters met een verschillende samenstelling werden onderzocht binnen 2 golfbereiken en getest in een variërende omgevingstemperatuur (0-100 °C) (Tabel 2, (18)). Uit het onderzoek bleek dat een hogere emissiviteit werd waargenomen in het lange golven bereik (8-12 µm) en dat de varieerde emissiviteit sterker afhankelijk de van golfbereik. omgevingstemperatuur in het lage De oppervlaktestaat en de samenstelling van het onderzochte pleisters bleken ook een geringe invloed te hebben op de waarde van de emissiviteit.

In tabel 2 bestond pleister 1 uit een mengeling van binders, additieven en aggregaten en was het oppervlak ruw. Pleister 2 werd samengesteld met een cementvrije mortel, zand en vezels. De derde pleister bestond uit een mengsel van hydraulische binders, additieven en aggregaten, wat een zeer vlak oppervlak opleverde (18). Tabel 2 De emissiviteit is afhankelijk van de temperatuur, oppervlaktestaat en type van 3 pleisters met een verschillende samenstelling (18)

11						
0 °C	48,8 °C	100 °C				
0,58	0,61	0,77				
0,59	0,66	0,79				
0,57	0,59	0,84				
Golfbereik: 8 – 12 μm						
0 °C	48,8 °C	100 °C				
0,77	0,73	0,73				
0,79	0,7	0,69				
0.75	0.60	0.67				
	0 °C 0,58 0,59 0,57 0 0 °C 0,77 0,79	0 °C 48,8 °C 0,58 0,61 0,59 0,66 0,57 0,59 0 0 °C 48,8 °C 0,77 0,73 0,79 0,73				

Golfbereik: 3 – 5,4 µm

Indien dus zeer nauwkeurige thermografische metingen moeten uitgevoerd worden waarbij de tolerantie gereduceerd is tot $\pm 0,5$ °C, wordt geadviseerd om voor aanvang van een meting eerst de gereflecteerde omgevingstemperatuur (§1.2) te bepalen en dan pas een precieze emissiviteit (§1.3).

1.2 In situ bepaling reflectie

Zoals in §1.1 van dit hoofdstuk aangegeven werd, is het van belang om de gereflecteerde omgevingstemperatuur correct in te schatten. Om de omgevingsstraling in situ op te meten, wordt gebruik gemaakt van een techniek die in de Amerikaanse standaard ASTM E1862-97 (19) beschreven staat. Hiervoor wordt een aluminiumfolie verkreukeld en weer platgestreken, zodat de straling van de omgeving zo diffuus mogelijk weerkaatst wordt. De aluminiumfolie doet als het ware dienst als een Lambertstraler. Dit wil zeggen dat de door de camera ontvangen straling vanuit om het even welke kijkrichting even sterk is. De verkreukelde folie heeft typisch een emissiviteit van 0,03-0,04, wat neerkomt op een reflectie van 96-97%. De folie reflecteert dus zo goed als alle omgevingsstraling. Het stappenplan om de gereflecteerde temperatuur te bepalen ziet er als volgt uit:

- 1. Hang de aluminiumfolie tegen het oppervlak dat moet worden opgemeten. Doe dit altijd met de meest reflecterende zijde naar boven.
- 2. Positioneer de camera op de plaats waar de metingen zullen worden uitgevoerd. Op deze manier zal de gereflecteerde temperatuur die gemeten wordt door middel van de aluminiumfolie zo nauwkeurig mogelijk de gereflecteerde temperatuur van het op te meten oppervlak benaderen. Indien na de metingen van de gereflecteerde temperatuur nog van positie gewisseld wordt, kunnen de reflectiebronnen anders zijn. Zorg ook voor dat het observatiepunt niet in de buurt ligt van puntwarmtebronnen (bijvoorbeeld een lamp, radiator) zodat de reflectie hierdoor niet wordt verstoord.
- 3. Stel de emissiviteit van de camera in op 1, op die manier wordt ingesteld dat alle invallende straling afkomstig is van het opgemeten vlak.
- 4. Meet de temperatuur van de aluminiumfolie en neem de gemiddelde temperatuur over een representatief stuk van de folie. Dit is de gereflecteerde temperatuur.
- 5. Herhaal deze stappen minstens 3 maal en middel uit.



Figuur 6 In situ meting van de gereflecteerde temperatuur aan de hand van aluminiumfolie

Met deze methode zal het echter nooit mogelijk zijn om tot een volledig correcte gereflecteerde temperatuur te komen aangezien het stukje aluminiumfolie geen echte Lambertstraler is omdat de reflectiviteit steeds minder dan 1 zal zijn (0,95-0,99). Toch geeft deze methode in de meeste gevallen een vrij betrouwbare waarde.

1.3 In situ bepaling emissiviteit

1.3.1 Procedure

De emissiviteit kan in situ bepaald worden door gebruik te maken van één van de twee methodes beschreven in ASTM E1933 – 99a (20). De methode die in de praktijk het meest voorkomt, maakt gebruik van een oppervlaktemodificerend materiaal zoals verf of kleefband met een hoge emissiviteit (Figuur 7). Een tweede methode die in de norm beschreven staat, maakt gebruik van een meting met een contactthermometer. Beide opties hebben onderstaande procedure:

- 1. Installeer de thermografische camera op een statief en richt de camera naar het te onderzoeken object.
- 2. Breng het oppervlaktemodificerend materiaal (Methode 1) of de contactthermometer (Methode 2) aan op het oppervlak op of net naast de plaats waar de emissiviteit moet worden opgemeten. Zorg er voor dat het oppervlaktemodificerend element de tijd gehad heeft om op dezelfde temperatuur te komen als de ondergrond.
- 3. Neem een thermografische foto van het gewenste punt, zorg ervoor dat het oppervlaktemodificerend materiaal ook in beeld is (Methode 1). Voor Methode 1 moet de emissiviteit ingesteld worden op de emissiviteit van het oppervlaktemodificerend materiaal.
- 4. Vergelijk de oppervlaktetemperatuur van het te meten oppervlak met de temperatuur van het oppervlaktemodificerend materiaal (Methode 1) of de temperatuur die wordt afgelezen op de contactthermometer (Methode 2) (=referentietemperatuur). Pas de instellingen voor emissiviteit op de thermografische camera zodanig aan dat de temperatuur van het gewenste oppervlak identiek is aan de referentietemperatuur.
- 5. Herhaal deze stappen minimaal drie keer en middel de afgeleide emissiviteitswaarde uit.

Het is belangrijk dat deze emissiviteitsbepaling in situ gebeurt met dezelfde thermografische camera als waarmee het thermografisch

onderzoek zal worden uitgevoerd. Dit zorgt ervoor dat de invloed van het golfbereik van de camera op de emissiviteit beperkt is.



Figuur 7 Demonstratie van Methode 1 uit ASTM E1933-99a op een baksteen. Er werd een dunne laag rubbercoating op het oppervlak aangebracht met een gekende emissiviteit van 0,99 (Sp 2). Door bij Sp3 de emissiviteit zo aan te passen dat de oppervlaktetemperatuur aan beide punten gelijk is, wordt de emissiviteit van de baksteen afgeleid.

Beide methodes hebben echter ook beperkingen. Om bijvoorbeeld de emissiviteit van glasoppervlakken te bepalen zijn ze ontoereikend. Door de spiegelreflectie van de omgeving kan een verkeerde oppervlaktetemperatuur gemeten worden op het glasoppervlak naast de tape. In het onderzoeksproject werd daarom uitgegaan van een emissiviteit van 0,837 voor glas, zoals vermeld in EN673 (14).

Opmerking

Volgens ASTM E1933 – 99a (20) moet er een minimaal temperatuurverschil van minstens 10°C aanwezig zijn tussen het te meten object en de omgeving alvorens de emissiviteit bepaald kan worden. Om dit te bereiken zou men de gevel dus in principe eerst zo gelijkmatig mogelijk moeten opwarmen. Wanneer de temperatuur van de omgeving en de oppervlaktetemperatuur heel dicht tegen elkaar aanleunen, zou een aanpassing aan de emissiviteit slechts een kleine invloed hebben op waarde van de oppervlaktetemperatuur.

Echter, we weten dat de meeste bouwmaterialen een emissiviteit boven 0,9 hebben. Daardoor zal de oppervlaktetemperatuur in ieder geval slechts beperkt wijzigen bij de emissiviteitsbepaling. Bovendien is het praktisch gezien niet evident om een deel van de bouwschil zo gelijkmatig mogelijk op te warmen en tegelijk metingen uit te voeren die gebruikt worden voor de bepaling van de thermische prestaties.

1.3.2 Gebruik van oppervlaktemodificerende materialen

Als oppervlaktemodificerend materiaal kan een zwarte tape of verf met een hoge emissiviteit (> 0,90) gebruikt worden. Hoe hoger de emissiviteit, hoe minder de gemeten oppervlaktetemperatuur van de tape of verf beïnvloed wordt door de omgevingstemperatuur. In het onderzoeksproject werd gebruik gemaakt van zwarte tape waar elektriciteitskabels mee geïsoleerd worden (0,93) en witte spray (0,93). Rubbercoating (0,99) haalt de beste emissiviteit, maar is onmogelijk te verwijderen bij poreuze materialen.



Figuur 8 Testje met verschillende oppervlaktemodificerende materialen op een OSB-plaat. De zwarte ISO-tape is in alle standaard Doe-Het-Zelf winkels te vinden.

Daarnaast moet het oppervlaktemodificerend materiaal goed blijven kleven, om zo goed mogelijk de oppervlaktetemperatuur over te nemen. Om die redenen wordt tape vaak gebruikt bij metingen op vlakke oppervlakken. Een tape blijft goed kleven en kan achteraf verwijderd worden zonder sporen na te laten. Op een plat dak met bitumineuze afdichting of een ruw oppervlak blijft tape echter minder goed kleven en is verf of een zwarte vloeibare rubberspray een betere optie.

2 Omgevingsfactoren

De weersomstandigheden hebben een directe invloed op de interpretatie van de thermografische meting. Door zonnestraling verhogen de oppervlaktetemperaturen van bouwcomponenten waardoor bij buitenmetingen de thermische prestaties slechter lijken of koudebruggen onzichtbaar worden. De straling van de hemelkoepel bij open hemel kan het oppervlak dan weer doen afkoelen waardoor de thermische prestaties bij buitenmetingen te gunstig lijken. De thermografische meting kan dus bemoeilijkt worden bij ongunstige weersomstandigheden.

Om dergelijke invloeden te vermijden, werden richtlijnen geformuleerd in diverse Europese en Amerikaanse normen en in wetenschappelijke artikels. De aanbevelingen zijn echter vrij vaag. Zo wordt bijvoorbeeld geen onderscheid gemaakt tussen binnenen buitenmetingen, metingen voor isolatiegebreken of U-waarde bepaling. Bovendien worden in sommige bronnen thermische lichte en zware wanden over dezelfde kam geschoren. In de normen wordt ook geen rekening gehouden met het simultaan optreden van verschillende weersinvloeden. Zo kan een kleine temperatuurschommeling aan het oppervlak van een wand geneutraliseerd worden door bijvoorbeeld de wind, waardoor grotere temperatuurgradiënten in combinatie met wind misschien wel acceptabel zijn voor thermografische metingen.

(NBN EN 13187 (25), BS EN 13187 (26), ASIM C1060-118 (21), TheCH (33) en								
RESNET (34)) en wetenschappelijke artikels.								
	Kleine thermische	Gemiddelde thermische	Grote thermische					
	massa							
	Geen zon 3u voor	Geen zon 8u voor						
	thermografie (21)	thermografie						
(21)								
Thermografie Thermografie Thermog								

mogelijk enkele

uren na zon (22)

(23)

Zonnestraling

Tabel 3: Samenvattende tabel van de richtlijnen uit diverse normdocumenten (NON EN 12107 (25) DC EN 12107 (26) ACTM (1060 112 (21) TheCH (22) on

mogelijk 24 uur

na zon(22) (23)

mogelijk 48 uur

na zon (22) (23)

	Kleine	Gemi	ddelde	Grote		
	thermische	ther	mische	thermische		
	massa	m	assa	massa		
	Thermografie	Thern	nografie	Thermografie		
	mogelijk 2-3 uur	mogelij	k 4-6 uur	mogelijk 8 uur na		
	na blootstelling	na bloo	otstelling	blootstelling (24)		
	(24)	(24)			
	Geen directe bezon	nning ged (26)	urende 12u) (27)	voor meting (25)		
	Zware constructies	s vereisen	ı wel extra a	andacht (25) (26)		
	Geen bezonning t	oegestaar :)	n (9) (10) (2 32)	8) (29) (30) (31)		
m .	$\Delta \Theta_{e} \epsilon$	en Δθ _i laag	g en stabiel	(10)		
gradiënt binnen	$\Delta \theta_{e} < 10^{\circ} \text{C} 24 \text{u} \text{ vo}$	or en < 5° (2	°C tijdens de 29)	e meting (25) (26)		
$(\Delta \Theta_i)$ en buiten	$\Delta \theta_i < 2^{\circ}C$	tijdens de	meting (4)	(25) (26)		
(108)	$\Delta \theta_{\rm e} < 5^{\circ} \rm C$	tijdens de	e meting (4)	(25) (26)		
	Neersla	ag is te ve	rmijden (10)) (31)		
	Het heeft geen invloed op metingen van korte afstand (22) (33)					
Neerslag	Metingen op natte of met sneeuw bedekte oppervlakke zijn niet toegelaten (21) (22) (33)					
	Neerslag maakt het onmogelijk om te meten (32)					
	Voor dakinspectie moet het dak droog zijn (3) (9) (10)					
Bewolkingsgraad	Ideale omstandigheden wanneer de hemel volledig overdekt is (9) (31) (33)					
gereflecteerde	Overdekte gevel = $\theta_{obj} \approx \theta_{refl}$ = ideale omstandigheden (23) (28)					
temperatuur	Belangrijke invloed op $\theta_{refl}(8)$					
	Isolatiedefect	en	Lu	chtlekkage		
	$(\theta_i - \theta_e) > 10^{\circ}$ C vanaf	4u voor	$(\theta_i - \theta_e) > 1$,7°C vanaf 4u voor		
	meting (34)		n	neting (34)		
	$(\theta_{i} - \theta_{e}) > 10^{\circ}C(1)$	10)	(θ _i -	θ _e)> 3°C (10)		
Temperatuur-	$(\theta_i - \theta_e) > 10^{\circ}C(35)$ $(\theta_i - \theta_e) > 5^{\circ}C(35)$					
verschil tussen	$(\theta_i - \theta_e) > 10^{\circ} C (28)$					
binnen en buiten	$(\theta_i - \theta_e) > 3/U$ (minimum 5°C) vanaf 24h voor meting (4) (27)					
$(\theta_i - \theta_e)$	(θ _i -θ _e)> 15°C v	vanaf 24u	voor de me	ting (19) (32)		
	$(\theta_i \cdot \theta_e) > 10 - 15^{\circ}C(13)(30)$					
	$(\theta_i - \theta_e) > 5^{\circ}C$ vanaf 24u voor de meting (25) (26) (29)					
	$(\theta_i - \theta_e) > 10^{\circ}$ C gedurende 4u voor de meting (21) (36)					
	$(\theta_{i}-\theta_{e})>10^{\circ}C(>$	20°C vooi	r U-waardel	verekening) (8)		
Windsnelheid	Kwalitatief		K	wantitatief		
(m/s)	2,7 (30)		1 (ide	aliter 0,2) (30)		

Kleine thermische massa	Gemiddelde thermische massa	Grote thermische massa			
5 (9) (35)					
6,7 (10) (21)					
3,6 (34)					
2 (22) (23) (31) (32)					

Indien men rekening wil houden met de strengste richtlijnen uit de literatuur, zou thermografie slechts 10% van de tijd mogelijk kunnen zijn (berekening gebaseerd op weerdata Ukkel). Omdat dit onhaalbaar is in praktijk, werden de huidige richtlijnen genuanceerd en aangevuld in het Tetraproject. Daarbij werd onderscheid gemaakt in het type constructie en vereiste nauwkeurigheid van de meting. Onze aanvullingen zijn het resultaat van 1200 simulaties op zes verschillende wandtypes, waarin de bewolkingsgraad, zonnestraling en windsnelheid gevarieerd werden. De invloed van temperatuurgradiënten en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten werden apart bekeken.

2.1 Voor het inschatten van thermische prestaties

Thermografie zou een interessante techniek kunnen zijn om de thermische gebouwcomponenten prestaties snel van te Aan de hand beeld de controleren. een van van oppervlaktetemperatuur, zou de U-waarde van wanden en glas berekend kunnen worden. Die oppervlaktetemperaturen moeten echter wel representatief zijn voor de berekening van de Uwaarde.

Een aantal omgevingseffecten zorgen ervoor dat het thermisch gedrag sterk afwijkt van de ideale omstandigheden om de Uwaarde te bepalen. Als bijvoorbeeld de zon op een wand schijnt, volstaat het niet om directe zonneschijn tijdens de meting te vermijden. Ook na de meting zal het effect van invallende zonnestraling nog een hele tijd merkbaar zijn. We moeten dus kijken hoe lang het duurt vooraleer deze effecten verdwenen zijn, en de thermische conditie het dichtst aanleunt bij de ideale stationaire omstandigheden. Om een betrouwbare meting voor U-waarde bepaling te kunnen uitvoeren, moeten we beperkingen opleggen. Als criterium werd daarbij genomen dat er maximaal 0,5 °C verschil mag zijn tussen oppervlaktetemperatuur de tiidens de meting de en oppervlaktetemperatuur bij statische omstandigheden. Dit is de kleinste afwijking van thermografische metingen die bereikt werd in labocondities (37). Om bij elke situatie te kijken hoe lang men moet wachten om een meting te kunnen uitvoeren, werden 6 courante types wandopbouwen gesimuleerd in VOLTRA (Tabel 4) (38). Daarbij werd gekeken naar de impact van de zonnestraling, straling van de hemelkoepel, de windsnelheid, de binnen- en de buitentemperatuur.

De zes wandopbouwen hebben allemaal een U-waarde van 0,22 W/m²K, behalve de niet-geïsoleerde spouwmuur. Dit is in overeenstemming met de huidige EPBD-normen. Het grote verschil tussen de types zit in de thermische effusiviteit *e*. Dit is een oppervlakte-eigenschap die aangeeft hoe snel de warmte van het oppervlak weggeleid wordt. Het is dan ook deze eigenschap die er voor zorgt dat twee materialen op dezelfde temperatuur toch verschillend aanvoelen als we die aanraken.

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \tag{8}$$

Tabel 4 Overzicht van de 6 courante wandtypes waarvoor de richtlijnen voor de zon, straling van de hemelkoepel, wind, temperatuurgradiënten en temperatuurverschil werden getest a.d.h.v. multivariabele simulaties.

	(a)	(b)	(c)
	-90mm metselwerk	-90mm metselwerk	-90mm metselwerk
	-40mm spouw	-120mm isolatie	-40mm spouw
	-120mm isolatie	-190mm metselwerk	-190mm metselwerk
	-190mm metselwerk -20mm pleister	-20mm pleister	-20mm pleister
U-waarde	0,22	0,22	1
(W/m^2K)			
Thermische	531, 21	531,21	531,21
effusiviteit			
(J/m²K√s)			
Warmte-	88,1	88,1	88,1
capaciteit			
(kJ/K)			
	(d)	(e)	(f)
	-25mm pleister	-190mm gewapend	-25mm OSB
	-142mm isolatie	beton -142mm isolatie	-135mm isolatie
	-190mm gewapend	-20mm pleister	-25mm OSB
	beton	r · · · ·	
	-20mm pleister		
U-waarde	0,22	0,22	0,22
(W/m^2K)			
Thermische effusiviteit (J/m²K√s)	32,40	2500,00	32,40
Warmte-	5,4	414,6	5,4
capaciteit (kJ/K)			

De thermische effusiviteit van de verschillende wandtypes heeft een duidelijke weerslag op de wachttijden berekend met de multivariabele parameterstudie. Algemeen gezien zullen wanden met een zware thermische massa aan de buitenzijde langer beïnvloed blijven door een wijziging van de weersomstandigheden, dan wanden met een lage thermische massa aan de buitenzijde. Zo zal voor massieve wanden met binnenisolatie 36 tot uur voor de meting gunstige weersomstandigheden moeten voorkomen. Voor een houtskeletwand is dit maximum 4 uur, dus moet men slechts 4 uur wachten (Figuur 9) indien de weersomstandigheden veranderen.



Figuur 9 Globaal beeld van de simulatieresultaten voor buitenmetingen. Hoe hoger de thermische massa (en de thermische effusiviteit), hoe kleiner het temperatuurverschil t.o.v. de statische toestand (y-as), maar hoe langer de wachttijd (x-as). Tabel 5 geeft de wachttijden weer per wandtype.

In figuur 9 is op de x-as aangegeven hoe lang men moet wachten voor de metingen een statische toestand vastleggen. Op de y-as ziet men hoe groot de afwijking van de statische toestand maximaal is. Bij de lichte constructies wordt die afwijking snel erg groot, maar door de beperkte warmtecapaciteit is dit effect ook snel weer verdwenen. Bij de zwaardere constructies is de afwijking minder groot, maar blijft de impact veel langer zichtbaar. Bijgevolg zijn thermisch zware wanden beter bestand tegen kortstondige weerfenomenen, aangezien de oppervlaktetemperatuur langzaam wijzigt. Bij wanden met lichte thermische massa aan de buitenzijde zullen windstoten of korte opklaringen quasi onmiddellijk een grote invloed hebben op de oppervlaktetemperatuur.

Uit de simulaties bleek dat de hoeveelheid globale zonnestraling de grootste impact heeft op de wachttijden. De wind en de straling van de hemelkoepel hebben echter een kleiner en vooral afkoelend effect. Tabel 5 toont de wachttijden na het optreden van ideale meetcondities volgens de hoeveelheid globale zonnestraling die op één dag door een zuidgeoriënteerde wand opgevangen wordt. In de tabel komen dagen met een totale hoeveelheid globale zonnestraling vanaf 11400 kJ/m² en meer voor vanaf half maart tot half oktober (berekening gebaseerd op weerdata Ukkel).

Tabel 5 Wachttijden voor buitenmetingen voor de bepaling van de U-waarde (zie ook Figuur 9), afhankelijk van de hoeveelheid globale zonnestraling. Hierin is de impact van alle gradaties van windsnelheid (0-7 m/s), zonnestraling (0-11400 kJ/m²) en bewolkingsgraad (verschil tussen θ_e en θ_{hemel} van 0°C tot 20°C) beschouwd.

Zon (kJ/m²)	Houtskelet	Massief binnen- isolatie	Massief buiten- isolatie	Volledig gevulde spouw- muur	Niet gevulde spouw- muur	Deels gevulde spouw- muur
11400	2 – 4u	31 - 36u	1,5 – 3u	9,5 – 13u	11 - 17u	9,5 –13u
8400	1,5 -3,5u	26 - 33u	1 - 3u	9 – 12u	9 –15,5u	9 – 12u
5600	0,5 – 3u	20 – 27u	0,5 -2,5u	7 – 11u	6 –12,5u	7 – 11u
2750	0 – 2,5u	0 – 20u	0 – 1,5u	3 – 9u	0 – 9u	3 – 9u
0	0 – 2,5u	0 – 20u	0 – 2u	0 – 8u	0 – 8u	0 – 8u

Voorbeeld 1: Na een dag met veel zon, heldere hemel en hoge windsnelheden (> 8m/s)....

...moet het minimaal 36 uur zwaar bewolkt zijn met een windsnelheid tot 2 m/s voor massieve wanden met binnenisolatie. In de praktijk wordt het dus niet evident om dergelijke nauwkeurige thermografische metingen uit te voeren.

Bij een houtskeletwand moet de zware bewolking en lage windsnelheid minimaal 4 uur aanhouden.

Voorbeeld 2: Na een nacht/ochtend met weinig zon, heldere hemel en hoge windsnelheden (> 8m/s)....

...moet er 20 uur verstrijken met zware bewolking en lage windsnelheden vooraleer nauwkeurige metingen kunnen plaatsvinden op een massieve wand met binnenisolatie. Opnieuw, in realiteit komen deze omstandigheden zeer zelden voor. Voor een houtskelet is dit 2,5 uur.

Wat binnenmetingen voor U-waarde bepaling betreft, zijn enkel wachttijden noodzakelijk voor de houtskeletwand en de niet gevulde spouwmuur (Tabel 6).

Tabel 6 Wachttijden voor binnenmetingen voor de bepaling van de U-waarde (zie ook Figuur 9). Hierin is de impact van alle gradaties van windsnelheid (0-7 m/s), zonnestraling (0-11400 kJ/m²) en bewolkingsgraad (verschil tussen θ_e en θ_{hemel} van 0°C tot 20°C) beschouwd.

Zon (kJ/m²)	Houtskelet	Massief binnen- isolatie	Massief buiten- isolatie	Volledig gevulde spouw- muur	Niet gevulde spouw- muur	Deels gevulde spouw- muur
11400	2u	/	/	/	24u	/

Zoals hoger aangegeven worden de wachttijden korter wanneer er minder zonnestraling aanwezig is voor de metingen. De straling van de hemelkoepel heeft een afkoelend effect die minder lang invloed heeft op de oppervlaktetemperaturen van de verschillende wandtypes. Daarnaast zijn er nog andere parameters, zoals de neerslag, de temperatuursverandering en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten die de nauwkeurigheid van de thermografische meting beïnvloeden.

2.1.1 Zonnestraling

Buitenmeting

De hoeveelheid geabsorbeerde zonnestraling is de meest doorslaggevende omgevingsfactor in de wachttijden voor thermografie voor U-waarde bepaling. De wachttijden berekend met de simulaties (Tabel 7) liggen in de lijn van wat andere wetenschappelijke bronnen vermelden (22) (23). **Een kwantitatieve meting is dus niet evident zijn om uit te voeren.** 27
Zeker als er van buitenaf gemeten moet worden is een nauwkeurige meting slechts mogelijk bij een dicht wolkendek. Bij thermisch zware wanden kan de wachttijd, zelfs wanneer er een beetje zon is, al oplopen tot ongeveer 17 uur (Tabel 7).

Enkel voor houtskeletwanden en massieve wanden met buitenisolatie kan thermografie voor het inschatten van thermische prestaties haalbaar zijn. Er zou dan minimaal 3 uur voor de meting geen zonnestraling mogen inwerken op de lichte wand. Dit gaat er steeds van uit dat er geen geventileerde spouw aanwezig is. Indien dit toch het geval is, zal de temperatuur van het buitenspouwblad nog meer bepaald worden door de windsnelheid en doorspoeling van de spouw, waardoor een inschatting van de warmteweerstand vrijwel onmogelijk wordt (8).

Tabel 7 Wachttijden voor buitenmetingen voor U-waarde bepaling na zonsondergang, voor een zuidgeoriënteerde wand. Deze wachttijden zijn gebaseerd op de impact van de zonnestraling op de buitenoppervlaktetemperatuur. Indien de andere weersfactoren (geen wind, bewolkte hemel) gunstig waren op de dagen voor de meting, kunnen deze wachttijden gebruikt worden.

Zon	Hout-	Massief	Massief	Deels	Volledig	Niet
(kl/m^2) skolot		binnen-	buiten-	gevulde	gevulde	gevulde
	SKILL	isolatie	isolatie	spouwmuur	spouwmuur	spouwmuur
11400	3u	32u	2u	10u	10u	13u
8400	3u	29u	2u	10u	10u	11u
5600	2u	23u	1u	9u	9u	9u
2750	1u	17u	1u	6u	6u	5u

De wachttijden uit Tabel 7 gelden voor een zuidgeörentieerde wand. Tabel 8 geeft de kortingsfactoren weer, afhankelijk van de oriëntatie van de wand. Zo zou voor een noordgeörienteerde massieve wand met binnenisolatie op het noorden een maximale wachttijd van 36 uur * 29% = 11 uur moeten gerespecteerd worden voor metingen om de thermische prestatie te bepalen.

Tabel 8 Kortingspercentages voor de 6 verschillende wandtypes, afhankelijk van de oriëntatie.

	Hout- skelet	Massief binnen- isolatie	Massief buiten- isolatie	Volledig gevulde spouw- muur	Niet gevulde spouw- muur	Deels gevulde spouw- muur
Noord	6%	29%	17%	34%	21%	34%
Oost	12%	61%	17%	55%	44%	55%
Zuid	100%	100%	100%	100%	100%	100%
West	94%	61%	100%	84%	68%	84%

Enkel voor noordgeörienteerde wanden lijkt thermografie voor Uwaarde bepaling praktisch haalbaar. Er zouden dan maximum 2 dagen met ideale weeromstandigheden moeten plaatsvinden vooraleer op het zwaarste wandtype gemeten kan worden.

Binnenmeting

Bij binnenmetingen zijn de wachttijden heel wat kleiner, waardoor metingen voor thermische prestatiebepaling hier **wel praktisch haalbaar** zijn. Bij maximale zonnestraling stijgt enkel de binnentemperatuur bij slecht geïsoleerde wanden (zoals de spouwmuur zonder isolatie) en voor lichte thermische wanden (zoals de houtskeletbouw en de massiefwand met buitenisolatie). Voor lichte thermische wanden zou bijvoorbeeld een wachttijd van 4 uur gerespecteerd moeten worden na bezonning (Tabel 9).

Bij binnenmetingen op spouwmuren zonder isolatie kan de wachttijd echter oplopen tot 18 uur na zonsondergang. Dit wil zeggen dat er eerst een dag met ideale omstandigheden moet plaatsvinden alvorens nauwkeurige thermografische metingen kunnen plaatsvinden aan het binnenoppervlak (Tabel 9). Tabel 9 Wachttijden voor binnenmetingen voor U-waarde bepaling na zonsondergang, voor een zuidgeoriënteerde wand.

Zon (kJ/m²)	Hout- skelet	Massief binnen- isolatie	Massief buiten- isolatie	Volledig gevulde spouwmuur	Niet gevulde spouwmuur	Deels gevulde spouwmuur
11400	2u	/	/	/	18u	/
8400	1u	/	/	/	15u	/
5600	/	/	/	/	11u	/
2750	/	/	/	/	/	/

2.1.2 Straling van de hemelkoepel

Buitenmeting

De stralingstemperatuur van de hemelkoepel ligt steeds lager dan de luchttemperatuur. Dit zorgt ervoor dat een geveloppervlak door langegolfstraling naar de hemelkoepel afkoelt. De mate van afkoeling wordt bepaald door het verschil tussen de lucht- en stralingstemperatuur, m.a.w. door de bewolkingsgraad.

In de literatuur (Tabel 3) wordt aangegeven dat de metingen moeten uitgevoerd worden bij een overtrokken hemel. Dit wordt ook door de simulatieresultaten bevestigd, maar voor nauwkeurige IR-metingen zouden daarbij ook wachttijden gerespecteerd moeten worden (Tabel 10). Deze zijn weliswaar veel beperkter dan in het geval van zonnestraling.

De wachttijden zijn afgeleid op basis van het temperatuurverschil tussen de hemel en de lucht. Bij helder weer, zal de hemeltemperatuur maximum 20 °C lager liggen dan de luchttemperatuur (39). Naarmate de bewolking toeneemt, zal dit verschil verkleinen. Een temperatuurverschil van 5 °C tussen de hemel en de lucht komt overeen met een zwaar bewolkte hemel. Tabel 10 Wachttijden voor buitenmetingen voor U-waarde bepaling na het opkomen van de bewolking, voor een zuidgeoriënteerde wand. Deze wachttijden zijn gebaseerd op de impact van de straling van de hemelkoepel op de buitenoppervlaktetemperatuur. Indien de andere weersfactoren gunstig waren (weinig wind, weinig zon) tot enkele dagen voor de meting, kunnen deze wachttijden gebruikt worden.

	Hout- skelet	Massief Binnen- isolatie	Massief Buiten- isolatie	Volledig gevulde spouw- muur	Niet gevulde spouw- muur	Deels gevulde spouw- muur
$\theta_{\text{hemel}} = \theta_{\text{e}} - 5^{\circ}\text{C}$	30m	1u	30m	1u	1u	1u
$\theta_{\rm hemel} = \theta_{e} \cdot 10^{\circ} C$	1u30m	11u	1u30m	4u	3u	4u
$\theta_{\rm hemel} = \theta_{\rm e} - 15^{\circ} C$	2u	16u	2u	5u	5u	5u
$\theta_{hemel} = \theta_e - 20^{\circ}C$	2u	20u	2u	6u	6u	6u

Vanaf het moment dat de hemel opnieuw volledig bewolkt is, kan onmiddellijk gemeten worden op lichte constructies. Voor zwaardere constructies, zoals de massieve wand met binnenisolatie, duurt het 11 uur voor dit verschil terug kleiner is dan 0,5 °C. Bij massieve wanden met binnenisolatie moet het dus zeker tot 20 uur voor de metingen zwaar bewolkt zijn indien er helder weer was voor de meting.

Binnenmeting

De stralingstemperatuur van de hemelkoepel zal in geen enkel geval voor problemen zorgen, met uitzondering van de ongeïsoleerde spouwmuur. Daar zal het temperatuurverschil de grenswaarde - die in dit onderzoek vastgelegd is op 0,5 °C voor kwantitatieve metingen – overschrijden en moet er 8 uur gewacht worden in geval van helder weer ($\theta_{hemel} = \theta_e - 20$ °C).

In alle andere gevallen zal zelfs met een temperatuurverschil van 20 °C tussen de luchttemperatuur en de stralingstemperatuur van de hemelkoepel geen problemen optreden bij metingen van binnenuit. De afkoeling van het buitenoppervlak door de open hemel wordt in dit geval grotendeels teniet gedaan door de zonnestraling op de gevel.

2.1.3 Wind

Buitenmeting

De impact van de windsnelheid werd bekeken in combinatie met de zonnestraling en straling van de hemelkoepel. In combinatie met zonnestraling kan de wind immers een compenserende werking hebben. Een beperkte temperatuurstijging van het buitenoppervlak door de zon zou terug teniet gedaan kunnen worden door wind. Aan de andere kant kunnen de straling van de hemelkoepel en de wind de oppervlaktetemperatuur verder doen dalen, waardoor deze niet meer representatief is voor de statische conditie.

Uit de multivariabele parameterstudie blijkt dat er slechts in zwaar bewolkt weer ($\Delta \theta_{hemel} = \theta_e - 5$ °C), bij windsnelheden van maximum 1 m/s IR-metingen kunnen doorgaan om thermische prestaties van wanden te bepalen. Bij overschrijding van deze windsnelheid kan nog maximaal 1 uur doorgemeten worden in zwaar bewolkt weer. Deze beperking geldt voor alle wandtypes, met dien verstande dat zwaardere wandtypes minder gevoelig zijn voor korte veranderingen, bijvoorbeeld windstoten, terwijl bij een lichte wand zoals een houtskeletbouw onmiddellijke verandering in de oppervlaktetemperatuur zichtbaar is.

Binnenmeting

Enkel bij het binnenoppervlak van een houtskeletwand en een lege spouwmuur dienen wachttijden gerespecteerd te worden van zodra er een windsnelheid hoger dan 1 m/s optreedt. Dit criterium werd opnieuw afgeleid uit simulaties waarbij de combinatie van zon, wind en straling van de hemelkoepel bekeken werd. Wanneer er tijdens een meting bij zware bewolking wind opkomt, kan nog slechts 4 uur doorgemeten worden aan de binnenkant van een houtskeletwand. Voor de lege spouwmuur kan nog 7 uur doorgemeten worden aan de binnenkant. Voor de rest van de onderzochte wandtypes kan zonder problemen doorgemeten worden.

2.1.4 Neerslag

Neerslag is een andere - maar minder goed gedocumenteerde – omgevingsfactor. In Tabel 3 worden enkele aanbevelingen uit de Hoofdstuk 2: Richtlijnen voor betrouwbare metingen 32 literatuur samengevat. De meeste normen, raden metingen bij neerslag af. In NBN EN 13187 worden geen richtlijnen gegeven over de neerslag. Bij (22) en (33) wordt geopperd dat neerslag niet hinderlijk is wanneer gemeten wordt op korte afstanden. Mogelijk is dit enkel geldig wanneer gemeten wordt op een wand die afgeschermd is van de regen.

Uit simulaties blijkt dat de neerslag geen directe impact heeft op **de oppervlaktetemperatuur.** Het is eerder het vochtgehalte van de wand die oppervlaktetemperaturen oplevert die kunnen stationaire toestand. afwijken van de Wanneer de buitentemperatuur stijgt of daalt onder invloed van de bezonning of straling van de hemelkoepel, zal het temperatuurverschil tussen een droge en natte wand het hoogst zijn. Aangezien moment van zon en blote hemel in ieder geval vermeden moeten worden, vormen metingen tijdens neerslag geen probleem wat betreft de afwijking van de oppervlaktetemperatuur t.o.v. de stationaire toestand.

Ter illustratie: Vergelijking tussen een beregende en een afgeschermde wand

Om de invloed van neerslag op de oppervlaktetemperatuur te onderzoeken, werd een volledig gevulde spouwmuur in *Heat-Air-Moisture* software gesimuleerd. Daarbij werd een muur waarvan het oppervlak maximaal blootgesteld is aan regenval vergeleken met een muur die afgeschermd is van de regen. Er werd verondersteld dat het buitenoppervlak geen zonnestraling absorbeert. Ook de latente warmte door verdamping van het vocht in het model werd genegeerd. Enkel de impact van de neerslag, de buitentemperatuur en de relatieve vochtigheid van de buitenlucht werd dus bekeken. Het binnenklimaat in de simulatie had een constante binnentemperatuur van 20 °C en relatieve vochtigheid tussen 49,5% en 50,5%, wat overeenkomt met bijvoorbeeld een leefruimte.

Figuur 10 toont de buitenoppervlaktetemperaturen tussen 24/11 en 30/11 van de beregende en afgeschermde wand. Voorafgaand aan die periode werd de beregende wand veelvuldig onderworpen aan neerslag, waardoor het vochtgehalte in de buitenste laag van beregende wand ongeveer 9% bedroeg en de

afgeschermde wand 0,7% vocht bevatte.



Figuur 10 Buitenoppervlaktetemperaturen van een afgeschermde wand en een wand die volledig blootgesteld wordt aan neerslag. De buitentemperatuur is afgebeeld in stippellijn op de grafiek. Op de figuur is ook aangegeven wanneer er directe zonnestraling is, die de dagelijkse pieken in de buitentemperatuur veroorzaakt.

Voor de regenbuien op 26/11 en 27/11 (Figuur 10) is een verschil in buitenoppervlaktetemperatuur te zien van maximaal 0,5 °C tussen het afgeschermde en het natte wandmodel. Dit verschil treedt op wanneer de buitentemperatuur stijgt onder invloed van het zonlicht. Doordat permanent meer vocht aanwezig is in de muur die maximaal blootgesteld werd aan regen, stijgt de oppervlaktetemperatuur van de natte wand trager dan die van de droge wand.

Naarmate de bewolking toeneemt, stijgt de buitentemperatuur verder. Hierdoor warmt het buitenoppervlak van de afgeschermde wand iets sneller op. De oppervlaktetemperatuur van de afgeschermde wand is dus altijd iets hoger dan van de natte wand. Vlak voor de eerste bui op 26/11 wordt een temperatuurverschil van 0,3 °C waargenomen tussen het buitenoppervlak van de blootgestelde wand en de afgeschermde wand. De eerste twee regenbuien in de simulatie veroorzaken geen toename van het temperatuurverschil tussen beide modellen. Na de grootste regenbui op 27/11 daalt de buitentemperatuur echter plots van 16 °C naar 11,1 °C in 4 uur tijd. Door deze plotse daling zakken de oppervlaktetemperaturen aan de vochtige en afgeschermde wand ook. Door de regenbui stijgt het vochtgehalte van de blootgestelde wand van 9% naar 21%, waardoor de oppervlaktetemperatuur van de natte wand nog trager zakt dan de droge wand onder invloed van de dalende buitentemperatuur. Naarmate de buitentemperatuur verder daalt, heeft de blootgestelde wand een oppervlaktetemperatuur die 0,5 °C hoger is dan van de afgeschermde wand.

Op momenten dat de wand blootgesteld word aan de straling van de hemelkoepel bij heldere hemel, is te zien dat de oppervlaktetemperatuur van de beregende wand 0,7 °C hoger ligt. Bij bezonning ligt de oppervlaktetemperatuur van de beregende wand dan weer 0,6 °C lager dan die van de afgeschermde wand. Door een verschillend vochtgehalte, worden verschillende oppervlaktetemperaturen opgemeten.

Neerslag kan jammer genoeg wel een negatieve impact hebben indien er vloeibaar water op het oppervlak aanwezig is, bijvoorbeeld bij dauw. In dat geval wordt met thermografie eerder de temperatuur van de druppels gemeten en niet zozeer de temperatuur van het achterliggende vlak. Daarnaast kan de neerslag ook de **emissiviteit van het meetoppervlak** aantasten. Door bijvoorbeeld de aanwezigheid van stilstaand water op platte daken of dauwaanslag, kan de emissiviteit een stuk lager liggen en ontstaat er zelfs spiegelreflectie op het oppervlak (Figuur 11).



Figuur 11 Digitale en IR-foto van een plas water op een plat dak.

Neerslag kan ook de transmissie van de atmosfeer tussen het object en de camera verlagen. Tijdens een regenbui kan de lucht tussen camera en object de infraroodstraling minder doorlaten, waardoor de transmissiefactor van de lucht mogelijks kleiner wordt dan 1. In dit geval is de relatieve vochtigheid en de meetafstand van groot belang. Met deze twee factoren kan de software immers de transmissiefactor berekenen en de metingen corrigeren.

Kort samengevat, er wordt aangeraden om het vochtgehalte van de beschouwde wand ook te meten en te vermelden in het thermografisch verslag, ook bij droog weer. Wanneer het regent, moet de relatieve vochtigheid en de meetafstand zeker opgemeten worden.

2.1.5 Temperatuurverandering buiten

Buitenmeting

De invloed van de thermische massa van de wandtypes is ook hier doorslaggevend in de richtlijnen voor de verandering van de buitentemperatuur. De wanden met een zware thermische massa aan de buitenzijde zullen op korte termijn minder gevoelig zijn voor schommelingen van de buitentemperatuur omdat zij minder snel opwarmen. Op lange termijn echter, zal een wand met zware thermische massa aan de buitenzijde veel meer tijd nodig hebben om af te koelen eens de grenswaarde (0,5 °C) daadwerkelijk overschreden is.

Voor een wand met een kleine thermische massa aan de buitenzijde geldt het tegenovergestelde. Zelfs een kleine temperatuurverandering brengt een merkbaar verschil in de oppervlaktetemperatuur van de buitenwand teweeg. Tabel 11 de verhouding van de verandering toont in oppervlaktetemperatuur in functie van de verandering in de buitentemperatuur. De buitentemperatuur zou maximum 1 °C per stijgen of dalen tijdens een thermografische uur mogen In de praktiik wordt meetcampagne. een stabiele buitentemperatuur het makkelijkst bereikt bij zwaar bewolkt, windstil weer.

Tabel 11 Maximale toegelaten temperatuurverandering van de buitenlucht ($\Delta \theta_e$) voor U-waarde bepaling, indien de thermografische meting 1 uur in beslag neemt. $\Delta \theta_{se}$ is de temperatuursverandering van de buitenoppervlaktetemperatuur.

Constructietype	Licht	Gemiddeld	Zwaar
Vuistregel	$\Delta \theta_{se} = 0,5 * \Delta \theta_{e}$	$\Delta \theta_{se} = 0,45 * \Delta \theta_{e}$	$\Delta \theta_{\rm se} = 0,25 * \Delta \theta_{\rm e}$
Maximaal toegelaten temperatuurgradiënt (duur IR-meting = 1 uur)	Δθ _e < 1°C tijdens de meting	$\Delta \theta_e < 1^{\circ} C tijdens$ de meting	Δθ _e < 2°C tijdens de meting

Ter illustratie: bij een verandering van de buitentemperatuur van 1 °C per uur zal tijdens de buitenmeting...

- ...nog maximaal 1 uur kunnen doorgemeten worden op het buitenoppervlak van een houtskeletwand en een massieve wand met buitenisolatie. Bij een temperatuursverandering van 2 °C per uur is verder meten al niet meer mogelijk na een halfuur.
- ...nog maximaal 1 uur kunnen doorgemeten worden op het buitenoppervlak van een (gevulde, halfgevulde en lege) spouwmuur.
- ...nog maximaal 2 uur kunnen doorgemeten worden op het buitenoppervlak van een massieve muur met binnenisolatie.

De temperatuurverandering van de buitentemperatuur mag dus zeker niet meer dan 1 °C per uur bedragen om nog een uur te kunnen doormeten op lichtere wanden en twee uur op zwaardere wanden.

2.1.6 Temperatuurverandering binnen

Binnenmeting

De stabiliteit van de binnentemperatuur is ook een belangrijke parameter wanneer een thermografische meting van binnenuit gewenst is. Net zoals bij de temperatuurgradiënt buiten is de thermische massa belangrijk om uit te maken hoeveel de temperatuurvariatie van de binnenomgeving de binnenoppervlaktetemperatuur beïnvloedt. In Tabel 12 kan opgemerkt worden dat de invloed van de gradiënt van de binnentemperatuur op het binnenoppervlak van de wand iets kleiner is dan in het geval van een gradiënt van de buitentemperatuur op het buitenoppervlak. Dit heeft ook deels te maken met het feit dat er in het geval van binnenmetingen weinig externe factoren aanwezig zijn.

Tabel 12 Maximale toegelaten temperatuursverandering van de binnenlucht ($\Delta \theta_i$) voor U-waarde bepaling, indien de thermografische meting 1 uur in beslag neemt. $\Delta \theta_{si}$ is de temperatuursverandering van de buitenoppervlaktetemperatuur.

Constructietype	Licht	Gemiddeld	Zwaar
Vuistregel	$\Delta \theta_{si} = 0,45 \ *\Delta \theta_i$	$\Delta \theta_{si} = 0,30 \ *\Delta \theta_i$	$\Delta \theta_{si} = 0,20^* \Delta \theta_i$
Maximaal toegelaten temperatuurgradiënt (duur IR-meting = 1uur)	Δθ _i < 1°C tijdens de meting	Δθ _i < 1°C tijdens de meting	Δθ _i < 2°C tijdens de meting

Ter illustratie: bij een verandering van 1 °C per uur van de binnentemperatuur zal tijdens de binnenmeting...:

- ...nog maximaal 1 uur kunnen doorgemeten worden op de binnenkant van een houtskeletwand en een massieve muur met buitenisolatie.
- ...nog ongeveer 1 uur en 40 minuten kunnen doorgemeten worden op de binnenkant van een gevulde, half gevulde en lege spouwmuur.
- ...nog ongeveer 2 uur en 30 minuten kunnen doormeten worden op de binnenkant van een massieve muur met binnenisolatie.

De temperatuursverandering van de binnentemperatuur mag dus zeker niet meer dan 1 °C per uur bedragen om nog een uur te kunnen doormeten op lichtere wanden en 2,5 uur op zwaardere wanden.

Ter vergelijking, de binnenoppervlaktetemperatuur van een lichte, gemiddelde en zware thermische wand zal minder snel veranderen onder invloed van de binnentemperatuur (Tabel 12) dan dat de buitenoppervlaktetemperatuur verandert onder invloed van de buitentemperatuur (Tabel 11). Dit komt doordat de thermische massa van de materialen aan de binnenzijde van de wand verschilt (namelijk kleiner is) van deze aan de buitenzijde.

Ter illustratie

Bij een spouwmuur zal de thermische massa aan de buitenzijde afhangen van de gevelsteen, terwijl dit aan de binnenzijde afhankelijk is van de snelbouwsteen. Het is duidelijk dat deze twee types stenen verschillende eigenschappen hebben, maar toch zullen beiden in de categorie van de gemiddelde thermische massa vallen.

Daarnaast werd ook bekeken **wanneer de binnenoppervlaktetemperatuur opnieuw stabiel is na een grote stijging of daling van de binnentemperatuur (>1 °C)** (Tabel 13). Dit komt bijvoorbeeld voor bij nachtverlaging of wanneer de temperatuur wordt verhoogd om een voldoende hoog temperatuurverschil tussen binnen en buiten te verkrijgen. Op basis van de simulatieresultaten worden ook wachttijden voorgesteld na verandering van de binnentemperatuur vooraleer thermografische binnenmetingen aan te vangen (40).

Constructietype	Houtskelet	Massiefwand binnenisolatie	Massiefwand buitenisolatie
Na temperatuurstijging van 3 °C	1u30	1u30	7u
Bij nachtverlaging (bijvoorbeeld 20 °C-16 °C)	1u30	1u30	3u
Na opwarming onverwarmd gebouw (10 °C naar 20 °C)	1u30	1u30 (6 uur bij een slecht geïsoleerde)	35u

Tabel 13 Wachttijden na stijging of daling van de binnentemperatuur (40).

Wanneer gekeken wordt naar de verandering van de binnentemperatuur, is de massieve wand met buitenisolatie dus de thermisch zware wand. Het zwaarste materiaal -beton of metselwerk- zit aan de zijde van de temperatuursverandering. (40). Bij nachtverlaging is de wachttijd veel kleiner dan na een van 3 °C, eenmalige temperatuurstijging omdat de oppervlaktetemperatuur van de massieve wand met buitenisolatie nog beïnvloed wordt door de temperatuurstijging/daling van de nacht voordien.

Buitenmeting

Een stijging of daling van de binnentemperatuur heeft nauwelijks invloed op de buitenoppervlaktetemperaturen, zowel bij thermisch lichte als zware constructies.

Voorbeeld

Bij een stijging van 3 °C van de binnentemperatuur, zal de buitenoppervlaktetemperatuur maximaal 0,18 °C stijgen voor massieve wanden met binnen- of buitenisolatie. Voor een houtskeletwand is deze stijging maximum 0,13 °C. De berekening is gebaseerd op de eigenschappen uit Tabel 4.

Ook een regime van nachtverlaging, met bijvoorbeeld een dagelijkse daling van 4 °C heeft geen invloed op de buitenoppervlaktetemperatuur. Enkel bij een stijging van 10°C naar 20 °C van de binnentemperatuur, zou een wachttijd van minimum 12 uur moeten gerespecteerd worden voor massieve wanden met binnen- of buitenisolatie (40).

2.1.7 Temperatuurverschil tussen binnen en buiten

Het temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenomgeving speelt ook een belangrijke rol bij het uitvoeren van een thermografisch onderzoek. In de literatuur worden echter uiteenlopende richtwaarden gevonden:

• $(\theta_i - \theta_e) > 20^\circ C$

Voor een U-waarde berekening (8)

- $(\theta_i \theta_e) > 15^{\circ}C$
 - Vanaf 24u voor de meting (19) (32)
- $(\theta_i \theta_e)$ tussen 10°C en 15°C (13) (30)
- $(\theta_i \theta_e) > 10^{\circ}C$
 - Tijdens de meting (8) (10) (28) (35)
 - Gedurende 4 uur voor de meting (21) (36) (34)

•
$$(\theta_i - \theta_e) > 5^\circ C$$

Vanaf 24 uur voor de meting (4) (27) (25) (26) (29)

Hoe groter het temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenomgeving, hoe groter de warmteflux door de wand en hoe duidelijker een defect (koudebruggen, slecht geplaatste isolatie, ...) zichtbaar is met een thermografische camera. Daarnaast wordt, bij een hoger temperatuurverschil tussen binnen en buiten, de berekening van de thermische prestaties minder beïnvloed door factoren die niet met de thermografische meting te maken hebben, zoals de convectieve overgangscoëfficiënt (zie ook Hoofdstuk 4 §1.3).

Simulaties op een dubbel glas paneel met argonspouw tonen ook aan de afwijking op de U-waarde verkleint naargelang een groter temperatuurverschil heerst tussen binnen en buiten.



Figuur 12 Spreiding van de U-waarden berekend uit simulaties van dubbele beglazing met argon, met een variabel verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur t.o.v. de theoretische waarde (U_{en673}). Hoe hoger het temperatuurverschil, hoe nauwkeuriger de U-waarde bepaling.

Op basis van deze simulaties wordt geadviseerd om een temperatuurverschil van minimum 15 °C aan te houden. Dit temperatuurverschil wordt doorgaans enkel gehaald op strenge winterdagen.

2.1.8 Samenvatting: richtlijnen voor nauwkeurige metingen (±0,5 °C) voor het bepalen van thermische prestaties

Thermografische metingen aan het buitenoppervlak voor de inschatting van thermische prestaties van wanden zijn niet evident om uit te voeren. Dit is namelijk enkel mogelijk in de volgende omstandigheden:

- Tijdens de meting zijn zware bewolking ($\Delta \theta_{hemel} > \theta_e 5$ °C) en windsnelheden tot 1 à 2 m/s vereist. Ook de uren voor de meting moeten deze condities aanwezig zijn. Voor de verschillende wandtypes geldt:
 - 4 uur voor houtskeletwanden en een massieve wand met buitenisolatie
 - 13 uur voor een halve en volledig gevulde spouwmuur
 - 17 uur voor een lege spouwmuur (of indien niet geweten is of de spouw geïsoleerd is)
 - 36 uur voor een massieve wand met binnenisolatie
- Indien bijvoorbeeld na een heldere nacht met weinig wind wordt gemeten, zijn de wachttijden vanaf het opkomen van zware bewolking:
 - 2 uur voor houtskeletwanden en een massieve wand met buitenisolatie
 - 6 uur voor volledige, half gevulde en lege spouwmuren
 - $\circ\quad 20\ uur\ voor\ een\ massieve\ wand\ met\ binnenisolatie$
- De windsnelheid voor en tijdens de meting is beperkt tot 1 m/s. Na het opkomen van de wind kan nog maximaal 1 uur doorgemeten worden op alle types wanden.
- Het vochtgehalte moet gemeten worden. De emissiviteit mag niet aangetast zijn door vochtplekken of stilstaand water
- De binnen- en buitentemperatuur mogen maximum 1 °C per uur wijzigen om nog één uur te kunnen doormeten. Voor thermisch zware wanden zoals de massieve wand met binnenisolatie mag de temperatuurgradiënt slechts 2 °C bedragen.
- Het temperatuurverschil tussen binnen en buiten moet minimum 15 °C bedragen om een voldoend nauwkeurige U-waarde te bepalen.

In hoofdstuk 4 komen nog andere aspecten aan bod die de berekening van de thermische prestaties op basis van oppervlaktetemperaturen kunnen beïnvloeden, zoals de binnenen buitentemperatuur en de overgangscoëfficiënten aan het oppervlak.

2.2 Voor de optimale zichtbaarheid van gebreken

Voor metingen gericht op het opsporen van gebreken, zijn we niet zozeer geïnteresseerd in de thermische "correctheid" van de beelden, maar louter in het zichtbaar maken van een koudebrug of luchtholtes. Om deze reden zouden de richtlijnen uit de literatuur mogelijks versoepeld kunnen worden.

Ter illustratie: richtlijnen uit NBN 13187 (25) (26), *ASTM C1060-11a* (21) *en TeCH* (33) *voor het opsporen van isolatiegebreken voor een volledig gevulde spouwmuur:*

- Zon: Geen directe blootstelling tijdens en tot 24 uur voor meting (26)
- Hemelkoepel: Bij zwaar bewolkt weer (33)
- Wind: begrenzing tot 2,7 m/s (21)
- Temperatuursverandering:
 - ο $\Delta \theta_e < 10$ °C 24u voor en < 5 °C tijdens de meting (25) (26)
 - $\Delta \theta_i < 2$ °C tijdens de meting (25) (26)
 - $\circ \Delta \theta_e < 5 \text{ °C tijdens de meting (25) (26)}$
- Temperatuurverschil: θ_i-θ_e> 5°C vanaf 24 uur voor de meting (25) (26)

Naast de invloed van omgevingsfactoren, is de zichtbaarheid van een schadegeval ook afhankelijk van:

• De NETD van een IR-camera:

De Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) is het minimale verschil in temperatuur dat een signaal produceert dat groter is dan de standaardafwijking van het systeem (8) (41). Dit is dus het kleinste signaal dat een IR-sensor kan opvangen en is uiteraard afhankelijk van het type camera. Voor zeer nauwkeurige camera's is dit typisch 0,045 °C bij 30 °C. We nemen deze waarde aan als het minimale temperatuurverschil waarbij een isolatiegebrek nog detecteerbaar is.

- Grootte en vorm van het schadegeval: Een geometrische vorm is veel gemakkelijker te herkennen als koudebrug dan de grillige aftekening van een luchtholte in een spouw.
- De lens, IR-resolutie en afstand camera-object:
- 43

De werkelijke oppervlaktetemperaturen worden uitgemiddeld over 1 pixel op het IR-beeld. Hoe groter de meetafstand en de beeldhoek van de lens en hoe kleiner de IR-resolutie, hoe groter het oppervlak dat 1 pixel beslaat en dus hoe meer de oppervlaktetemperatuur uitgemiddeld wordt (9). Kleine schadegevallen zijn dan minder zichtbaar. Meer informatie over lensgebruik en IR-resolutie vindt u in §3 van dit hoofdstuk.

- De bepaling van de emissiviteit en gereflecteerde temperatuur: de camera berekent de oppervlaktetemperaturen a.d.h.v. de ingevoerde emissiviteit en gereflecteerde temperatuur (zie Hoofdstuk 1 §3.3). De emissiviteit kan beïnvloed worden door verschillende oppervlaktefenomenen, zoals bv. mos en verdamping na regen die schadefenomenen kunnen verdoezelen.
- De temperatuurschaal: tijdens de meting kan de minimum- en maximumtemperatuur aangeven worden. Alle temperaturen binnen deze waarden worden dan afgebeeld. Hoe kleiner de temperatuurschaal, hoe duidelijker kleine temperatuurverschillen afgebeeld worden.

Via simulatie van de bezonning, straling van de hemelkoepel en wind, kan dus hoogstens aangegeven worden:

- wanneer het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen een intact deel en isolatiegebrek kleiner wordt dan de NETD, waardoor het schadefenomeen niet meer zichtbaar is.
- welke weersomstandigheden de zichtbaarheid bevorderen/afzwakken.

Voor deze simulaties werden dezelfde parameters als de studie in §2.1 gebruikt. Er werd een volledig gevulde spouwmuur gemodelleerd met een luchtholte of een koudebrug. Het buitenoppervlak van de wand is georiënteerd naar het zuiden. Het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen het oppervlak aan het defect en aan het intact deel werd vergeleken, zowel aan het buiten- als het binnenoppervlak.



Figuur 13 Nagevulde spouw met (a) Luchtholte van 15 x 15 cm met spouw van 5 cm. (b) Koudebrug met oppervlakte 15 x 15 cm en een spouw van 12 cm breed.

In hoofdstuk 3 komen nog andere aspecten aan bod die de zichtbaarheid van isolatiegebreken kunnen beïnvloeden, zoals locatie van het gebrek, de meetafstand- en richting, de thermische effusiviteit en de staat van het meetoppervlak.

2.2.1 Detecteerbaarheid

Buitenmeting

Het ene schadegeval zorgt voor grotere verschillen in de oppervlaktetemperatuur dan het andere. Zo is het verschil tussen de oppervlaktetemperatuur aan een luchtholte in de spouw en de oppervlaktetemperatuur aan een intact gedeelte zeer beperkt. Bij uitgevoerde bedroeg de simulatie het maximale temperatuurverschil 0,8°C, met θ_i - θ_e > 10 °C en een spouwbreedte van 5 cm. In de simulaties met een spouwbreedte van 10 cm werd oppervlaktetemperatuurverschil het maximale 1,1 °C. In werkelijkheid zien we dat het ook telkens om zeer kleine temperatuurverschillen gaat (zie Hoofdstuk 3).

Wegens de beperkte temperatuurverschillen zal de detecteerbaarheid van luchtholtes hoofdzakelijk afhangen van de lens, IR-resolutie van de camera, meetafstand en de staat van de wand waarop gemeten wordt (zie Hoofdstuk 2 §3). Voor luchtholtes adviseren we om met een hoge resolutie, kleine lenshoek of beperkte meetafstand te werken. Bovendien zijn er ook andere effecten (vochtgehalte, variatie in emissiviteit op de steen, convectie aan buitenoppervlak, spouwhaken...) die kunnen zorgen voor kleine temperatuurvariaties aan de buitenzijde. Bij zeer kleine temperatuurverschillen is het dus niet evident om sluitende conclusies te trekken met betrekking tot eventuele luchtholtes die aanwezig zouden zijn.

Bij de koudebrug zijn de temperatuurverschillen tussen het oppervlak aan de koudebrug en een intact gedeelte groter. Dit komt natuurlijk doordat de koudebrug tot tegen het binnenoppervlak komt en daardoor meer beïnvloed wordt door de binnentemperatuur dan de luchtholte. In het simulatiemodel, met een spouw van 12 cm en θ_i - $\theta_e > 10$ °C, was het oppervlak aan de koudebrug maximaal 3,5 °C warmer dan aan een intact deel. **Rekening gehouden met de typische grootte en geometrische** vorm van een koudebrug, zouden ze gemakkelijk te detecteren zijn bij eender welke bewolkingsgraad of windsnelheid, zolang de invloed van de zonnestraling vermeden wordt.

Binnenmeting

Isolatiegebreken zullen over het algemeen minder zichtbaar zijn aan de binnenzijde van de wand. Enerzijds kan de zichtbaarheid verhinderd zijn door bijvoorbeeld meubels die voor de wand opgesteld staan, anderzijds is dit ook afhankelijk van de positie van het schadegeval t.o.v. het binnen- en buitenspouwblad. Bij luchtholtes wordt het effect op de binnenoppervlaktetemperatuur afgeremd door het binnenspouwblad, dat doorgaans een grotere dikte heeft dan het buitenspouwblad. Ook aan de binnenzijde is het dus niet evident om luchtholtes in isolatie op te sporen.

Koudebruggen zijn echter wel goed zichtbaar aan het binnenoppervlak, omdat deze doorgaans doorlopen tot vlak bij het binnenoppervlak van de wand.

2.2.2 Zonnestraling

Buitenmeting

Isolatiegebreken worden het duidelijkst zichtbaar wanneer er geen invloed van de zon is. Door haar aanwezigheid warmt het gehele oppervlak immers op, maar de zone aan het isolatiegebrek kan trager of sneller opwarmen en afkoelen. Actieve thermografie maakt gebruik van dit verschil in opwarmen en afkoelen (Zie hoofdstuk 6). Maar let op: indien de zon reeds te lang aanwezig is

Hoofdstuk 2: Richtlijnen voor betrouwbare metingen 46

voor de metingen plaatsvinden, kan het temperatuurverschil naar nul herleid worden, waardoor het gebrek onzichtbaar wordt (Figuur 14).

Ter illustratie: impact van de zon in de simulatie

In deze simulatie verdween het verschil tussen de oppervlaktetemperatuur aan de simulatiegebreken en aan het intacte deel van de wand onmiddellijk na het moment met maximale zonnestraling. Eens de zon weer verdween, was de oppervlaktetemperatuur lager aan het isolatiegebrek dan aan de wand. Na 12 uur was de buitenoppervlaktetemperatuur aan de isolatiegebreken opnieuw hoger.



Figuur 14 Vergelijking oppervlaktetemperaturen bij maximale zonnestraling (I = 11400 kJ/m^2), heldere hemel en geen wind. (a) Gevulde spouwmuur met luchtholte (b) Gevulde spouwmuur met koudebrug

Onder invloed van de zon warmen de oppervlaktes ter hoogte van een isolatiegebrek en een intact deel op aan een verschillend tempo. In tegenstelling tot bij vocht- en luchtinsluitsels, heeft het oppervlak aan een koudebrug of aan ontbrekende isolatie in een 47 spouw een hogere temperatuur in statische omstandigheden. Door de zonnestraling kan het oppervlak aan het geïsoleerde deel dit verschil "inhalen". Hierdoor kan het verschil in oppervlaktetemperatuur verkleinen waardoor isolatiegebreken op termijn niet meer zichtbaar zijn. Om te vermijden dat de thermografische inspectie verstoord wordt door de zonnestraling, moeten wachttijden geformuleerd worden tot de impact van de zon op het hele oppervlak van de wand verdwenen is.

Aan de andere kant is het voor de detectie van koudebruggen niet nodig om de meest nauwkeurige meetwaarden (± 0,5 °C) na te streven. In tegenstelling tot bij metingen voor de inschatting van thermische prestaties. dienen de metingen enkel om schadegevallen zichtbaar te maken. De meetwaarden worden niet verder gebruikt voor berekeningen van de U- of R-waarde. Bijgevolg kunnen wachttijden geformuleerd worden waarbij wordt gekeken op welke termijn de impact van de zonnestraling op de buitenoppervlaktetemperatuur kleiner is dan 2 °C. Die 2 °C is de absolute meetfout van de meeste IR-camera's op de markt. De wachttijden in Tabel 14 gaan in na het verdwijnen van de zon (bijvoorbeeld bij bewolking of bij zonsondergang) en gelden voor een zuidgeoriënteerde wand.

Tabel 14 Wachttijden voor een zuidgeoriënteerde wand na het verdwijnen van de zonnestraling vooraleer een IR-meting kan plaatsvinden om gebouwgebreken op te sporen

Zon (kJ/m²)	Hout- skelet	Massief binnen- isolatie	Massief buiten- isolatie	Volledig gevulde spouw muur	Niet gevulde spouw muur	Deels gevulde spouw muur
11400	0 – 1,5u	10 – 17u	0 – 1,2u	3,5 - 7u	2 – 6,5u	3,5 – 7u
8400	0 – 1u	8 - 13u	0- 1u	2 – 6u	0,2 –5u	2 – 6u
5600	0u	2,5 – 9u	0 – 0,7u	0 - 4,5u	0 – 3,5u	0 – 4,5u
2750	0u	0 – 1u	0 – 0,2u	0 – 2u	0 – 0,5u	0 - 2u
(geen zon)	0u	0- 0,2 u	0- 0,4u	0- 1u	0- 0,2u	0-1u

Voorbeeld 1: Na een dag met veel zon, heldere hemel en hoge windsnelheden (> 8 m/s)....

...moet het maximum 17 uur zwaar bewolkt zijn met een windsnelheid tot 2 m/s voor massieve wanden met binnenisolatie, vooraleer de oppervlaktetemperatuur van de wand minder dan 2 °C afwijkt van de statische toestand en koudebruggen zeker zichtbaar zijn.

Bij een houtskeletwand moet de zware bewolking en lage windsnelheid 1,5 uur aan de metingen voorafgaan.

Voorbeeld 2: Na een nacht/ochtend met weinig zon, heldere hemel en hoge windsnelheden (> 8 m/s)....

...moeten er 12 minuten (0,2 uur) verstrijken met zware bewolking en lage windsnelheden vooraleer de oppervlaktetemperatuur minder dan 2 °C afwijkt van de statische toestand en koudebruggen zeker zichtbaar zijn bij een massieve wand met binnenisolatie. Bij een houtskeletwand kan de inspectie onmiddellijk beginnen van zodra de zon verdwijnt.

Voor de andere oriëntaties geldt:

- Op de noordgevel kan de ganse dag doorgemeten worden, op elke type wand
- Op de oostgevel moet er:
 - 4 uur na de bezonning gewacht worden vooraleer op een wand met een kleine thermische massa kan gemeten worden
 - Voor de andere types moet gewacht worden tot zonsondergang
- Op de westgevel gelden dezelfde wachttijden als voor een zuidgeoriënteerde wand, aangezien de stralingsintensiteit op westgeoriënteerde wanden gelijkaardig is aan deze op zuidgeoriënteerde wanden.

Binnenmeting

Indien er zonnestraling inwerkt op de wand met een isolatiedefect, worden de temperatuurverschillen aan de binnenkant kleiner en mogelijk tot 0 herleid. Door de thermische massa van de wanden wordt het maximum van de temperatuursverandering langs de binnenzijde later bereikt dan het maximum van de temperatuursverandering van langs de buitenzijde, ook wel faseverschuiving genoemd. Nadat er zon begint te schijnen op de buitenkant, zou er nog een bepaalde tijd (Tabel 15) kunnen doorgemeten worden aan de binnenkant. Na het verstrijken van deze tijdspanne, zouden de diezelfde tijdspannes uit Tabel 15 bij de wachttijden uit Tabel 14 opgeteld moeten worden.

Tabel 15 Faseverschuiving tussen het maximum van binnen- en buitentemperatuur (in minuten). Deze tijdspannes moeten bij de wachttijden uit tabel 14 opgeteld worden om de wachttijden voor inspecties aan de binnenzijde te bekomen.

Hout- skelet	Massiefwand met binnenisolatie	Massiefwand met buitenisolatie	Deels gevulde spouwmuur	Volledig gevulde spouwmuur	Niet geïsoleerde spouwmuur
+210'	+380'	+400'	+890'	+860'	+600'

2.2.3 Langegolfstraling naar de hemelkoepel

Uit de simulaties blijkt dat de langegolfstraling naar de hemelkoepel geen significante invloed heeft op de zichtbaarheid van schadegevallen. Zo werd de luchtholte in een spouw van 5 cm het duidelijkst afgetekend bij heldere hemel, maar het verschil $\theta_{se,holte}$ - $\theta_{se,intact}$ was in deze simulatie amper 0,2°C groter vergeleken met het verschil bij zwaar bewolkt weer. (Figuur 15).

De koudebrug zal iets duidelijk zichtbaar zijn vlak na de opklaring. Dit komt omdat het oppervlak aan de koudebrug trager afkoelt dan het intacte deel met isolatie. Daardoor wordt het verschil tussen het warmere oppervlak aan de koudebrug en het koelere oppervlak aan de isolatie groter bij helder weer.



Figuur 15 Vergelijking oppervlaktetemperaturen bij heldere hemel en volledige bewolking. In beide simulaties was er geen zonnestraling en geen wind. (a) Gevulde spouwmuur met luchtholte (b) Gevulde spouwmuur met koudebrug

2.2.4 Invloed windsnelheid

Hoe lager de windsnelheid, hoe duidelijker het isolatiegebrek afgetekend wordt. In de simulatie met de luchtholte, was het verschil in temperatuur tussen het buitenoppervlak aan de luchtholte en aan een intact deel 0,5 °C bij helder, windstil weer zonder zonneschijn. Met een windsnelheid van 4 m/s daalde het temperatuurverschil naar 0,2 °C.

Wind heeft ook impact op de aftekening van een koudebrug op het buitenoppervlak. Bij lagere windsnelheden is een koudebrug het duidelijkst zichtbaar. Het verschil $\theta_{se,koudebrug}$ - $\theta_{se,intact}$ steeg naar 1,5 °C in de simulaties. Bij een wind van 4 m/s daalde dit temperatuurverschil naar 0,7 °C (Figuur 16). Hoe lager de windsnelheid, hoe groter het verschil in oppervlaktetemperatuur.



Figuur 16 Vergelijking oppervlaktetemperaturen bij een windsnelheid van 0 m/s en 4 m/s. In beide simulaties was er geen zonnestraling en was de hemel volledig bewolkt. (a) Gevulde spouwmuur met luchtholte (b) Gevulde spouwmuur met koudebrug

2.2.5 Samenvatting: richtlijnen voor de optimale zichtbaarheid van isolatiegebreken

Isolatiegebreken worden het best zichtbaar in de volgende omstandigheden:

- Geen zon tijdens de meting.
- In geval van maximale zonnestraling, zou:
 - \circ 1,5 uur gewacht moeten worden voor een houtskeletwand
 - 7 uur voor een na-geïsoleerde spouwmuur
 - 17 uur voor een massieve wand.
- Bij helder weer, hoewel de bewolkingsgraad geen significante impact heeft. Langegolfstraling naar de hemelkoepel is minder belangrijk.
- In windstil weer, hoewel het gebrek nog steeds zichtbaar is bij hoge windsnelheden (7 m/s) maar het oppervlaktetemperatuurverschil tussen het isolatiegebrek en intact deel zal kleiner zijn.

Voor luchtholtes wordt een kleine lenshoek en hoge IR-resolutie geadviseerd om een scherpere aftekening te bekomen, maar ook dan blijkt het absoluut niet evident om gebreken ondubbelzinnig te bepalen.

In hoofdstuk 3 komen nog andere aspecten aan bod die de zichtbaarheid van isolatiegebreken kunnen beïnvloeden, zoals locatie van het gebrek, de meetafstand- en richting, de thermische effusiviteit en de staat van het meetoppervlak.

3 Invloedsfactoren bij een IR-camera

Een thermografische camera lijkt op het eerste zicht op een gewone camera. In plaats van zichtbaar licht wordt de infraroodstraling opgevangen en omgerekend naar een matrix van temperaturen. Het grote verschil is echter dat een thermografische camera een meettoestel is. De meetnauwkeurigheid van de af te lezen temperatuur zal dus afhankelijk zijn van de eigenschappen van de lens, de IR-resolutie en de kalibratie van het toestel.

3.1 Over lenzen en resolutie

3.1.1 De lens: Field of View (FOV)

De *Field of View* of het gezichtsveld van de lens, wordt gedefinieerd door de horizontale en verticale beeldhoek. Alle objecten binnen dit bereik worden opgenomen in het beeld. Wanneer de camera bijvoorbeeld op 10 m van een gebouw staat, zal een lens met horizontale beeldhoek van 45° een gebied van 8,2 m breed capteren. Een lens met een beeldhoek van 25°C zal slechts een gebied van 4,4 m breed in beeld brengen (Figuur 17 en Figuur 18).



Figuur 17 Principe tekening Field of View [38].



Figuur 18 Demonstratie van lenzen met een verschillende brandpuntsafstand. Hoe kleiner de brandpuntsafstand van de lens, hoe meer objecten van het gebouw in beeld gebracht kunnen worden. (a) IR-beeld genomen met een lens met beeldhoek 45° x 33,8°. (b) IR-beeld, genomen met een lens met beeldhoek 25° x 19°. Beide beelden werden op 10 m afstand van het gebouw genomen.

3.1.1 Pixel en resolutie

Net als iedere gewone camera, hebben ook IR-camera's een bepaalde resolutie. De resolutie geeft het aantal pixels aan in de lengte en in de breedte waaruit het temperatuurbeeld is samengesteld. Per pixel wordt één temperatuurwaarde weergegeven. Hoe hoger de resolutie, hoe scherper het beeld en dus hoe meer oppervlaktetemperaturen binnen het beeld. Hoe lager de resolutie, hoe groter het gebied per pixel en dus hoe meer de oppervlaktemperatuur uitgemiddeld wordt om één pixel te vormen [8].



Figuur 19. (a) Beeld genomen met een IR-camera met 640x480 en lens met FOV = $25^{\circ} \times 19^{\circ}$. (b) Beeld genomen met een IR camera met 320x240 en lens met FOV = $25^{\circ} \times 19^{\circ}$. De contouren van de zwarte tape en de temperatuursensor zijn vele minder scherp op het rechter beeld, met een kleinere resolutie. Beide beelden werden op ongeveer 4 m afstand genomen.

Eens de resolutie van de camera en het lenstype gekend is, kan uitgerekend worden welk gebied 1 pixel beslaat. Dit wordt ook wel het kleinst detecteerbare object genoemd.

Voorbeeld:

Een IR-camera met resolutie 320x240 en lens met FOV = $25^{\circ} x$ 19°, tegenover IR-camera met resolutie 640x480 hetzelfde type lens. Afstand camera-object: 5 meter.

De eigenschappen van het IR-beeld worden:

- Horizontaal bereik: tan(25°/2). 5 m . 2 = 2217 mm
- Verticaal bereik: tan(19°/2). 5 m .2 = 1673 mm
- Met resolutie 320 x 240: 1 pixel = 6.39 mm x 6.97 mm
- Met resolutie 640 x 480: 1 pixel = 3.46 mm x 3.49 mm

Uit bovenstaand voorbeeld wordt duidelijk dat in geval de resolutie 640 x 480 bedraagt, de nauwkeurigheid verdubbelt. Indien met een lens met FOV =45° x 33,8° gewerkt wordt, zal de nauwkeurigheid verkleinen. Met resolutie 320 x 240 op 5 meter afstand zal de pixel een gebied van 12,94 mm bij 12,65 mm innemen. M.a.w. een gebied van 12,94 mm bij 12,65 mm zal één en dezelfde oppervlaktetemperatuur krijgen op het beeld. Bijgevolg zullen bij een bredere lenshoek de randen van een zone ter hoogte van een schadefenomeen meer beïnvloed worden door de omliggende zone (Figuur 20 en Figuur 21).



Figuur 20 Gewone foto van een emissiviteitstape (ϵ =0,93) op glas Foto van het raam met witte tape (lengte 15 cm, ϵ =0,93) en ALU-folie (lengte 32 cm). Noordelijke oriëntatie



Figuur 21. (a) Beelden met 320 x 240 resolutie en lens met FOV= 45°x33,8°, $\varepsilon = 0.93$ en $\theta_{refl} = 16,1°C$. De witte tape is 11 pixels breed op het IR-beeld (Ar1) (b): Beelden met 320 x 240 resolutie en lens met FOV = 25°x19°, ε =0.93 en $\theta_{refl} = 16,2°C$. De witte tape is 21 pixels breed op het IR-beeld (Ar1). Op (a) zijn de contouren veel minder duidelijk dan op (b), waardoor er gemiddeld hogere temperaturen gemeten worden die deels van rondom de tape afkomstig zijn. Daarnaast stond de camera iets meer naar links gepositioneerd bij (a), waardoor de reflectie op het glas rondom te tape verschilt. De reflectie op het glas rondom de tape net glas rondom de tape verschilt.

3.1.2 Instantaneous Field Of View (IFOV)

De *Instantaneous Field of View* (IFOV) is een maat voor de ruimtelijke resolutie en wordt gedefinieerd als de zichthoek (mrad) van één enkele detector (4) (12). Dit kan berekend worden

vanuit de FOV van een lens en de resolutie van de camera. De FOV en IFOV zijn als volgt gerelateerd (8):

$$IFOV = \frac{VFOV}{\#vs} = \frac{HFOV}{\#hs}$$
[9]

Waarbij VFOV en HFOV respectievelijk de verticaal en horizontaal gemeten lengte van het gezichtsveld van de camera voorstelt. #vs en #hs zijn respectievelijk het aantal verticale en horizontale sensoren van de camera (31).

3.1.3 Noise Equivalent Temperature Difference (NETD)

De NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) is het minimale verschil in temperatuur dat nodig is om een signaal te produceren dat groter is dan de standaardafwijking van het systeem (8) (41). Pas als het signaal groter is dan deze standaardafwijking, wordt het beschouwd als een ander signaal. Dit is m.a.w. het kleinste signaal dat een detector kan opvangen en wordt ook wel de thermische resolutie genoemd. De NETD wordt meestal opgegeven voor een bepaald temperatuurbereik: voor gebouwthermografie wordt NETD-waarde van maximum 0,05 – 0,08°C aangeraden (4) (31).

3.2 Richtlijnen i.v.m. camera, lensgebruik en resolutie

Naast de gewenste nauwkeurigheid, is de keuze van resolutie en lens ook afhankelijk van budget en type meetomgeving. Algemeen geldt:

- Hoe hoger de resolutie, hoe hoger de nauwkeurigheid;
- Hoe kleiner de beeldhoek van de lens, hoe hoger de nauwkeurigheid.

Hoe kleiner de meetafstand in de meetomgeving bij grote objecten, hoe groter de beeldhoek en resolutie nodig.

Thermografie kent verschillende toepassingen en dus kan de gewenste nauwkeurigheid verschillen. Voor detectie van grote schadegevallen, zoals koudebruggen en luchtlekken, zal een resolutie van 320×240 zeker volstaan. Meestal zijn dergelijke camera's voorzien van een standaardlens met 25° horizontale

beeldhoek. Op 1 meter afstand zal een pixel dan een gebied van 1,38 mm x 1,38 mm beslaan.

Het gebruik van een bepaalde beeldhoek is afhankelijk van de situatie. Een lens met een grotere beeldhoek (45°) is handig voor controles van grote gebouwen in een stedelijke omgeving. Daar is dikwijls niet genoeg ruimte om een gebouw volledig op het beeld te krijgen met een standaardlens. Indien een schadegeval een verdere inspectie vraagt, kan overgeschakeld worden op een lens met een beeldhoek van 25° voor nauwkeurigere beelden. Met een 25° beeldhoek beslaan de pixels een gebied dat 4 keer kleiner is beeldhoek 45° lens. dan met een De werkeliike oppervlaktetemperaturen zullen dan 4 keer minder uitgemiddeld worden over 1 pixel.

Voor kleinere schadegevallen, zoals kleine luchtlekken, kleine holtes in een spouw, kan het interessant zijn om over te stappen naar een lens met een kleinere beeldhoek of een grotere resolutie, indien niet dicht bij het object gemeten kan worden en een lens met grote beeldhoek noodzakelijk is. Hetzelfde geldt voor metingen waarbij de thermische prestaties bepaald worden van een heterogene constructie, zoals een houtskeletwand.

Ter illustratie: 1 IR-pixel vs. 1 temperatuursensor

Wanneer gemeten wordt op 4 meter afstand, met een IR- resolutie van 320 x 240 en een les met FOV van $25^{\circ}x 19^{\circ}$, vertegenwoordigt één pixel een oppervlak van 5 x 5 mm op de constructie. Dit is minstens even nauwkeurig als een temperatuursensor, die doorgaans een oppervlak van ongeveer 10 x 10 mm hebben.

Ter info

In het onderzoek werd gebruik gemaakt van een lens met FOV 25°x19° en twee IR-resoluties van 640x480 en 320x240.

3.3 Kalibratie van de meting

3.3.1 Automatisch en handmatig kalibreren

Tijdens gebruik maakt de IR-camera regelmatig een 'klik'-geluid. Dit geluid wordt veroorzaakt door een plaatje met een uniforme 57 temperatuur dat tussen de lens en de sensoren gebracht wordt. Hiermee wordt de afwijking tussen de sensoren onderling gecorrigeerd waardoor de camera gekalibreerd is. De uitlezing door de sensor is immers ook afhankelijk van de temperatuur van de sensor zelf. Na kalibratie ziet het IR-beeld er iets uniformer uit (zoals op Figuur 22). De camera doet dit regelmatig automatisch, maar het is echter ook mogelijk om met een knop op de camera de kalibratie in werking te stellen.

Als men een IR- camera dus van een warme plek naar de koude buitenomgeving brengt zal de temperatuur van de sensor ook veranderen. De sensoren aan de rand zullen sneller opwarmen of afkoelen dan die in het midden. Bijgevolg kunnen er dus kleine afwijkingen ontstaan tussen de sensoren onderling. De kallibratie met het plaatje werkt deze onderlinge verschillen weg, maar verhoogt niet de absolute nauwkeurigheid van de IR-camera.

Wanneer gemeten wordt in zeer hoge (40 °C) of zeer lage temperaturen, is het van belang om de camera handmatig te kalibreren voor een IR-beeld gecapteerd wordt. Het is immers mogelijk dat de interne temperatuur van de camera nog niet aangepast is aan de (extreme) omgevingstemperatuur. Indien de tijd genomen wordt om de camera te laten aanpassen aan de omgevingstemperatuur, blijven de beelden langer betrouwbaar zonder kalibratie. Indien niet handmatig gekalibreerd wordt, is het mogelijk dat er zich een cirkelvormige aftekening vormt (Figuur 22) (42).



Figuur 22 Foto om de 2 minuten. Cirkelvormige aftekening merkbaar na 27 minuten, op dat moment kalibreert de camera automatisch. Vermijden door voor elke foto de camera handmatig te kalibreren en zo fouten in de thermografische beelden uit te sluiten (42).

3.3.2 In situ kalibratie met onafhankelijk instrument

Voor toepassingen waarbij de IR-meting dient om de thermische gebouwen prestatie van in te schatten, volstaat een nauwkeurigheid van ± 2 °C niet. Indien het mogelijk is om de camera onder gecontroleerde omstandigheden te gebruiken, is het mogelijk om de absolute nauwkeurigheid van een meting op te 0,5 °C drijven (37).Helaas zijn gecontroleerde naar omstandigheden niet altijd mogelijk in de praktijk. Daarom werd door het Industrial Design Centre van de UGent een toestel ontwikkeld waarmee de meetnauwkeurigheid van een IR-camera tijdens de meting gecontroleerd kan worden. Daarnaast wordt de omgevingstemperatuur en windsnelheid gemeten. Figuur 23 geeft alle functionaliteiten weer.



Figuur 23 Opstelling kofferunit, ontwikkeld in het Industrial Design Centre in Kortrijk, Universiteit Gent

- 1. Spiegelende halve bol: Hiermee kunnen stralingsbronnen achter de camera in beeld gebracht worden.
- 2. (a) display voor de windsnelheid in m/s. (b) Anemometer
- 3. (a) display voor de omgevingstemperatuur. (b)Sensoren waarmee de omgevingstemperatuur tot 0,2°C wordt gemeten.
- 4. Displays voor Peltier-elementen met rechts de Peltierelementen zelf (witte plaatjes op Figuur 23). Met de bovenste display geeft de temperatuur weer van het witte plaatje (Peltier-element) ernaast. Hiermee kan een maximum temperatuur ingesteld worden, met de onderste display een minimum temperatuur. Met deze elementen kan bijvoorbeeld de temperatuurschaal van het IR-beeld gecontroleerd worden (Figuur 24).
- Display met algemene informatie. Het scherm wordt groen wanneer de meetomstandigheden (omgevingstemperatuur, windsnelheid) gunstig zijn voor kwantitatieve thermografie. Wanneer bijvoorbeeld de windsnelheid te groot wordt, wordt het scherm rood.

6. Verkreukelde aluminiumfolie om de gereflecteerde omgevingstemperatuur te bepalen.



Figuur 24 De temperatuur van de Peltier-elementen kan zo ingesteld worden dat de temperatuurschaal van een beeld op voorhand vastligt.

4 Meten: Welke stappen moeten overlopen worden?

Er zijn globaal 4 stappen die bij elk type thermografische meting moeten doorlopen worden:

- 1. Plaatsing van aluminiumfolie en emissiviteitstape ter plaatse van de op te meten objecten
- 2. Meetpositie bepalen
- 3. Opmeten van de invloedrijke binnen- en buitenparameters + tijdstip:
 - a. Buiten- en binnentemperatuur
 - b. Relatieve vochtigheid buiten en binnen
 - c. Windsnelheid, bewolking, zonneschijn, oriëntatie, aantal uur na neerslag (buiten) op het moment van de meting en de historiek tot drie dagen voor de meting
 - d. Afstand camera-object
 - e. Emissiviteit en gereflecteerde temperatuur

- f. Vochtgehalte indien de metingen dienen voor het inschatten van thermische prestaties
- 4. Instellen en bedienen camera
 - a. Kiezen van de juiste lens aangepast aan de toepassing
 - b. Scherpstellen met het scherm op grijswaarden. Met deze weergave zijn de vormen doorgaans het minst scherp afgelijnd. Met een duidelijk scherp beeld in grijswaarden, zijn de oppervlaktetemperaturen in iedere weergave het scherpst afgelijnd.
 - c. Emissiviteit en gereflecteerde omgevingstemperatuur instellen
 - De camera een kwartier laten klimatiseren indien de camera verplaatst werd naar een ruimte met een andere temperatuur dan de bewaartemperatuur. Dit is belangrijk voor de correctheid van de eerste beelden en de kalibratie.
 - e. Tijdens de meting kan handmatig gekalibreerd worden. Dit is aan te raden indien patronen op het scherm gevormd worden die onverklaarbaar zijn, zoals de cirkelvormige aftekening op Figuur 22.

5 Verwerking: Wat moet er in een verslag?

In Tabel 16 wordt weergegeven welke gegevens nodig zijn in een thermografisch rapport volgens de verschillende normdocumenten. In de laatste kolom is een overzicht gegeven van de parameters die uit het literatuuronderzoek naar voor komen als onmisbare gegevens voor het thermografieverslag.

Tabel 16 Samenvattende tabel betreffende richtlijnen voor rapportage in normatieve documenten

NORM	The CH (2010) (33)	ASTM C1060 (2011) (21)	NBN/BS EN 13187 (25) (26)	RESNET	Conclusie literatuur- studie
ALGEMEEN		-			
Opdrachtgever	Х		Х		
Gegevens object (adres, type gebouw,)	Х	Х	Х		Х
Situatieplan met oriëntatie	X, indien beschik- baar	X, indien beschik- baar	X, indien beschik- baar		Х
Opmerkingen over constructie (vocht, muuropbouw,)	X, indien beschik- baar	Х	Х	Х	Х
Bouwjaar (eventuele renovaties,)	X, indien beschik- baar				Х
Verwarmings- systeem	X, indien beschik- baar				Х
Naam thermograaf	Х	Х		Х	
Beschrijving van de opdracht (type test)	Х		Х		Х
Datum meting	Х				X
Deelnemers	Х	Х		Х	
thermograaf	Х		Х		
Beschrijving omgeving (oriëntatie, vegetatie, gebouwen, landschap,)		X, 1 foto per oriëntatie	Х	Х	X, op regelmatige tijdstippen
+Historiek weerdata					X, min 2 dagen
NORM	The CH (2010) (33)	ASTM C1060 (2011) (21)	NBN/BS EN 13187 (25) (26)	RESNET	Conclusie literatuur- studie
---	--------------------------	---------------------------------	--	--------	------------------------------------
CAMERA					
Merk	Х	Х	Х	Х	Х
Model	Х	Х	Х	Х	Х
Golflengte-bereik	Х				Х
Serienummer		Х	Х	Х	Х
Gebruikte lens				Х	Х
Geometrische resolutie	Х				Х
Datum laatste kalibratie	Х			Х	Х
Instellingen tijdens meting		Х			Х
PER FOTO/THERMO	GRAM				
Datum en uur van de metingen	Х	Х	Х	Х	Х
Kleur- temperatuurschaal	Х			Х	Х
Exacte beschrijving van plaats van opmeten	Х	Х	Х	Х	Х
Object- beschrijving	Х			Х	Х
Emissiviteit	Х				Х
Buiten- temperatuur			X, 24u voor en tijdens de meting	Х	Х
Binnen- temperatuur			Х	Х	Х
Temperatuurs- verschil binnen – buiten			х		Х
Relatieve vochtigheid binnen en buiten (voor τ _{atm)}				Х	Х

NORM	The CH (2010) (33)	ASTM C1060 (2011) (21)	NBN/BS EN 13187 (25) (26)	RESNET	Conclusie literatuur- studie
Gegevens van zonnestraling			X, 12u voor meting en tijdens meting	X, laatste 12u	Х
Gegevens neerslag en wind			X, tijdens de meting	X, laatste 24u	Х
Gewone foto ter verduidelijking		Х	Х	Х	Х
Aanduiding exacte locatie van gebreken		Х	Х	Х	Х
Resultaten van bijkomende metingen		Х	Х	X, (+ info kalibratie toestel)	X, IR in combinatie met andere technieken

Allereerst is een goede beschrijving van het gebouw noodzakelijk in het verslag. Hieruit zal de thermograaf immers een eerste idee kunnen vormen van de problemen die zich kunnen voordoen en bovendien zullen zij helpen bij de analyse van de meetresultaten. Aan de hand van een nauwkeurige gebouwbeschrijving kan de thermograaf afwijkingen in de oppervlaktetemperatuur gemakkelijker beschrijven en verklaren.

De historiek van de weerdata tot minimum 2 dagen voor de meting zou ook verplicht opgenomen moeten worden in een meetverslag. Uit de literatuurstudie en de simulaties volgt immers dat bepaalde weersomstandigheden tot 36 uur invloed kunnen uitoefenen op de oppervlaktetemperatuur van thermisch zware wanden. Ook tijdens de metingen moet op regelmatige tijdstippen notie genomen worden van de windsnelheid, het temperatuurverschil binnen-buiten, de temperatuurgradiënt, de zonnestraling en de straling van de hemelkoepel. Een minimumvereiste hierbij is om toch zeker een grootteorde van deze data te geven, zoals op Tabel 17.

Zonnestraling	-la
5	-Nee
	-Ja, met afwisselende bewolking
Windsnelheid	-Zachte bries
	-Windstil
	-Harde wind
Straling hemelkoepel	-Open hemel
	-Bewolkt (licht, hoog,)
Temperatuurverschil binnen-buiten	- < 5°C
	- 5 – 10°C
	- 10 – 15°C
	- 15 – 20°C
	- > 20°C
Temperatuurgradiënt	Aantal °C / u
Neerslag	-Ja
	-Nee

Tabel 17 Minimumvereisten voor opmeting van de weerdata tijdens de metingen

-Nee, maar wel vochtig oppervlak

Wanneer de thermografische metingen gebruikt worden om de thermische prestaties van gebouwcomponenten te bepalen, is het aangeraden om de binnen- en buitentemperatuur op zeer regelmatige tijdstippen te meten of te loggen. Daarnaast is het aangeraden om een notie te hebben van de grootte van de windsnelheid aan het oppervlak en het vochtgehalte van het oppervlak. Deze zijn naast de oppervlaktetemperaturen, bepalend voor de berekening van de U-waarde (zie hoofdstuk 4).

Daarnaast zou in het verslag ook kort aangegeven moeten worden hoe de emissiviteit en gereflecteerde temperatuur bepaald werd. In sommige gevallen blijft het oppervlaktemodificerend materiaal niet goed plakken (zoals tape op ruwe oppervlakken of op een bitumineuze dakafdichting) en moet deze parameter achteraf bepaald worden. In het verslag zou dus moeten aangegeven worden of de emissiviteit in-situ werd bepaald. Ten slotte zijn de specificaties van de camera ook uitermate belangrijk om een IR-beeld achteraf correct te kunnen interpreteren. Was de resolutie voldoende groot voor de toepassing? Welke lens werd gebruikt? Dit kan belangrijk zijn, aangezien bij een te kleine resolutie de temperatuurwaarden worden uitgemiddeld per pixel en bijgevolg een deel van het detail verloren kan gaan. Hiervoor is het uiteraard ook nodig om per foto de afstand tussen de camera en het object bij te houden. Met die gegevens kan de grootte van het oppervlak dat 1 pixel vertegenwoordigt ingeschat worden. Met het serienummer van de camera kan achterhaald worden of de camera tijdig gekalibreerd werd.

Wanneer met bovenstaande zaken rekening gehouden wordt, worden een groot aantal onduidelijkheden tijdens de analyse vermeden. Zo is de thermograaf in eerste instantie zeker dat weinig of geen informatie ontbreekt om een goede analyse mogelijk te maken.

KRACHTIGE WARMTEBEELDCAMERA **DIE GEWOON IN JE ZAK PAST**

7414

58.4

\$FLIR



DE FLIR C2 BRENGT VERBORGEN GEBREKEN AAN HET LICHT ZODAT U NIETS OVER HET HOOFD ZIET.

De C2 is de eerste volledig uitgeruste compacte warmtebeeldcamera ter wereld die u altijd bij de hand kunt houden om problematische warmtepatronen op te sporen.

Bekijk wat de C2 u kan laten zien op



Hoofdstuk 2: Richtlijnen voor betrouwbare metingen 68

Vocht vertelt je niet waar het zich schuilhoudt

Daarom hebben we iets extra's toegevoegd aan uw vochtmeter...



FLIR MR160 VOCHTMETER MET WARMTEBEELDCAMERA Met IGM Infrared Guided Measurement Exclusief bij FLIR

De FLIR MR160 is de enige vochtmeter die u kan laten zien waar het probleem gemeten moet worden.

Ontdek cold spots met de geïntegreerde warmtebeeldcamera met een beeldresolutie van 80x60 pixels om vochtplekken te lokaliseren. Controleer het vochtniveau met behulp van de pinvochtmeter en de pinloze vochtmeetfunctie. Bekijk warmtebeelden en vochtwaarden op één scherm en stel vervolgens rapporten op met de gratis FLIR Tools software.



FLIR The World's Sixth Sense

www.flir.com/mr160

Hoofdstuk 3: Isolatiegebreken

Het opsporen van koudebruggen en slecht geplaatste of ontbrekende isolatie zijn de meest courante toepassingen van thermografie op de gebouwschil. Dit type inspectie wordt toegepast winterperiode, doorgaans in de wanneer de binnentemperatuur beduidend hoger ligt dan de buitentemperatuur. Zonnestraling is de enige weersfactor die vermeden moet worden om koudebruggen duidelijk zichtbaar te maken op een IR-beeld (zie hoofdstuk 2, §2.2).

Uit IR-foto's kan heel wat informatie gewonnen worden over de aanwezigheid van koudebruggen in de gebouwschil. De interpretatie is echter niet steeds eenvoudig aangezien er met een aantal parameters rekening moet gehouden worden. Dit zijn o.a. de invloed van de spouw, de meetafstand en richting, de thermische effusiviteit, de staat en emissiviteit van het oppervlak en de impact van voorgaande weersomstandigheden. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op die specifieke elementen waar rekening mee gehouden moet worden bij de opmeting en analyse van IR-beelden met isolatiegebreken.

Opmerking: Context van controle op thermische gebreken

Na de oliecrisis van 1973 is er aandacht gekomen voor de warmteverliezen van gebouwen, maar de eerste normering in België is er pas gekomen in 1991 met het Vlaamse isolatiedecreet. In 2006 is er bij de invoering van de EPB-regelgeving ook een handhavingskader ontwikkeld, waardoor er een grotere controle kwam op de gerealiseerde gebouwen. Reeds in 1984 heeft het WTCB een technische voorlichting gepubliceerd over het belang detaillering bouwknopen van goede van een om oppervlaktecondensatie en schimmelvorming te vermijden. Sinds 2011 is er ook in de EPB-regelgeving een verplichting opgenomen bouwknopen expliciet in rekening te brengen. om De aanwezigheid van koudebruggen moet dus steeds gezien worden in het licht van de heersende bouwtradities en normatieve context.

1 Werkwijze

Bij het opsporen van isolatiegebreken met thermografie worden de richtlijnen uit hoofdstuk 2 §1 en §2 toegepast.

Benodigdheden

- IR-camera
- Emissiviteitstape
- Fototoestel
- Thermometer
- Anemometer
- Krijt

- Grondplannen
- Zilverpapier
- Meter
- Statief
- RV-meter

Voorafgaand onderzoek

- Opvragen van de bouwplannen
- Navraag doen naar materiaaleigenschappen en opbouw
- Navraag doen naar potentiële thermische gebreken
- Inschatten van de invloed van verwarmingstoestellen op de oppervlaktetemperatuur binnen en buiten
- Maken van eventuele afspraken omtrent het vrijmaken van wanden en opwarmen van de op te meten ruimtes
- Plaatsen van logger binnen voor de meting van binnentemperatuur en relatieve vochtigheid
- Opvolgen van weerdata van de voorafgaande dagen. Zonnestraling is de enige nefaste factor voor de zichtbaarheid van koudebruggen met thermografie. De lange-golf straling van de hemelkoepel heeft een zeer beperkte impact. Voor de windsnelheid geldt: Hoe lager de windsnelheid, hoe groter de oppervlaktetemperatuurverschillen.

Stappenplan

- 1. Plaatsing van aluminiumfolie en emissiviteitstape ter plaatse van de op te meten objecten
- 2. Meetpositie bepalen

- 3. Opmeten van de invloedrijke binnen- en buitenparameters + tijdstip (zie Tabel 17)
 - a. Binnen- en buitentemperatuur
 - b. Relatieve vochtigheid binnen en buiten
 - c. Windsnelheid (buiten)
 - d. Afstand camera-object
 - e. Emissiviteit en gereflecteerde temperatuur (zie hoofdstuk 2, §1.2 en §1.3)
 - f. Referentietemperatuur (aan de hand van representatief object in de directe meetomgeving)
- 4. Maken van een referentiefoto van een gelijkaardige plaats zonder defect
- 5. Opmeten van de plaats van het defect

Wanneer een thermografische inspectie gewenst is tijdens de bouwfase, kan het in sommige gevallen nodig zijn om eigenhandig een temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenomgeving te verwezenlijken door bijvoorbeeld gebruik te maken van een warmtestraler. In dergelijk geval wordt er over actieve thermografie gesproken (5)(zie Hoofdstuk 6).

Opmerking: emissiviteit

koudebruggen de Voor zijn vooral relatieve oppervlaktetemperatuurverschillen tussen componenten belangrijk. De exacte waarde van de oppervlaktetemperatuur is minder van belang. Voor alle relatieve metingen op de gebouwschil zou de emissiviteit dus evengoed op 1 ingesteld kunnen worden. De meeste bouwmaterialen hebben immers een emissiviteit hoger dan 0,90. Wanneer een emissiviteit lager dan 1 wordt gebruikt, worden de temperatuurverschillen tussen de pixels uitgemiddeld om tot een correctere absolute temperatuur te komen.

2 Aandachtspunten

Naast de weersomstandigheden (zie hoofdstuk 2 §2.2), zijn er ook een aantal aspecten, zoals locatie van het thermisch gebrek en de meetafstand en –richting, waar de thermograaf rekening mee moet houden tijdens de meting en de analyse. Deze punten worden geïllustreerd aan de hand van enkele toepassingsvoorbeelden.

In §2.5 wordt aan de hand van één casestudie op een plat dak met vacuüm isolatie panelen getoond hoe verschillende materiaaleigenschappen zoals de thermische effusiviteit en de kleur van het oppervlak de interpretatie van een IR-beeld complex maken.

2.1 Locatie t.o.v. luchtspouw

2.1.1 Op structurele plaatsen

De meest duidelijke koudebruggen zijn doorgaans structureel van aard. Ze komen voor aan de funderingsaanzet, aansluitingen tussen vloerplaat en wand, raamaansluitingen en deuropeningen. met Ook staalstructuren onvoldoende geïsoleerde stalen kolommen en balken vertonen op die plekken veelal koudebruggen. Bii houtskeletwanden ten slotte is de draagstructuur vaak duidelijk te zien aan het binnenoppervlak met thermografie. Bij houtskelet spreken we echter niet over een koudebrug. aangezien de bijhorende warmteverliezen niet bovenmatig zijn en er typisch geen risico is op oppervlaktecondensatie. Uiteraard kan er op deze plaatsen ook luchtlekkage optreden die impact heeft een op de oppervlaktetemperatuur. Om dit uit sluiten te is een luchtdichtheidstest in combinatie met thermografie aangewezen (zie hoofdstuk 5).

Praktijk: Typische koudebruggen bij massiefbouw

Op Figuur 25 is een koudebrug te zien aan de funderingsaanzet. Figuur 26 toont de hogere oppervlaktetemperatuur aan een raamdorpel en een aangestort raamlatei. Via die twee paden maakt het binnenspouwblad rechtstreeks contact met het buitenspouwblad. Deze koudebruggen komen ook courant voor bij gebouwen die in aanmerking komen voor na-isolatie. Ook ter plaatse van betonnen draagvloeren werd het buitenspouwblad vroeger soms gebruikt als verloren bekisting, waardoor er koudebruggen ontstaan. Naast de spouwsluiting ter plaatse van de dorpel, werd er vaak ook een retour gemetst aan de dagkanten van de ramen, zodat de gevelsteen in contact staat met het binnenspouwblad.



Figuur 25 Koudebrug aan de funderingsaanzet ϵ =0,90; θ_{refl} = 8,3 °C, θ_i =17,5 °C en θ_e =8,5 °C. Tijdens de meting was het zwaar bewolkt weer met een zwakke wind (43).



Figuur 26 Koudebrug aan ingestorte raamlatei. ϵ =0,90; θ_{refl} = 8 °C, θ_i =22 °C, θ_e =9 °C. Tijdens de meting was het zwaar bewolkt weer met een matige wind (43).

Praktijk: Structurele koudebruggen staalbouw

Bij oudere gebouwen met een staalstructuur komen koudebruggen typisch voor aan de draagkolommen en balken van het gebouw. In dit voorbeeld op Figuur 27 werden ze enkel waargenomen aan de binnenkant. De buitenkant van het gebouw was immers bekleed met afneembare gevelpanelen. Daardoor was de luchtholte achter de gevelpanelen geventileerd en waren de thermische gebreken aan de buitenkant niet zichtbaar (voor impact van spouwen zie §2.1.2) (Figuur 27).



Figuur 27 ε =0,90; θ_{refi} = 20 °C, θ_i - θ_e > 10 °C

Praktijk: Houten draagstructuur aandachtspunten

Bij metingen op een houtskeletwand, zijn de houten draagbalken doorgaans ook zichtbaar op het IR-beeld. Deze vormen immers verbinding structurele tussen het binneneen en buitenoppervlak. Zoals hoger aangegeven is het warmteverlies hier waardoor niet groot. er geen risico is op oppervlaktecondensatie. Dit is dus geen koudebrug. Het probleem kan in sommige gevallen echter elders liggen. In deze case waren er luchtlekken over de volledige hoogte van de kepers in de veranderende hoeken. Dit te zien de is aan oppervlaktetemperatuur bij verschillende onderdrukverschillen op Figuur 28.

In deze case werd geen elektrospouw voorzien aan de binnenzijde van de houtskeletwand, waardoor het risico op doorbrekingen in het luchtdichtheidsscherm groter is en de defecten goed te zien zijn. Bij aanwezigheid van een elektrospouw zijn de thermische gebreken doorgaans minder goed te zien aan het binnenoppervlak. Voor meer informatie over luchtdichtheid en thermografie wordt verwezen naar hoofdstuk 5.



Voor de thermograaf is het dus interessant om op voorhand te weten hoe een gebouw geconstrueerd is. Op die manier kan hij of zij inschatten op welke plaatsen er mogelijks koudebruggen of andere problemen zoals luchtlekken zullen voorkomen.

2.1.2 Isolatiegebrek in een (geventileerde) spouw

а

Het buitenspouwblad van een spouwmuur is typisch niet luchtdicht (44). Uit veldmetingen blijkt dat een spouw tussen een gemetst buitenspouwblad en de isolatie een ventilatievoud (1/h) tussen 2 en 3 vertoont, bij windsnelheden tussen 4 en 6 m/s. Voor een dunne gevel uit bijvoorbeeld vezelcementplaten ligt het ventilatievoud tussen 100 en 1000 keren per uur (45). Bij dit laatste type zullen dus nooit onregelmatigheden kunnen worden gedetecteerd aan de buitenzijde met thermografie (zie ook Figuur 27 en Figuur 28).

Door in- en exfiltratie van lucht in de spouw ontstaan verschillende luchtstromingen in en rondom de isolatie. Deze zorgen voor extra warmteverliezen (44) (46) (Figuur 29).



Figuur 29 Overzicht van de luchtstromingen in een spouw in en rond de isolatie; (a): Luchtrotatie in de isolatie door natuurlijke convectie. (b): Luchtrotaties achter en rondom de isolatie. (c): Wind washing: luchtrotatie in de isolatie door wind (windspoeling). (44) (46)

- a. Luchtrotatie in de isolatie door natuurlijke convectie: *Full-scale* labotesten op een houtskeletwand met een geventileerde luchtspouw toonden aan dat er convectie kan ontstaan in de isolatielaag, waardoor de isolatie hoger gelegen in de wand een hoger vochtgehalte kan hebben (47). Bij nietgeventileerde spouwen kan hierdoor de buitenoppervlaktetemperatuur van hoger gelegen delen van de spouwmuur verschillen van lager gelegen delen.
- b. Luchtrotatie rondom en achter isolatie: Een veel voorkomende uitvoeringsfout bij het plaatsen van isolatie in een spouw is de slechte aansluiting van de isolatie met het binnenspouwblad en met de onder- en bovenkant van de spouw. De lucht zal langs de luchtlaag tussen het isolatiepaneel en het binnenspouwblad stromen. Hierdoor zal de U-waarde van de spouwmuur gevoelig stijgen. Bij een luchtlaag tussen de isolatie en het binnenspouwblad van 15 mm gaat de U-waarde al met 20% omhoog, bij 20 mm is dit een toename van 100%. Bij niet-geventileerde spouwmuren is het effect van de luchtrotatie zichtbaar op een infrarood-foto van een spouwmuur in een laboratoriumopstelling. In realiteit treedt de luchtrotatie rondom de isolatie vaak samen op met windwashing, waardoor hier niet veel van te zien zal zijn op een thermografisch beeld van het buitenoppervlak (effect 3) (44).



Figuur 30 (a) Infraroodbeeld van het buitenoppervlak van een spouwmuur in metselwerk. Bij de linkse wand sluit de isolatie in de spouw niet goed aan tegen het binnenspouwblad waardoor de lucht kan roteren rondom de isolatie (44). (b) De schets toont hoe de aftekening op het infraroodbeeld ontstaat. De warme lucht komt naar boven in de spouw, terwijl de koudere lucht naar beneden zakt in de spouw.

77

c. Windspoeling door een uitwendig drukverschil (46): De infiltratielucht komt aan de bovenkant van de spouw binnen en stroomt door het isolatiepaneel en in de luchtspouw naar beneden. Ook in dit geval zijn isolatiegebreken niet zichtbaar op IR-beelden van het buitenoppervlak.

Wanneer de spouw sterk geventileerd is, zal het temperatuurverschil veroorzaakt door het isolatiegebrek niet meer zichtbaar zijn aan de buitenzijde. De buitenlucht beïnvloedt dan ook de binnenzijde van het buitenspouwblad. In dit geval zijn IR-inspecties aan de binnenzijde van het gebouw noodzakelijk.

2.1.3 Ontbrekende isolatie in de luchtspouw: na-isolatie

Bij na-isolatie van de spouw wordt een lege spouw door middel van boringen in het gevelwerk gevuld met isolatie. Hiervoor zijn allerhande isolatiematerialen beschikbaar zoals kunststofschuim (PU, UF-schuim), minerale vezels (glas- of rotswol) of granulaten (EPS, silicaanschuimkorrels, perliet, vermiculiet). Vandaag worden PU, minerale wol en EPS veruit het meest toegepast. Aan sommige van deze materialen zijn typische moeilijkheden verbonden die kunnen leiden tot een gebrekkige isolatiekwaliteit van de nagevulde wand. Bovendien kunnen mortelbaarden en puin van de boringen zorgen voor lokale obstructies die de goede vulling verhinderen.

Zo kunnen bij het gebruik van EPS-parels minder goed isolerende zones ontstaan door een incorrect lijmdebiet bij inspuiting. Meer bepaald aan hoeken nabij ramen en deuren kan de lijm zich ophopen, waardoor de gewenste densiteit EPS-parels niet bereikt wordt. Met behulp van thermografie kunnen deze zaken in de juiste omstandigheden opgespoord worden (43).

Voorzichtigheid is echter geboden bij dergelijke inspecties van naisolatie. Uit simulaties (hoofdstuk 2, §2.2) blijkt dat luchtholtes in isolatie doorgaans tot beperkte temperatuurverschillen leiden, zowel bij smalle (5 cm) als brede (15 cm) spouwen. Het is dus belangrijk om de meetafstand tussen het oppervlak en de camera te beperken en een smalle lenshoek te gebruiken (zie ook §2.3). Om uit te maken of een grillig oppervlaktetemperatuurpatroon veroorzaakt is door gebrekkige na-isolatie of door een lokaal vochtige of bevuilde gevel, is het noodzakelijk om thermografische inspecties op na-isolatie te documenteren met gewone foto's en een verslag van de na-isolatiewerken.

Praktijk: Goede vs. Gebrekkige uitgevoerde na-isolatie

Bij inspectie van na-geïsoleerde gevels is het belangrijk om het schadepatroon te herkennen. Bij een goed uitgevoerde na-isolatie zijn enkel koudebruggen goed te zien (Figuur 31).



Figuur 31 Dit beeld is genomen op de westgevel, bij zonsopgang. Op het moment van de meting werd de gevel dus niet blootgesteld aan zonnestraling. Zoals in hoofdstuk 2 aangegeven heeft een heldere hemel geen invloed op de aftekening van schadegevallen (43).

Bij een gebrekkige na-isolatie zijn er patronen te zien zoals op Figuur 32. Er zijn onder andere grillige patronen te zien aan de raamaansluitingen en de dakgoot. Op die plaatsen werd geen boorgat gemaakt en werd het debiet slecht ingesteld. Daarnaast is op de gewone foto geen bevuiling of vochtprobleem te zien op de koudere plaatsen op de foto. Op deze IR-foto werd dus de gebrekkige na-isolatie in beeld gebracht.



Figuur 32 ε =0,90, θ_{refl} = 8,3 °C, θ_i - θ_e > 10 °C (43)

2.2 Geometrische bouwknopen

Op een thermografisch beeld zijn doorgaans ook geometrische bouwknopen zichtbaar. Bepaalde delen van de bouwschil hebben een groter contactoppervlak met de buiten- en binnenomgeving waardoor de warmtestroming over een groter verliesoppervlak wordt verdeeld. Dit komt typisch voor aan binnen- en buitenhoeken, balkons, inhammen van ramen en deuropeningen. Bijgevolg zal de oppervlaktetemperatuur daar afwijken. Het is dus van belang om geometrische koudebruggen altijd in de juiste context te bekijken.

Praktijk: Groter contactoppervlak inhammen deur en raam

Rond raam- en deuropeningen is het oppervlak typisch kouder (Figuur 33). Dit is deels omdat de inhammen een geometrische koudebrug vormen: er is een groter contactoppervlak met de buitenlucht. Op het moment van deze meting bedroeg de buitentemperatuur 3 °C. Indien het glas tot tegen het buitenoppervlak van de gevelsteen zou zitten, zou het contactoppervlak in dat geval veel kleiner zou zijn. Dit zou resulteren in hogere oppervlaktetemperaturen van het metselwerk aan het glas.



Figuur 33 ϵ =0,90, $\theta_{refl,buiten}$ = 3,5 °C, $\theta_{refl,binnen}$ = 19,5 °C, θ_i =21 °C, θ_e =4,5 °C. De metingen vonden plaats voor zonsopgang, in zwaar bewolkt weer met lage windsnelheden tot 2 m/s. Ook de dagen voor de meting was het bewolkt en regenachtig.

2.3 Meetafstand en -richting

Zoals aangegeven in hoofdstuk 2 §3, zijn de IR-resolutie, type lens en meetafstand bepalend voor de zichtbaarheid van kleine koudebruggen of gebreken die een klein temperatuurverschil veroorzaken. De werkelijke temperaturen worden immers uitgemiddeld over 1 pixel. Hierdoor zijn kleine schadegevallen niet meer zichtbaar op IR-beelden genomen vanop grote afstand of vanuit een schuine hoek. Voor isolatiegebreken zoals beschadigde vacuüm isolatie panelen (VIP's) en luchtholtes in na-isolatie is het dus handig om vanuit meerdere richtingen en meerdere meetafstanden een thermografisch beeld te nemen.

Praktijk: De (on)zichtbaarheid van beschadigde VIP's

In deze case werd thermografie toegepast om een plat dak te inspecteren. Het dak werd geïsoleerd met vacuüm isolatie panelen (VIP) van 30 mm dik. VIP-panelen danken hun lage warmtegeleidingscoëfficiënt (0,007 W/mK) door het vacuüm trekken van een plaat in pyrogeen kiezelzuur microglasvezels en stralingsblokkers in een lucht- en dampdichte folie. Van zodra deze folie beschadigd wordt, komt er lucht binnen in het paneel en stijgt de warmtegeleidingscoëfficiënt naar 0,017 W/mK.

Tijdens de plaatsing van de dakisolatie werd vastgesteld dat twee VIP-panelen lek waren. Op Figuur 34a werd aangeduid met een zwart kader waar de beschadigde VIP's gelokaliseerd zijn, maar uit die IR-foto is niet af te leiden dat er op die locatie beschadigde VIP's zijn. Op Figuur 34b daarentegen, is wel een duidelijk warmere zone te zien ter hoogte van het beschadigd VIP-paneel. Dit IR-beeld werd genomen vanop een kleinere afstand en vanuit een andere hoek.



Figuur 34 ϵ =0,91, θ_{refl} = -27,5 °C, θ_i =19,5 °C, θ_e =5 °C. Meting voor zonsopgang onder heldere hemel en bij een lage windsnelheid tussen 0 en 2 m/s. (a): op de overzichtsfoto lijkt er geen afwijking te zijn in oppervlaktetemperatuur ter hoogte van de beschadigde VIP's. (b): Wanneer een IR-foto op korte afstand genomen wordt, is wel een duidelijk geometrisch patroon te zien. Beide foto's werden genomen met een IR-resolutie van 640x480 en lens 25°x19°.

2.4 Impact van stralingsbronnen: zon en verwarming

In hoofdstuk 2 §2 werd al uitgebreid ingegaan op de impact van verschillende weeromstandigheden zoals zon, wind en de straling van de hemelkoepel op de oppervlaktetemperatuur aan een koudebrug en aan een gedeelte met isolatie. Zonlicht is over het algemeen nefast voor de zichtbaarheid van thermische gebreken op IR-foto's. Door een verschillende thermische effusiviteit (zie ook §2.5.2) kan het temperatuurverschil tussen het oppervlak van een thermisch gebrek en van een intact deel kleiner worden.

Daarnaast kan de zonnestraling ook op een andere manier roet in het eten gooien. Door de schaduw van naburige gebouwen of oppervlaktefenomenen zoals lucht- en vochtinsluitsels die mee opwarmen kan een specifiek temperatuurpatroon op het buitenoppervlak ontstaan. In sommige gevallen wordt een koudebrug gemaskeerd, in andere gevallen kan er een ernstig probleem lijken te bestaan waar er geen is.

Praktijk: De magische verdwijning van de koudebrug aan de funderingsaanzet

De nefaste impact van de zon is duidelijk geïllustreerd op de infraroodopname van een oostgevel, voor en na zonsopgang. De koudebrug aan de funderingsaanzet is volledig onzichtbaar door de schaduw van een naburig gebouw, zoals op de digitale foto te zien is. Op het eerste zicht lijken dit eerder uitzonderlijke situaties, en zal een thermograaf al bij aanvang beslissen dat foto's van een muur bij zonlicht niet representatief zijn. Anderzijds, door de hoge thermische massa van het buitenspouwblad kan de impact van zonneschijn nog een lange periode nawerken. Dus ook als het al enkele uren bewolkt is na zonneschijn (of de zon is al een tijdje onder) kan de impact van de zon nog nawerken en kan men tot foutieve conclusies komen.





Figuur 35 Foto 8u: ε=0,90, θ_{refl}=-4 °C. Foto 13u30: ε=0,90, θ_{refl}=5 °C

Praktijk: Fata morgana van een isolatiegebrek

Figuur 36 toont een warmer oppervlak bovenaan in de hoek van een na-geïsoleerde gevel. Op het eerste zicht lijkt het alsof er daar isolatie ontbreekt. Bij na-isolatie kan dit immers typisch voorkomen in hoeken en randen. De warmere plek zou kunnen wijzen op onvolledige spouwvulling, maar door de specifieke vorm is het waarschijnlijker dat het bovenste gedeelte van het oppervlak opgewarmd werd door zonnestraling, terwijl de rest van de gevel beschaduwd werd. Het stukje wand met de warmere

plek was gericht naar het oosten (43).



Figuur 36 Een warmer oppervlak van een gedeelte van de gevel doordat enkel dat deel bezonning kreeg

Praktijk: Locatie verwarmingstoestellen

In het zwarte kader op Figuur 37 is de oppervlaktetemperatuur links van de erker veel hoger (pieken tot 5,5 °C) dan aan de rechterzijde. Dit is het gevolg van de radiator die zich daar langs de binnenzijde bevindt.



Figuur 37 ϵ =0,90, $\theta_{refl,buiten}$ = 3,5 °C, $\theta_{refl,binnen}$ = 19,5 °C, θ_i =21 °C en θ_e =4,5 °C. De metingen vonden plaats voor zonsopgang, in zwaar bewolkt weer met lage windsnelheden tot 2 m/s. Ook de dagen voor de meting was het bewolkt en regenachtig.

Indien bepaalde patronen net zichtbaarder worden door zonnestraling, zonder invloed van schaduw, hebben we mogelijks te maken met een lucht- of vochtinsluitsel net onder het buitenoppervlak van de gevel. Dit schadegeval is anders van aard dan een koudebrug en komt typisch voor bij dakbedekkingen, pleisterwerk, etc. Enkel voor het opsporen van lucht- en vochtinsluitsels net onder het oppervlak is zonnestraling gewenst (zie hoofdstuk 6).

2.5 Oppervlakte-eigenschappen - Case VIP

De oppervlaktetemperatuur wordt bepaald door verschillende randvoorwaarden zoals:

- de binnen- en buitentemperatuur
- de materiaaleigenschappen
 - warmtegeleiding
 - thermische effusiviteit
 - o absorptie van kortegolfstraling
 - absorptie en emissie van langegolfstraling.

Een combinatie van materiaaleigenschappen, oppervlakteverschijnselen en weersomstandigheden bepaalt de uiteindelijke oppervlaktetemperatuur en dus het IR-beeld. Het samenspel van deze verschillende aspecten kan dus ook tot meerdere lezingen leiden. Dit wordt geïllustreerd in een case waarin een thermografische inspectie van plat dak met vacuüm isolatie panelen (VIP's) en sandwichpanelen werd uitgevoerd. Daarnaast werden ook warmtefluxmetingen en simulaties in Voltra (38) uitgevoerd gebruik makend van de in-situ gemeten weersomstandigheden.

2.5.1 Eigenschappen dak en omstandigheden thermografie

Dit platte dak was voor de helft geïsoleerd met naakte vacuüm isolatie panelen (VIP's) en voor de andere helft met sandwichpanelen bestaande uit VIP's met aan weerzijden cellenglas. Tabel 18 toont de warmtegeleidingscoëfficiënt en de warmteweerstand van beide materialen.

		•		Ū	
		λ (W/mK)	d (m)	R _{theorie} (m ² K/W)	$R_{flux}(m^2K/W)$
VIP		0,007	0,030	4,3	5,4-5,7
Sandwichpaneel	Cellenglas	0,040	0,050	7,9	8,0-9,0
	VIP	0,007	0,038	_	

0.050

Cellenglas 0.040

Tabel 18 Warmtegeleidingscoëfficiënt λ , dikte d, theoretische warmteweerstand R_{theorie} en de warmteweerstand bepaald uit warmtefluxmetingen R_{flux}. (48)

Daarnaast was het dak afgedicht met twee verschillende dakmembranen, een donker en een licht gekleurd. Op die manier kan het dak ingedeeld worden in vier zones (Figuur 38):

- Zone 1: sandwichpaneel met wit membraan
- Zone 2: naakte VIP met wit membraan
- Zone 3: sandwichpaneel met zwart membraan
- Zone 4: naakte VIP met zwart membraan



Figuur 38 (a) Bovenzicht van het dak met twee kleuren dakmembraan. (b) Legplan dakisolatie en zonering. De rode stippen tonen de locatie van twee beschadigde sandwichpanelen (zie ook Figuur 34).

Figuur 39 toont het IR-beeld van het volledige dak, met aangepaste emissiviteit voor het witte en zwarte membraan. De metingen vonden plaats voor zonsopgang, onder een heldere hemel. De dag voor de inspectie was het voornamelijk bewolkt met buitentemperaturen tot 14 °C, de dagen daarvoor waren echter zonnig met buitentemperaturen tot 17 °C. De nacht voor de meting was de buitentemperatur gedaald tot 2 °C à 3 °C.



Figuur 39 IR-foto met ϵ =0,90, θ_{refl} = -27,3 °C, θ_i =19,5 °C, θ_e =5 °C. Windsnelheid tussen 0 en 2 m/s. Meting uitgevoerd voor zonsopgang.

Een aantal zaken op Figuur 39 zijn snel te verklaren met de aandachtspunten van dit hoofdstuk in het achterhoofd:

1 Centraal op het IR-beeld is een warmere strook zichtbaar, op de scheidingslijn tussen de VIP's en de sandwichpanelen. De warmere zone daar is ontstaan door een kleine koudebrug aan een rail die plaatselijk de plafondbeplanking onderbreekt (Figuur 40a). Daarnaast is er ook sprake van een geometrische koudebrug (Figuur 40b).



Figuur 40 (a)Snede ter hoogte van de overgang (witte lijn Figuur 38(a)) tussen de VIP's en de sandwichpanelen. (b) Werking als geometrische koudebrug

2 Andere afwijkingen op het IR-beeld zijn: de passtukken uit de PU-isolatie (λ = 0,026 W/mK, d = 0,030 m) rondom de schoorsteen en de schoorstenen zelf. Dit komt uiteraard doordat de PU-isolatie een veel hogere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft dan de VIP's en de sandwichpanelen (Figuur 41).



Figuur 41 Passtukken in PU-isolatie en hun aftekening op het IR-beeld.

3 De lasnaden van het dakmembraan tekenen zich af als koudere en warmere dunne lijnen op het IR-beeld. Deze naden zijn lokale verdikkingen in het dakvlak. Hier is opnieuw sprake van enerzijds een geometrische koudebrug. De buitentemperatuur is warmer dan het dakoppervlak door de straling van de hemelkoepel. Door het groter contactoppervlak van de lasnaden is de oppervlaktetemperatuur daar hoger. Daarnaast heeft de naad ook een hogere thermische massa door het dubbele laag bitumen in de overlap. Ter hoogte van de naad wordt de warmte dus langer vastgehouden.

Uit het IR-beeld van het dak (Figuur 39) roepen de volgende vaststellingen echter vragen op:

4 Hoewel de sandwichpanelen (zone 1 en 3) een hogere warmteweerstand hebben dan de VIP's (zone 2 en 4) (Tabel 18), is op het IR-beeld te zien dat het oppervlak aan de sandwichpanelen (zone 1 en 3) een hogere temperatuur heeft. Hebben andere fysische fenomenen hier een grotere impact (§ 2.5.2)?

- 5 De naden tussen de sandwichpanelen kunnen duidelijk onderscheiden worden door hun hogere oppervlaktetemperatuur. Is de isolatie slecht geplaatst of is er iets anders aan de hand (§2.5.2)?
- 6 Er is een duidelijk onderscheid te zien tussen de zwarte en witte dakbedekking. Het beeld op Figuur 39 werd gecorrigeerd door een emissiviteit in te stellen die in-situ bepaald werd. Zelfs met een exacte emissiviteit, is het temperatuurverschil tussen het zwarte en witte membraan opmerkelijk. Heeft het kleurverschil een impact? (§2.5.3)

Ter illustratie: Impact van de thermische weerstand van de materialen

Uitgaande van de numerieke simulatie in Voltra en van de theoretische warmteweerstand van de isolatielagen ($R_{theorie}$), zou de oppervlaktetemperatuur ter hoogte van de sandwichpanelen de sandwichpanelen (zone 1 en 3) lager moeten zijn dan ter hoogte van de VIP's (zone 2 en 3). Toch toont de meting met de thermokoppels en met thermografie het tegendeel. Zone 4, met de VIP's en zwarte bekleding, heeft de laagste temperatuur (Tabel 19).

Uit de theoretische berekening in Tabel 19 blijkt dat door de grote warmteweerstand van de isolatielagen de verschillen in oppervlaktetemperatuur erg klein zijn ($\theta_{se,theorie}$ zone 1 en zone 2 in Tabel 19). Het zou dus kunnen dat andere fysische fenomenen een grotere impact hebben en het uiteindelijke beeld bepalen.

Tabel 19 Vergelijking van de oppervlaktetemperaturen aan de buitenzijde (θ_{se}) uitgaande van R_{theorie}, simulaties in Voltra, metingen met thermokoppels (48) en thermografie (Figuur 39). De laagste waarde is in het grijs gemarkeerd in de tabel.

(°C)	$ heta_{se, \ Theorie}$	θ_{se} ,Simulatie	$\theta_{se,thermokoppel}$	$ heta_{se}$ Thermografie
			(48)	(Figuur 39)
Zone 1	2,08	1,94	2,8	3,9
(sandwich, wit)				
Zone 3	2,07	1,97	2,4	3,1
(sandwich,zwart)				
Zone 2	2,83	2,35	2,9	2,6
(VIP, wit)				
Zone 4	2,82	2,38	2,3	1,8
(VIP, zwart)				

Uit de metingen met thermokoppels blijkt dat de theoretische verhouding tussen de oppervlaktetemperatuur van de VIP's en sandwichpanelen slechts opgaat voor het witte deel van het dak ($\theta_{se,thermokoppel}$ zone 1 (2,8 °C) < $\theta_{se,thermokoppel}$ zone 2 (2,9 °C)). Voor de zwarte dakhelft (zone 3 en 4) komen de resultaten van de warmtefluxmeting overeen met de waarneming van thermografie: de oppervlaktetemperatuur van de sandwichpanelen (zone 3) ligt iets hoger, wat op het eerste zicht niet logisch lijkt omdat de sandwichpanelen een hogere warmteweerstand hebben (Tabel 18). Er zijn dus andere fenomenen die een grotere invloed hebben op de oppervlaktetemperatuur (en dus op het IR-beeld) dan de warmteweerstand. In hoofdstuk 2 zagen we bijvoorbeeld dat de thermische effusiviteit een grote invloed had op de wachttijden voor nauwkeurige thermografische metingen (meetonzekerheid $\pm 0,5$ °C).

2.5.2 Invloedsparameter 1: thermische effusiviteit van het oppervlak

De thermische effusiviteit *e* is een oppervlakte-eigenschap waarmee aangegeven wordt hoe snel een materiaaloppervlak warmte absorbeert en weer loslaat (zie ook Hoofdstuk 2). Een materiaaloppervlak met een lage effusiviteit wisselt weinig warmte uit met de omgeving en voelt typisch warmer aan, een materiaal met een hoge effusiviteit zal de warmte veel sneller absorberen en voelt typisch kouder aan. Hierdoor kunnen gebouwen met een identieke warmteweerstand toch een verschillende oppervlaktetemperatuur hebben.

 $e = \sqrt{\lambda \rho c} \left(J/m^2 K v s \right)$

[9]

Met:

λ: de warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK), ρ: de densiteit (kg/m³)

c: de soortelijke warmtecapaciteit (J/kg.K).

De soortelijke warmtecapaciteit c is een maat voor de energie die nodig is om 1 kg materiaal 1K te laten stijgen in temperatuur.

De effusiviteit van VIP panelen is ongeveer de helft van die van cellenglas (Tabel 20). Dit betekent dat het oppervlak aan de VIP's minder warmte uitwisselt met de omgeving dan het oppervlak aan de sandwichpanelen en dat het oppervlak aan de VIP's warmer aanvoelt.

	λ (W/m.K)	ρ (kg/m³)	c (J/kg.K)	effusiviteit (J/m².√s.K)
VIP	0,007	170	800	30.85
Cellenglas (sandwich)	0,04	120	806	62.20
Luchtvoeg (tussen VIP's)				53
Voeg bitumineuze koudlijm				
(tussen sandwichpanelen)	0,2	1050	1840	622

Tabel 20 Effusiviteit van de verschillende materialen onder het dakoppervlak.

Op het moment van de thermografische meting was de buitentemperatuur aan het dalen door de straling van de hemelkoepel. Bijgevolg was de dakafdichting ook aan het afkoelen, maar bij het oppervlak aan de VIP's gebeurde die afkoeling sneller, omdat er door de lagere effusiviteit een lagere ogenblikkelijke warmtetoevoer was vanuit de VIP's naar het dakoppervlak. De dakafdichting aan de VIP's volgt dus meer de buitenluchttemperatuur, wat zich vertaalt in een lagere temperatuur zoals zichtbaar op de IR-foto's. Bij het oppervlak aan de sandwichpanelen, wordt de warmte die opgeslagen zit in de isolatie sneller afgegeven aan het bovenliggende dakmembraan. Bijgevolg is de oppervlaktetemperatuur daar iets hoger.

aftekening van de voegen De tussen de VIP's en de sandwichpanelen kan ook verklaard worden met hetzelfde principe. De thermische effusiviteit van de voegen is hoger dan van het oppervlak aan de isolatiepanelen (Tabel 20). Daardoor zal het oppervlak ter hoogte van de voegen sneller opwarmen en afkoelen ten gevolge van veranderingen in de omgeving. Aangezien op het moment van de metingen de buitenluchtemperatuur (5 °C) hoger is dan de oppervlaktetemperatuur (tussen 1,8 en 3,9 °C, Tabel 19) vertonen de voegen een hogere oppervlaktetemperatuur dan het dakvlak. 91

Echter, met de thermische effusiviteit is de verschillende oppervlaktetemperatuur van de oost- en westzijde van het dakvlak (de witte en zwarte helft) nog niet verklaard (IR foto Figuur 39). Hiervoor liggen andere eigenschappen aan de basis.

2.5.3 Invloedsparameter 2: De kleur van de dakbedekking

Er is een groot onderscheid in het reflectie- en absorptievermogen van beide kleuren dakbedekking. Een donkere dakafdichting zal meer invallende straling absorberen dan een lichte, terwijl deze laatste meer straling zal reflecteren. Voor opake elementen geldt namelijk volgend verband tussen reflectie- (ρ) en absorptiecoëfficiënt (α) :

$$\rho + \alpha = 1 \tag{10}$$

Typische p-waarden zijn 0,05-0,12 voor zwarte dakafdichting en dakafdichting witte (eigenschappen 0.3-0.8 voor voor kortegolfstraling). In tegenstelling tot de emissiviteit in het langegolfbereik (7 µm-14 µm op Figuur 39) verschillen de reflectie en absorptie van het witte en zwarte membraan in het kortgolfbereik wel grondig van elkaar. Overdag zal de invallende zonnestraling de daktemperatuur van het zwarte gedeelte dus hoger doen oplopen. Echter, de thermografische metingen vonden plaats tussen 6 en 7 uur 's morgens bij heldere hemel. Bijgevolg heeft het dak tijdens de nacht voornamelijk lange golfstraling uitgestraald richting hemelkoepel, waardoor het is gaan afkoelen. Aangezien dakafdichting de zwarte een lagere oppervlaktemperatuur heeft volgens de IR-foto, moet dit membraan meer straling - en dus warmte - hebben uitgezonden, wat zich vertaalt in een hogere emissiviteit en absorptie.

Als we naar de temperatuurverschillen kijken tussen zwart en wit wordt bij de thermografiebeelden 0,5 à 2 °C opgemeten, bij de warmtefluxmetingen 0,1 °C à 0,4 °C. De simulaties geven een nog kleiner verschil van slecht 0,03 °C, maar dit kan mogelijk verklaard worden door een te kleine inschatting van het verschil in emissiviteit en te hoge aangenomen temperaturen van de hemelkoepel. Uit deze case blijkt dat de reflectie- en absorptie-eigenschappen van de kleuren dakbedekking een impact hebben op de oppervlaktetemperaturen en dus ook op het uitzicht van een IRbeeld.

2.6 Besluit

Om een correcte analyse te kunnen maken van thermografische beelden, moeten de randcondities zoals de weersomstandigheden, locatie, aanwezigheid van een spouw, oppervlakte-eigenschappen goed gekend zijn. In de VIP-case uit §2.5 zou je –zonder enig besef van de thermische effusiviteit of de impact van de kleur van het membraan- snel verkeerde besluiten kunnen trekken over de relatieve isolatiewaarde van VIP's en sandwichpanelen. Voorzichtigheid is dus geboden bij het hanteren en interpreteren van thermografische beelden.

3 Mogelijke analysemethodes

3.1 Gebruik van de temperatuurschaal

De temperatuurschaal is een handig instrument om de zichtbaarheid van bepaalde schadegevallen te verbeteren. Voor bijvoorbeeld schadegevallen waar de verschillen in oppervlaktetemperatuur doorgaans beperkt zijn, is het handig om via de temperatuurschaal ook kleine temperatuurverschillen te visualiseren (Figuur 42).

Het manipuleren van de temperatuurschaal kan echter ook tot een verkeerde perceptie leiden. Figuur 43 en Figuur 44 tonen een beeldenreeks van een wand waarbij de temperatuurschaal eens vergroot en vernauwd werd en waar twee verschillende kleurenpatronen gebruikt werden. De temperatuurschaal moet dus oordeelkundig gebruikt worden.



Figuur 42 Door de temperatuurschaal kunnen schadegevallen bij na-isolatie, die typisch kleine temperatuurverschillen veroorzaken, blootgelegd worden.





Figuur 43 (a) digitale foto (b) foto met automatische temperatuurschaal tussen 20,3 °C en 11,7 °C (c) foto waarbij de ondergrens van de temperatuurschaal naar onder verschoven werd van 20,3 °C tot 0,0 °C (d) foto waarbij de temperatuurschaal vernauwd werd van 17,2 °C tot 13,5 °C.



Figuur 44 (a) Het gebruik van een ander kleurenpalet kan de thermische gebreken er 'warmer' doen uitzien op het eerste zicht. (b) Door het kleurenpalet kunnen de isolatiegebreken er ook erg problematisch uitzien, terwijl ze dat misschien niet zijn.

3.2 Temperatuurprofielen

Op Figuur 45 is een thermografische foto met bijhorend temperatuurprofiel langs de verticale lijn van de foto links te zien. Dit maakt het mogelijk om oppervlaktetemperaturen in één beeld te vergelijken. Hierbij is het belangrijk dat een voldoende groot gebied rondom de koudebrug wordt meegenomen in het thermografisch beeld zodat het temperatuurprofiel tot buiten de invloedszone van de koudebrug kan opgesteld worden.



Figuur 45 Voorbeeld van het gebruik van temperatuurprofielen, waarmee de invloedszone van een koudebrug bepaald kan worden.

4 Besluit

Er zijn een aantal zaken die de thermograaf voor aanvang van de inspectie op isolatiegebreken moet weten:

• Wat is de constructiewijze van het gebouwdeel? Op die manier weet de thermograaf op voorhand waar koudebruggen kunnen voorkomen en of er mogelijks een hoger risico bestaat op andere problemen zoals luchtlekken, lucht- en vochtinsluitsels.

- Hoe werd de constructie geïsoleerd?
 Werd de constructie na-geïsoleerd? Welke materialen werden gebruikt? Luchtholtes in de na-isolatie geven doorgaans aanleiding tot kleinere temperatuurverschillen dan een koudebrug door bijvoorbeeld een betonnen latei. Door de isolatiewijze op voorhand na te vragen, kunnen voorzieningen getroffen worden om de schade optimaal in beeld te brengen: bijvoorbeeld een hoogtewerker, meer tijd voorzien voor de inspectie om IR-beelden uit meerdere standpunten te nemen, etc.
- Wat is de staat van het oppervlak? Zijn er vochtige plekken? Is er bevuiling of begroeiing op de bouwschil? Dit kan een impact hebben op de thermische effusiviteit en de absorptie in de korte golfstraling van het oppervlak (zie §2.5.2 en §2.5.3).
- Wat waren de weersomstandigheden voor en tijdens de meting?

Door een verschil in thermische effusiviteit en thermische traagheid tussen een zone aan een koudebrug en een geïsoleerd deel, kunnen de temperatuurverschillen groter of kleiner zijn dan je zou verwachten onder statische omstandigheden. Door een notie van de weersomstandigheden voor en tijdens de meting kunnen bepaalde temperatuurpatronen achteraf gemakkelijker verklaard worden.

• Het is dus zeker niet altijd mogelijk om koudebruggen op te sporen met thermografie. Thermografie is een belangrijk controlemiddel (en vaak het enige) om een groot oppervlak te inspecteren. Het laat echter typisch niet toe om koudebruggen uit te sluiten. Alleen in ideale omstandigheden kan men op basis van thermografie de aanwezigheid van koudebruggen echt uitsluiten. Aan die ideale omstandigheden is zelden voldaan, dus voorzichtigheid is steeds geboden bij de evaluatie van de foto's.



Lekdetectie & Energie

Opsporen van waterlekken

Thermografie

Luchtdichtheidstests



De Woonstudie bvba Sladijklos 4 9620 Zottegem 09/362 90 19 info@dewoonstudie.be

www.dewoonstudie.be

Hoofdstuk 4: Beoordeling thermische prestaties

1 Inleiding

Thermografie biedt potentieel om een inschatting te kunnen maken van de thermische prestaties van de gebouwschil. Een voorwaarde om dit potentieel te benutten, is echter dat de gemeten oppervlaktetemperaturen zo dicht mogelijk aanleunen bij de stationaire toestand. In de praktijk blijkt echter dat deze ideale omstandigheden zeer weinig voorkomen (zie hoofdstuk 2 §2.1).

Daarnaast zijn er nog twee andere factoren die de berekening van de thermische prestaties op basis van oppervlaktetemperaturen beïnvloeden. Ten eerste is een nauwkeurige meting van de binnenen buitentemperatuur noodzakeliik om de U- en R-waarde te berekenen. Daarbij is het belangrijk om de temperaturen ter hoogte van de onderzochte component te meten en mogen deze niet beïnvloed worden door externe factoren. zoals verwarmingstoestellen, stralingsbronnen, wind, etc. Een tweede invloedfactor is de warmteovergangscoëfficiënt van het luchtlaagie grenzend aan het binnen- en buitenoppervlak. Zeker in het geval van lichte gebouwcomponenten, zoals houtskeletwanden of glas verkeerde kan een inschatting van deze warmteovergangscoëfficiënten afwijkende Uen R-waardes opleveren.

1.1 De U- en R-waarde berekening

Wanneer de binnen- en/of buitenoppervlaktetemperatuur gemeten wordt in gunstige weersomstandigheden (zie hoofdstuk 2 §2.1) en de binnen- en buitentemperatuur gekend zijn, kan de Uen R-waarde volgens formules [11], [12], [13] en [14] berekend worden.

$$R = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_e} \quad \text{waarin} \quad U = U_{si}, U_{se} \text{ of } U_{sise}$$
[11]

Met:

$$U_{si} = h_i \frac{\theta_i - \theta_{si}}{\theta_i - \theta_e}$$
[12]

$$U_{se} = h_e \frac{\theta_{se} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$
[13]

$$U_{si,se} = \frac{1}{h_i \frac{\theta_i - \theta_{si}}{\theta_i - \theta_{se}} - \frac{1}{h_e}}$$
[14]

Met U_{si} de warmtedoorgangscoëfficiënt uitgedrukt uitgaande van binnenoppervlaktetemperatuur, de Use de warmtedoorgangscoëfficiënt basis de op van buitenoppervlaktetemperatuur en U_{sise} op basis van beide. Verder is h_i de warmteovergangscoëfficiënt langs het binnenoppervlak (W/m²K) en h_e de warmteovergangscoëfficiënt langs het buitenoppervlak (W/m²K). Deze twee grootheden beschrijven de warmtedoorgang van de luchtlaag grenzend aan het binnen- en buitenoppervlak (grenslaag).

1.2 De overgangscoëfficiënten hi en he

Volgens de norm NBN B62-002 (49) bedraagt h_i 7,7 W/m²K bij een warmtestroming van binnen naar buiten, terwijl dit voor h_e 25 W/m²K bedraagt. Om een inschatting te maken van de thermische prestaties uitgaande van de gemeten oppervlaktetemperaturen, zijn deze standaardwaarden echter niet nauwkeurig genoeg. Bij windstil weer bijvoorbeeld is de standaardwaarde van 25 W/m²K voor h_e een overschatting. Hierdoor zullen altijd te hoge Uwaardes bekomen worden, ook al werden de thermografische metingen in gunstige weersomstandigheden uitgevoerd. Het is dus belangrijk om h_i en h_e nauwkeurig in te schatten.

De warmteovergangscoëfficiënten bestaan uit een aandeel straling (r) en een aandeel convectie (c), zoals de formule [15] verduidelijkt.

$$h_i = h_{i,r} + h_{i,c} \operatorname{en} h_e = h_{e,r} + h_{e,c}$$
 [15]

De stralingscomponenten voor binnen $(h_{i,r})$ en buiten $(h_{e,r})$ worden berekend op basis van de stralingstemperatuur tussen het oppervlak en de omgeving (50)

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_M^3 \left[W/m^2 K \right]$$
⁹⁹ [16]
Met:

 ϵ : de emissiviteit van het meetoppervlak is (zie hoofdstuk 2, §1) σ : de Stefan-Boltzmann constante (5,67.10⁻⁸ W/m²K⁴) en T_m: de gemiddelde temperatuur tussen het meetoppervlak en de omgeving, in Kelvin. In het onderzoek werd T_m gelijkgesteld aan het gemiddelde van de gereflecteerde omgevingstemperatuur en de oppervlaktetemperatuur van het meetobject.

De convectieve warmteovergangscoëfficiënt het langs binnenoppervlak hangt voornamelijk hic af van het binnenoppervlak temperatuurverschil tussen het en de binnenlucht. Voor dit onderzoek werd de correlatie van Thomas gebruikt [17]. Deze formule werd ontwikkeld voor verticale constructies zoals wanden, met een horizontale warmtestroming. (51)

$$h_{i,c} = 1,77 \sqrt[4]{\theta_i - \theta_{si}} [W/m^2K]$$
 [17]

warmteovergangscoëfficiënt De convectieve langs het wordt vooral beïnvloed buitenoppervlak (h_e) door de windsnelheid (gedwongen convectie). Er bestaan echter verschillende correlaties tussen h_{e.c} en de windsnelheid, welke al dan niet rekening houden met de invloed van de ruwheid van het oppervlak, de hoogte van het meetobject, de oriëntatie t.o.v. de windrichting en de vorm van het gebouw (52) (53). In dit onderzoeksproject werden twee correlaties voor h_{e,c} gebruikt. Formule [18] werd toegepast bij de bepaling van de U-waarde van wanden. Deze formule werd afgeleid door warmteflux-, en temperatuurmetingen van een rechthoekig verticaal paneel met bakstenen oppervlak te linken aan metingen van de windsnelheid (V_s) , op 1 meter van het paneel. Het paneel werd aangebracht op 20 meter hoogte op een gebouw in een stedelijke omgeving (54).

Windzijde:
$$h_{e,c} = 16,15V_s^{0,397}$$
 [W/m²K]
Luwe zijde: $h_{e,c} = 16,25V_s^{0,503}$ [W/m²K] [18]

Formule [19] werd gebruikt voor de bepaling van de U-waarde van glas. Deze correlatie werd ontwikkeld voor gladde oppervlakken (52).

$$h_{e,c} = \sqrt{(C_t(\theta_{es} - \theta_e)^{1/3})^2 + (aV_5^b)^2} [W/m^2K]$$
[19]
Met: Oriëntatie C_t a b
Windzijde 0.84 ± 0.015 2.38 ± 0.036 0.89 ± 0.009

2.86 ± 0.098

0.617 ± 0.017

1.3 Nauwkeurigheid U-waarde met thermografie

Luwe ziide 0.84 ± 0.015

In hoofdstuk 2 §2.1 werden de richtlijnen voor thermografische metingen voor U-waarde bepaling toegelicht. Daarin werd een minimale afwijking van ±0,5 °C vooropgesteld t.o.v. de stationaire toestand. Momenteel is dit de kleinste meetafwijking die met thermografie technisch mogelijk is onder ideale randcondities (55). De thermografische metingen moeten zo nauwkeurig mogelijk zijn omdat de bepaling van de U-waardes op basis van oppervlaktetemperaturen zeer gevoelig is voor kleine afwijkingen van de oppervlaktetemperatuur. Zeker in geval van goed isolerende gebouwcomponenten, waar het verschil tussen de oppervlakte- en omgevingstemperatuur typisch klein is, kan een afwijking van 0,5°C een groot verschil in U-waarde opleveren.

Voorbeeld 1

 $\theta_i = 20$ °C, $\theta_e = 3$ °C, $h_i = 7,7$ W/m²K. De binnenoppervlaktetemperatuur van een wand gemeten met thermografie is 19,5 °C. Bij een tweede meting wordt een binnenoppervlaktetemperatuur van 19°C gemeten.

$$U_{\text{meting1}} = 7,7 \cdot \frac{20^{\circ}C - 19,5^{\circ}C}{20^{\circ}C - 3^{\circ}C} = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{meting2}} = 7,7 \cdot \frac{20^{\circ}C - 19,0^{\circ}C}{20^{\circ}C - 3^{\circ}C} = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Volgens de tweede meting zou de wand niet meer voldoen aan de huidige normering voor nieuwbouw, terwijl de meetafwijking in de thermografische meting wel aanvaardbaar lijkt. Daarnaast dient de meetnauwkeurigheid van de binnen- en buitentemperatuur ook in rekening gebracht te worden. Voor bijvoorbeeld U_{si} kan de meetfout berekend worden volgens formule [20] (56). De warmteovergangscoëfficiënt h_i komt niet voor in deze uitdrukking omdat deze voor de eenvoud als een constante beschouwd werd.

$$\Delta U_{si} = \frac{\Delta \theta_i + \Delta \theta_{si}}{|\theta_i - \theta_{si}|} + \frac{\Delta \theta_i + \Delta \theta_e}{|\theta_i - \theta_e|}$$
(%) [20]

Met $\Delta \theta_i$ en $\Delta \theta_e$ de meetfout op de binnen- en buitentemperatuur. In het onderzoek was de meetnauwkeurigheid van de sensoren $\pm 0,21$ °C. $\Delta \theta_{si}$ is de meetfout op de thermografische meting ($\pm 0,5$ °C).

Voorbeeld 2:

Toegepast op meting 2 uit het rekenvoorbeeld wordt de fout op de U-waarde:

$$\Delta U_{si} = \frac{0,21+0,5}{|20-19|} + \frac{0,21+0,21}{|20-3|} = 0,73$$

 \rightarrow U_{meting2} = 0,45 W/m²K ±0,73*0,45 = 0,45 W/m²K ±0,32 W/m²K

Wanneer het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur kleiner wordt, zal de fout op de U-waarde nog hoger zijn zoals uit formule [20] blijkt. Dit wordt ook geïllustreerd in hoofdstuk 2, Figuur 12, waar de foutmarge op de U-waarde steeds kleiner wordt naarmate het temperatuurverschil toeneemt.

2 Thermische prestaties van wanden: Twee cases

In de volgende onderdelen worden twee in-situ metingen toegelicht, waarbij geprobeerd werd om de U-waarde te bepalen. Deze voorbeelden maken duidelijk dat het in de praktijk zeer moeilijk is om een U-waarde te bepalen op basis van thermografische metingen, zowel voor wanden met een hoge als een lage warmtecapaciteit.

2.1 Case 1: De massieve wand

Als eerste casestudie werd een massieve voorgevel onderzocht van een rijwoning in het centrum van Gent (Figuur 46). Deze gevel is georiënteerd naar het zuiden en is gericht naar de rijwoningen aan de andere kant van de weg. De binnenkant van deze wand grenst aan de leefruimte.

De wand is opgebouwd uit 30 cm metselwerk met een pleisterlaag van 2 cm aan de binnenkant. Het gelijkvloers wordt verwarmd door een vloerverwarmingssysteem. Op Figuur 46 (links) is de zone aangeduid waar de oppervlaktetemperatuur met thermografie afgelezen werd.



Figuur 46 (a): aanzicht van de massieve voorgevel. (b): Snede van de wand.

De buitentemperatuur werd rechts van de erker gemeten, ook aangeduid op de Figuur 46. De binnentemperatuur werd opgemeten op 4 meter afstand van het raam, op een kast. Om de Uwaarde uit de thermografische metingen te controleren, werden warmtefluxmetingen uitgevoerd van 31 januari 2014 tot en met 27 maart 2014. Er werden sensoren voor de binnen- en buitenoppervlaktetemperatuur geplaatst om de meetwaarden met thermografie te vergelijken.

Er werden thermografische metingen uitgevoerd aan het buitenoppervlak op 12, 17, 18 en 21 februari 2014. Figuur 47 vat de meetresultaten samen. In deze meetperiode was er veel variatie in de weeromstandigheden. Er is te zien dat de thermografische meting nauwelijks afweek van de buitenoppervlaktetemperatuur gemeten met sensoren op het buitenoppervlak. Op 12/02 en 18/02 was de hemel bewolkt tijdens de meting, maar enkele uren voor de thermografische meting was er een open hemel.



Figuur 47 Verloop van de binnentemperatuur, buitentemperatuur, buitenoppervlaktetemperatuur gemeten met een thermokoppel en overzicht van de thermografische metingen van de buitenoppervlaktetemperatuur (oranje punten) onder verschillende weersomstandigheden.

Hoewel de metingen op 12/02 en 18/02 in bewolkt weer met windsnelheden van respectievelijk 1,4 m/s en 0,3 m/s, toont de berekening van de U-waarde dat de straling van de hemelkoepel nog een invloed had op de gemeten oppervlaktetemperaturen (Figuur 48). Op 12/02 en 18/02 ligt de berekende U_{se} veel lager dan de U-waarde die afgeleid werd uit de warmtefluxmetingen. Hieruit blijkt dat het aanbevolen is om wachttijden na het opkomen van de bewolking (hoofdstuk 2 §2.1.2) te respecteren zodat de oppervlaktetemperatuur niet meer beïnvloed wordt door de straling van de hemelkoepel.

Figuur 47 toont verder ook dat de meting op 17/02 plaatsvond terwijl er bezonning was op de gevel. Dit is te zien aan de steile piek in de buitentemperatuur. Door de invloed van de zonnestraling, werd met de meting van 17/02 een U_{se} -waarde van maar liefst 65 W/m²K bekomen (Figuur 48).



Figuur 48 Vergelijking van de U –waarden, berekend uit de thermografische metingen op het buitenoppervlak (oranje punten) met de U-waarde berekend uit de warmtefluxmetingen (U_{flux} = $1,51 \pm 0,20$ W/m²K).

De enige meting die toelaatbaar afwijkt van U_{flux} was de meting op 21/02, waar er voorafgaand aan de meting minstens 30 uur zware bewolking was. Figuur 48 toont echter dat de onzekerheid op deze U-waarde \pm 1,07 W/m²K bedraagt, ook al ging de thermografische meting onder ideale omstandigheden door.

2.2 Case 2: De houtskeletwand

Als tweede casestudie werd de oostgevel van een houskeletwand uitgekozen (Figuur 49). Deze wand grenst aan de leefruimte van een alleenstaande woning. Het gelijkvloers werd verwarmd door middel van radiatoren. Warmtefluxmetingen vonden plaats van 5 februari 2014 tot 27 maart 2014. Daarbij werden warmtefluxsensoren zowel op als tussen het houten stiilwerk geplaatst (zie IR-foto Figuur 49). De buitentemperatuur werd op 50 cm van het buitenoppervlak gemeten, de binnentemperatuur werd op ongeveer 4 m van het binnenoppervlak gemeten.



Figuur 49 Links: Aanzicht en infraroodfoto van het binnenoppervlak van de houtskeletwand. Rechts: doorsnede.

Figuur 50 en Figuur 51 tonen de temperatuurmeting en de Uwaarde berekening. In deze case wijken de thermografische metingen van de oppervlaktetemperaturen wel sterk af van de meting met de temperatuursensoren. Dit zou te wijten kunnen zijn aan een minder goede hechting van de temperatuursensoren aan het binnen- en buitenoppervlak door o.a. de poreuze gevelsteen. Bij thermografie bestaat dit risico uiteraard niet. Daar werd de binnenoppervlaktetemperatuur afgelezen ter hoogte van de isolatie, tussen de houten kepers.

Op 12/02 was er een heldere hemel tijdens de meting en scheen de zon. De meting werd rond 16u. uitgevoerd waardoor kan aangenomen worden dat de oostgevel al minstens 4 uur kon afkoelen. Op 17/02 werd de meting 's avonds uitgevoerd, rond 21u. Aangezien de metingen op een oostgevel plaatsvonden, was het buitenoppervlak reeds beschaduwd op het moment van de meting. Op 27/02 was het de hele dag bewolkt. Dit is te zien aan het verloop van de buitentemperatuur op die dag. Ondanks de verschillende weersomstandigheden, vallen de **U-waardes** berekend uit de thermografische meting binnen de onzekerheidsintervallen (Figuur 51). Deze intervallen zijn echter zo groot dat het onmogelijk is om een onderscheid te maken tussen oppervlakken ter hoogte van de draagstructuur en de isolatie. De U-waardes kunnen variëren van 0 tot 2,08 W/m²K,

afhankelijk van de meetfout op de binnen- en buitentemperatuur en thermografie.



Figuur 50 Overzicht van de thermografische metingen van de buitenoppervlaktetemperatuur (oranje punten) met de weersomstandigheden, binnen- en buitentemperatuur voorafgaand en tijdens de meting.



Figuur 51 Vergelijking van de U -waarden, berekend uit de thermografische metingen van de buitenoppervlaktetemperatuur (oranje punten), binnenoppervlaktetemperatuur (groene punten) en een combinatie van beide (rode punten), met de U-waarde berekend uit de fluxmetingen. De fout op de U-waarde van de thermografische meting varieert van ± 0.77 W/m²K en ± 1.44 W/m²K.

2.3 Besluit

Deze twee casestudies tonen aan dat het bijzonder moeilijk is om een betrouwbare U-waarde te bepalen op basis van meetfout thermografische De metingen. op de oppervlaktetemperatuur en de binnen- en buitentemperatuur zorgen voor een groot onzekerheidsinterval, ook al werden de metingen uitgevoerd in gunstige weersomstandigheden.

Afhankelijk van de thermische massa van de wand, situeert het probleem zich op een ander vlak:

- Bij thermisch zware wanden moet 36 uur gewacht worden na het optreden van gunstige weersomstandigheden (geen zon, zware bewolking, windsnelheid onder 1 m/s) vooraleer de wand terug de statische toestand representeert. Hierdoor wordt het quasi onmogelijk om thermografische metingen uit te voeren die nauwkeurig genoeg zijn voor een U-waarde bepaling.
- Bij thermisch lichte en goed geïsoleerde wanden is de wachttijd veel beperkter, loopt het onzekerheidsinterval waarbinnen de U-waarde kan variëren zeer hoog op. In de tweede case werd bijvoorbeeld een U_{sise} waarde bekomen van 0,91±1,18 W/m²K bekomen. Op basis van toevallige meetfouten die aanvaardbaar zijn voor thermografische metingen en temperatuurmetingen -, kon de U-waarde in dit geval variëren tussen 0 en 2,09 W/m²K, wat uiteraard een zeer grote marge is.

3 Thermische prestaties van glas

Door de steeds strengere eisen omtrent energiezuinigheid is de glassector de laatste decennia sterk geëvolueerd. Enkelvoudige beglazing wordt vandaag typisch vervangen door dubbele of drievoudige beglazing, waarbij ook de vulling tussen de glasbladen is geëvolueerd. Bij de eerste types dubbele beglazingen werd de spouw met lucht gevuld, vandaag worden edelgassen zoals argon of krypton gebruikt. Deze gassen hebben een hogere densiteit, viscositeit en een lagere conductiviteit dan lucht, wat resulteert in een beter isolerende beglazing. Daarnaast worden diverse coatings aangebracht, welke dikwijls een lage emissiviteit kennen (low-e coating).

Om de thermische eigenschappen te controleren, wordt de Uwaarde van de beglazing bepaald bij productie (57) (58) (59). Dit gebeurt steeds in labo-omstandigheden en geeft een vrij nauwkeurig resultaat (60). Controlemetingen in situ gebeuren echter zelden. De apparatuur om low-e coating te traceren of gasconcentraties te meten, is niet toepasbaar op alle glastypes en bij alle gasconcentraties. Uit de praktijk blijkt nochtans dat er vaak onvoldoende gas aanwezig is in de spouw omwille van een verkeerde vulling of een lek in de afdichting. Voor deze problematiek kan thermografie een zeer interessante inspectietool zijn, omdat het een contactloze en snelle methode is.

3.1 Glas en infraroodstraling

3.1.1 Transmissie, emissiviteit en reflectie

In het infraroodbereik verschilt glas niet zoveel van andere bouwmaterialen. In de golflengtes tussen 4 μ m en 14 μ m treedt geen transmissie op (τ) doorheen het glas (61). Glas laat dus geen infraroodstraling door, waardoor een thermografisch beeld enkel de oppervlaktetemperaturen van het glas toont. Dit is het geval voor elk glastype, ook in het geval een low-e coating wordt toegepast. De coating zit immers aan de binnenzijde van de spouw waardoor deze geen invloed heeft op de oppervlakteeigenschappen van het glas.

De emissiviteit van glas bedraagt 0,837 (14). Dit is een stuk lager dan de emissiviteit van de meeste bouwmaterialen (\geq 0,90). Dit betekent dat het bepalen van de gereflecteerde omgevingstemperatuur nog belangrijker wordt bij metingen op glas (zie hoofdstuk 2 §1). Verder is het belangrijk een observatiehoek van 40° t.o.v. de normaal van het oppervlak te respecteren tussen het glasoppervlak en de camera. Van zodra hierbuiten gemeten wordt, daalt de emissiviteit gevoelig (zie ook Hoofdstuk 2, §1.1) (62) (63) (64).

3.1.2 Spiegelreflectie

In tegenstelling tot de meeste bouwmaterialen, heeft glas een zeer glad oppervlak. Hierdoor is er sprake van spiegelreflectie, waarbij de straling die onder een bepaalde hoek α invalt op het glasoppervlak, onder dezelfde hoek wordt gereflecteerd. Zo is op Figuur 52 het spiegelbeeld van een warmwaterbuis te zien op het infraroodbeeld van het glas. Dit kan de aflezing van de

oppervlaktetemperatuur ernstig verstoren, zelfs indien een correcte emissiviteit werd ingesteld.

Gelukkig kan spiegelreflectie zeer eenvoudig uitgeschakeld worden door aan het glas een oppervlaktemodificerend materiaal met gekende hoge emissiviteit aan te brengen. Hiervoor kunnen dezelfde materialen gebruikt worden als op Figuur 8. Uiteraard moet de oppervlaktetemperatuur ter plaatse van het oppervlaktemodificerend materiaal afgelezen worden met de desbetreffende emissiviteit.



Figuur 52 Spiegelreflectie van infraroodstralen op het glasoppervlak. (IR-foto: ϵ =0,84, θ_{refl} = 17,1 °C)

In de praktijk

Wanneer een thermografische meting wordt uitgevoerd op een glasoppervlak, gesitueerd in een stedelijke omgeving, is het vaak onmogelijk om te weten welke tegenoverliggende gebouwen verwarmd worden, hoe de wandoppervlakken samengesteld zijn en welke wandoppervlakken nog invloed ondervinden van de weerscondities voor de meting. In zulk geval is zwarte elektrische tape (met $\varepsilon = 0.93$) een hulpmiddel om toch nauwkeurige metingen uit te voeren (Figuur 53).



Figuur 53 Thermografische meting waarbij zwarte tape werd aangebracht er plaatse van punten Sp1, Sp2 en Sp3

3.2 De thermografische meting op glas

Thermografie op glas geeft de beste resultaten in een omgeving met een uniforme temperatuur. Het is dus noodzakelijk dat:

- buitenmetingen in zwaar bewolkt weer plaatsvinden;
- binnenmetingen in een ruimte met een egale binnentemperatuur uitgevoerd worden.

3.2.1 Bewolkt weer geeft de beste resultaten

Voor nauwkeurige thermografische metingen op glas ($\pm 0,5$ °C), is het voldoende om in zwaar bewolkt weer te meten. In tegenstelling tot thermografie op wanden, is de wachttijd bij beglazing zeer beperkt. De tijdsconstante van een 4 mm dik glaspaneel is doorgaans 5 minuten. Dit betekent dat de zware bewolking maximum een half uur moet aanhouden voor metingen op de zwaarste types beglazing, zoals drievoudige beglazing. Om diezelfde reden heeft de windsnelheid een zeer kleine impact op de correctheid van de metingen (zie kader).

In de praktijk

Bij één casestudie op dubbel glas met een luchtspouw was de hemel volledig bewolkt. De gereflecteerde temperatuur was in dat geval gelijk aan de luchttemperatuur, gemeten met een sensor op 10 m van de gevel. Tijdens de metingen werden windstoten tot 13 m/s opgemeten. Ondanks deze hoge windsnelheid, is te zien dat de thermografische meting goed overeenstemt met de oppervlaktetemperatuur met de sensoren. De gemeten temperatuurmeting met thermografie valt binnen het

nauwkeurigheidsinterval van ± 0,5 °C (Figuur 55). (65)



Figuur 54: IR-foto van het buitenoppervlak van dubbele beglazing met luchtspouw. ε =0,84, θ_{refl} = 12,5 °C



Figuur 55 Vergelijking tussen temperatuurmetingen met thermografie ($\theta_{se, \, irt}$) en sensoren ($\theta_{se, \, sensor}$,). Ondanks de felle windstoten vallen de thermografische metingen binnen het onzekerheidsinterval. Omdat de temperatuursensoren zelf een thermische weerstand vormen wordt hiermee een lagere oppervlaktetemperatuur gemeten dan met thermografie. Het resultaat met thermografie is iets hoger omdat de sensoren door hun thermische weerstand lagere temperaturen meten.

Indien de thermografische meting echter gebruikt wordt voor de berekening van de U-waarde, dient de windsnelheid echter wel zo laag mogelijk te zijn. Hoge windsnelheden resulteren in een hoge convectieve warmteovergangscoëfficiënt $h_{e,c}$, waardoor de bekomen U-waardes overschat worden (zie §1.2).

3.2.2 Een uniforme binnentemperatuur

Binnenmetingen worden best uitgevoerd in ruimtes met een uniforme binnentemperatuur. In ruimtes waar gebruik gemaakt wordt van luchtverwarming, vloerverwarming of convectoren, kan het plafond, de vloer of delen van de wanden beïnvloed zijn door een warme luchtstroming. Glasoppervlaktes kunnen deze lokale temperatuurverschillen reflecteren, waardoor het glasoppervlak een hogere temperatuur lijkt te hebben.

In het geval de glaspartij voldoende groot is, zullen deze gereflecteerde oppervlaktes duidelijk herkenbaar zijn. Voor kleine glaspartijen kan een dergelijk beïnvloed oppervlak gereflecteerd worden over het volledige glasoppervlak, waardoor een foutieve aflezing van de binnenoppervlaktetemperatuur onopgemerkt blijft! Daarom worden thermografische metingen aan de binnenzijde best uitgevoerd wanneer de verwarming tijdelijk niet operationeel is (zie kader).

In de praktijk: Impact van verwarming en spiegelreflectie

belang van een uniforme binnentemperatuur Het kan geïllustreerd worden door twee in-situ metingen te vergelijken. Bij de eerste case werd de warme lucht onderaan de kamer toegevoerd. Het warme plafond werd duidelijk weerspiegeld op de bovenste helft van het glas. De binnenoppervlaktetemperatuur werd afgelezen in het midden van de glaspartij, net onder de weerspiegeling van het plafond (Figuur 56). De temperatuur was telkens ongeveer 1,5°C hoger dan de meetwaarde van de temperatuursensor. Ook na vergelijking met een simulatie van de oppervlaktetemperaturen. met de in-situ gemeten omgevingsparameters, werd duidelijk dat de aflezing met thermografie resulteerde in te hoge temperaturen door de spiegelreflectie van het warme plafond (65).



Figuur 56 IR-foto van het binnenoppervlak van dubbele beglazing met luchtspouw. ϵ =0,84, θ_{refl} = 21,7 °C

Bij een tweede case werd de binnenoppervlaktetemperatuur van het glas gemeten terwijl de vloerverwarming uitgeschakeld was. Wanneer de oppervlaktetemperatuur afgelezen werd op het binnenoppervlak van een goed geïsoleerde buitenwand in een uniforme binnentemperatuur, ruimte met een bleek de meetwaarde bekomen met thermografie binnen het nauwkeurigheidsinterval van ±0,5°C te vallen (Figuur 57) (65).



Figuur 57 IR-foto van het binnenoppervlak van drievoudige beglazing met argon in de spouw en low-e coating. ϵ =0,84, θ _{refl} = 24,4°C

3.3 Foutbronnen bij de U-waarde

Door zijn lage thermische massa, zijn thermografische metingen op glas doorgaans makkelijker haalbaar dan op (thermisch zware) wanden. Toch zorgt de lage thermische massa van glas er ook voor, dat de berekening van de U- en R-waarde heel gevoelig is voor verkeerde inschattingen van de warmteovergangscoëfficiënten h_i en h_{e_i} en voor meetfouten in de binnen- en buitentemperatuur, welke tot onbetrouwbare resultaten kunnen leiden.

3.3.1 Verkeerde inschatting van de warmteovergangscoëfficiënt

$h_{e,c} \, te \, hoog \, door \, hoge \, winds nelheid$

Een hoge windsnelheid heeft geen impact op de meting van de oppervlaktetemperatuur (zie hoger), maar verhoogt wel de impact van $h_{e,c}$ op de berekening van de U- en R-waarde. Bij een overschatting van de windsnelheid, wordt een te hoge waarde van $h_{e,c}$ aangenomen, en zullen de thermische prestaties onderschat worden.

Om de invloed van een hoge windsnelheid op de berekening te beperken, moet het temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenomgeving voldoende groot zijn. (zie Figuur 12). Bij één case werden windsnelheden tot 3,2 m/s toegelaten aangezien het temperatuurverschil tussen binnen en buiten meer dan 30 °C bedroeg (zie kader).

Praktijk: hogere windsnelheid, hoger temperatuurverschil nodig

Tijdens het onderzoek werd een dubbele glasplaat met luchtspouw geplaatst in een verwarmde geïsoleerde testbox. Deze geplaatst (Figuur werd buiten 58). waardoor temperatuurverschillen van 30 °C en meer konden gecreëerd worden. In deze case liep de windsnelheid op tot 3,2 m/s (windsnelheid op 2 m). In combinatie met het hoge temperatuurverschil kon een vrij betrouwbare R-waarde afgeleid worden. Indien de windsnelheid echter overschat zou worden tot 6 m/s (windsnelheid op 10 m hoogte), zou de R-waarde berekend met thermografie veel te laag ingeschat worden (Figuur 58 en Figuur 59).



Figuur 58 (a) Opstelling in de testbox. (b): Inschatting windsnelheid uitgaande van metingen (Weerstation Vlissingen), omgerekend naar de juiste hoogte (66)



Figuur 59 R-waardes berekend met de verschillende windsnelheden.

De relatie tussen de windsnelheid (en bijgevolg $h_{e,c}$) en het temperatuurverschil binnen-buiten (θ_i - θ_e) maakt het moeilijk om een absolute maximumgrens te definiëren voor de windsnelheid. Daarom wordt aangeraden om het glas zoveel mogelijk af te schermen van de wind.

Praktijk: Raam in een nis

Ramen in een nis zijn meestal afgeschermd van de wind en dus ideaal om thermografische metingen op uit te voeren ter bepaling van de U-waarde. Bij één casestudie op drievoudige beglazing, is enkel de impact van de straling van de hemelkoepel te zien in de berekening van de R-waarde (Figuur 60 en Figuur 61). De windsnelheid tijdens de meting bedroeg maximum 1,5 m/s. Het temperatuurverschil tussen binnen en buiten bedroeg 20 °C.



Figuur 60 (a) 9u42, helder weer, θ_{refl} =-11,4 °C. (b) 10u07, opkomende bewolking, θ_{refl} =-5 °C. (c): 11u03, zwaar bewolkt, θ_{refl} =-1,4 °C. Alle beelden: ϵ =0,93, buitenmeting (d) gewone foto van het raam.

Figuur 61 toont de R-waardes berekend uit de buitenoppervlaktetemperaturen met thermografie. Hierop is te zien dat de metingen op de zwarte emissiviteitstape, bij zware bewolking zeer dicht aansluiten bij de R-waarde bepaald uit de warmtefluxmetingen.



h_{i,c} te hoog door verwarmingstoestellen

Verwarming verstoort de thermografische meting op glas op meerdere vlakken. Spiegelreflectie van warmere oppervlakken kunnen de aflezing van de oppervlaktetemperaturen verhinderen (zie §3.2.2). Verwarmingstoestellen die onder of voor een raam geplaatst zijn, verwarmen de onderkant van het raam waardoor metingen onbetrouwbaar worden (Figuur 62) (65).



Figuur 62 Effect van de vloerverwarming op het binnenoppervlak van glas (65). Onderaan zijn de oppervlaktetemperaturen hoger dan bovenaan.

Daarnaast heeft verwarming vlak bij een raam invloed op de convectieve warmteovergangscoëfficiënt langs het 117 binnenoppervlak $h_{i,c}$. In dit geval zal warme lucht van onder naar boven langs het raam stromen, waardoor $h_{i,c}$ in werkelijkheid groter zal zijn dan wat berekend werd met formule [17].

Door een hogere binnenoppervlaktetemperatuur enerzijds en een onderschatting van de warmteovergangscoëfficiënt h_i anderzijds, zal de R-waarde berekend uitgaande van de binnenoppervlaktetemperatuur van een raam nabii een verwarmingstoestel overschat worden. Verwarmingstoestellen worden dus best uitgeschakeld vooraleer thermografische metingen plaatsvinden.

3.3.2 Gevoeligheid voor de omgevingstemperatuur

Zoals aangegeven in §1.3 van dit hoofdstuk, is de U- en R-waarde berekening van dunne materialen zeer gevoelig voor meetafwijkingen in de binnen- en buitentemperatuur. Ook al worden de thermografische metingen uitgevoerd in zwaar bewolkt, windstil weer, een afwijking van de binnentemperatuur kan de berekende R-waarde sterk doen afwijken van de werkelijke waarde. Daarnaast is het moeilijk om een representatieve binnentemperatuur te bepalen in verwarmde ruimtes (zie kader). Indien thermografische metingen uitgevoerd worden om de U- of R-waarde te bepalen van beglazing, moet het meetrapport daarom welke waar. wanneer hoogte de aangeven en op binnentemperatuur gemeten werd (65).

Praktijk: Welke binnentemperatuur is het meest geschikt?

Bij één in-situ meting werd, tijdens een *co-heating* test, thermografie toegepast aan de binnenzijde van een drievoudige beglazing. De binnentemperatuur werd op verschillende locaties gemeten in de woning, waaronder in de leefruimte aan het raam en de inkomhal rechts van het raam (Figuur 63). De gemeten binnentemperaturen op beide locaties wijken nauwelijks af van elkaar, hoewel de temperatuur in de woonkamer ongeveer 0,5 °C lager ligt en onstabieler is dan de temperatuur in de inkomhal. De thermografische meting werd uitgevoerd terwijl het buiten zwaar bewolkt en windstil was. Het raam bevond zich in een nis.



Figuur 63 (a) Grondplan van de woning met aanduiding van de meetpunten van de binnentemperatuur. (b) Verloop van de binnentemperatuur in de leefruimte en de inkomhal tijdens de thermografische meting.

De R-waarde berekening met beide temperaturen toont duidelijk aan dat het zeer moeilijk is om met thermografie een betrouwbare R-waarde te berekenen, ook al is de meting van de oppervlaktetemperatuur zelf in ideale omstandigheden verlopen.



Figuur 64 R-waardes berekend uitgaande van de gemeten binnentemperatuur in de leefruimte (blauw) en in de inkom (rood). Hoewel de binnentemperatuur in de woonkamer een logische keuze lijkt omdat het raam zich hier bevindt, wijken de R-waardes berekend met de binnentemperatuur van de inkom minder af van de werkelijke R-waarde.

3.4 Welke glastypes zijn te onderscheiden?

Ondanks de mogelijkheid om d.m.v. thermografische metingen oppervlaktetemperaturen van glas te bepalen die zich binnen de aanvaarbare marges ($\pm 0,5$ °C) bevinden, is de U- en R-waarde berekening zeer gevoelig voor onnauwkeurigheden van de warmteovergangscoëfficiënt aan het binnen- en buitenoppervlak en van de binnen- en buitentemperatuur. Hoewel het niet mogelijk is om de thermische prestaties nauwkeurig te bepalen, kan met thermografie tot op zekere hoogte toch een onderscheid gemaakt worden in de verschillende glastypes. Zo kunnen types met en zonder coating onderscheiden worden, maar types met meerlagige glasbladen, low-e coating of drievoudige beglazing dan weer niet (Figuur 65).

Dit kan bovendien enkel als de volgende randvoorwaarden voldaan zijn:

- Zwaar bewolkt weer
- Windstil weer
- Een uniform verdeelde binnentemperatuur
- Minstens 10 °C verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur
- Geen invloed van verwarmingselementen op de binnenoppervlaktetemperatuur en de convectieve warmteovergangscoëfficiënt h_{i,c}



Figuur 65 U-waardes bepaald op basis van de gesimuleerde binnenoppervlaktetemperatuur van zes verschillende glastypes met minimum 10 °C verschil tussen binnen en buiten, in bewolkt weer. De U-waardes berekend uit de simulaties verschillen t.o.v. de theoretische U-waarde (U_{en673}) door een variërende windsnelheid en temperatuurverschil tussen binnen en buiten in de simulaties.

Figuur 65 toont ook dat een bepaling van de thermische prestaties met thermografie niet nauwkeurig genoeg is om de gasconcentratie in een spouw van een glastype te controleren. Naast de grote spreiding op de U-waarde, is de impact van het gas op de oppervlaktetemperaturen te klein om met temperatuursensoren of thermografie waar te nemen (Figuur 66). Er zouden dus zeer nauwkeurige camera's nodig zijn om aan de hand van de oppervlaktetemperatuur een verschil te zien tussen een glastype met en zonder argon, of om een ontoereikende gasconcentratie waar te nemen.



Figuur 66 (a) Vergelijking tussen de binnenoppervlaktetemperaturen van dubbele beglazing met lucht en met argon. (b) Vergelijking tussen de buitenoppervlaktetemperaturen van dubbele beglazing met lucht en met argon.

Hoofdstuk 5: Thermografie en luchtdichtheid

Een belangrijke toepassing van thermografie op de gebouwschil is het opsporen van luchtlekken. Dit kan gerealiseerd worden door thermografische combineren de meting te met een luchtdichtheidstest. In een dergelijke test wordt een gebouw in over- of onderdruk gezet om het totale lekdebiet te meten. Terwijl het gebouw in onder- en overdruk wordt gezet, monitort de IRcamera de temperatuursverandering aan een luchtlek. Typisch aan luchtlekken is dat de oppervlaktetemperatuur verandert in de tijd (Figuur 67). Op deze manier kan men beoordelen of een afwijkende oppervlaktetemperatuur veroorzaakt wordt door een koudebrug, vocht of door een luchtlek.



Figuur 67 Thermografie in combinatie met een luchtdichtheidstest aan de binnenzijde van een raamaansluiting, onder een constant drukverschil van -50 Pa. De paarse zone toont de koudere zone rondom het raam, veroorzaakt door de koude infiltratielucht.

Bij een meting aan de binnenzijde zal de infiltratie van koude buitenlucht zich aftekenen op de thermografische beelden. Indien de meting aan de buitenzijde gebeurt, zal de exfiltratie van warme binnenlucht zich aftekenen op het buitenoppervlak. Metingen aan de buitenzijde zijn echter af te raden. Door de verschillende weersomstandigheden kan het immers gebeuren dat luchtlekken minder zichtbaar zijn op het buitenoppervlak. In dit boek worden dan ook enkel binnenmetingen met thermografie besproken voor het opsporen van luchtlekken.

1 Werkwijze

Bij het opsporen van luchtlekken met thermografie worden twee meetprocedures gecombineerd: de richtlijnen uit de norm NBN EN 13829 '-Thermische eigenschappen van gebouwen - Bepaling van de luchtdoorlatendheid van gebouwen-' (67) en anderzijds de richtlijnen voor thermografie uit hoofdstuk 2 §1, §2.2 en §3.

Voor het opsporen van luchtlekken met thermografie zijn volgende zaken nodig:

- Pressurisatietoestel
- IR-camera
- Afplaktape
- Emissiviteitstape
- Thermometer
- RV-meter
- Grondplannen

- Computer
- Meter
- Statief
- Fototoestel
- Anemometer
- Krijt
- Zilverpapier

Daarnaast dient het volgende op voorhand te gebeuren:

- Opvragen van de bouwplannen
- Navraag naar materiaaleigenschappen en opbouw
- Inschatten van de invloed van verwarmingstoestellen
- Maken van eventuele afspraken over het vrijmaken van wanden en opwarmen van de te evalueren ruimtes
- Plaatsen van logger binnen voor de meting van binnentemperatuur en relatieve vochtigheid
- Opvolgen van weerdata van de voorafgaande dagen (Hoofdstuk 2 §2.2)
- Prospectie van interessante meetplaatsen
- Op voorhand controleren op de aanwezigheid van koudebruggen en isolatiegebreken met behulp van thermografie

Het is aan te raden om eerst een algemene inspectie uit te voeren van het gebouw vooraleer het gebouw in over- of onderdruk te plaatsen om luchtlekken op te sporen. Wanneer de temperatuurvariatie wordt veroorzaakt door een koudebrug zal de afkoeling door infiltratie van koude lucht niet zichtbaar zijn met thermografie. Tijdens de inspectie op luchtlekken, kan de volgende procedure aangehouden worden [NBN EN 13829 (67) en hoofdstuk 2 §1, §2.2 en §3]. Daarbij wordt best een constant drukverschil aangehouden:

- 1. Plaatsing van aluminiumfolie en emissiviteitstape ter plaatse van de op te meten objecten
- 2. Meetpositie bepalen
- 3. Uitschakelen van de mechanische ventilatie (conform NBN EN 13829)
- 4. Afplakken van ventilatieroosters en andere luchtopeningen (conform NBN EN 13829)
- 5. Sluiten van ramen en deuren (conform NBN EN 13829)
- 6. Let op dat er geen lucht kan ontsnappen via de wateraflopen, bv. bij wastafels en spoelbakken (conform NBN EN 13829)
- 7. Opmeten van de invloedrijke buitenparameters + tijdstip:
 - a. Buitentemperatuur
 - b. Relatieve vochtigheid
 - c. Windsnelheid
- 8. Plaatsing van het pressurisatietoestel en toebehoren
- 9. Opmeten van de invloedrijke binnenparameters+tijdstip:
 - a. Binnentemperatuur
 - b. Relatieve vochtigheid
 - c. Afstand camera-object
 - d. Emissiviteit en gereflecteerde temperatuur
- 10. Maken van een thermografische foto van de te inspecteren plaatsen, voor de start van de luchtdichtheidstest
- 11. Opstarten van de ventilator met een eerste constant drukverschil
- 12. Maken van thermografische beelden met constante tijdsintervallen (bijvoorbeeld 1 minuut) of een video opnemen met de infrarood camera, gedurende een bepaalde periode (bijvoorbeeld 30 minuten)
- 13. Stopzetten van de ventilator en ruimte terug op natuurlijk drukverschil laten komen (bijvoorbeeld door het openen van een raam/deur)

- 14. Nieuwe opmeting van de invloedrijke buiten- en binnenparameters + tijdstip
- 15. Maken van een nieuwe referentiefoto van de gewenste wanden
- 16. Opstarten van de ventilator met een tweede constant drukverschil, hoger dan het eerste constante drukverschil
- 17. Maken van thermografische beelden met constante tijdsintervallen (bijvoorbeeld 1 minuut) of een video opnemen met de infrarood camera, gedurende een bepaalde periode (bijvoorbeeld 30 minuten)
- 18. Stopzetten van de ventilator en ruimte terug op natuurlijk drukverschil laten komen (bijvoorbeeld door het openen van een raam/deur)
- 19. Indien gewenst kunnen stappen 14 tot 18 nog eens herhaald worden voor een hoger drukverschil
- 20. Indien nodig n₅₀-waarde bepalen (conform NBN EN 13829)

2 Externe invloedsfactoren

2.1 Aanbevelingen volgens de normen

In de huidige normdocumenten worden zelden specifieke randvoorwaarden vermeld voor het opsporen van luchtlekken met thermografie. In de meeste richtlijnen wordt zelfs geen onderscheid gemaakt tussen het opsporen van isolatiegebreken en luchtlekken, waardoor richtlijnen in verband met het drukverschil ontbreken. Wanneer er wel minimale temperatuurverschillen voor het opsporen van luchtlekken aanbevolen worden, vermelden de normen verschillende waarden (Tabel 21). Er is dus nood aan duidelijke richtlijnen voor het temperatuur- en drukverschil.

Tabel 21 Overzicht van de 3 normen die specifiek voor luchtdichtheidstesten en thermografie richtlijnen meegeven.

	Temperatuurverschil θ_i - θ_e	Drukverschil
RESNET (34)	> 1,7°C	> 10 – 20 Pa
ASHRAE Journal (10)	> 3°C	
BSRIA (35)	> 5°C	

2.2 Impact van het drukverschil

Simulaties tonen aan dat het drukverschil een beperkte invloed heeft op de verandering in oppervlaktetemperatuur aan een luchtlek. In het onderzoeksproject werd een raamaansluiting met 20 Pa en 100 Pa onderdruk gesimuleerd, met 20 °C verschil tussen binnen en buiten (Figuur 68). De binnenoppervlaktetemperatuur was na 10 minuten 2 °C lager wanneer een drukverschil van 100 aangehouden werd. Bij 20 Pa drukverschil was Pa de oppervlaktetemperatuur aan het lek 1°C gezakt na 10 minuten en dit bleef zo gedurende de hele simulatie (tot minuut 30). Op 20 het luchtlek is het verschil mm van in oppervlaktetemperatuursverandering tussen 20 Pa en 100 Pa minder dan 0,5 °C.

Vergeleken met de nauwkeurigheid van de meeste IR-camera (±2°C), heeft het drukverschil in deze simulatie geen significante invloed op de verandering van de oppervlaktetempraturen ter hoogte van het luchtlek.



Figuur 68 Simulatiemodel van de raamaansluiting. De oppervlaktetemperaturen van Figuur 69 en Figuur 72 werden uitgelezen langs lijn L1.





Figuur 69 Impact van het drukverschil (20 Pa en 100 Pa) op de oppervlaktetemperaturen langs lijn Li1 (op Figuur 68). Het luchtlek in het model is 10 mm breed.

> Hoofdstuk 5: Luchtdichtheid en thermografie 126

Uit de praktijk: wat met de wind?

Wanneer er veel wind is, wordt automatisch een drukverschil tussen binnen en buiten gecreëerd. Luchtlekken die een vlamvormig patroon op het oppervlak veroorzaken zijn dan direct herkenbaar (Figuur 70). In zulke gevallen zal de oppervlaktetemperatuur niet veranderen wanneer nog een drukverschil opgelegd wordt en is het niet nodig om meerdere infraroodbeelden te maken.



Figuur 70 (a) startbeeld van een raam op de 5de verdieping van een flatgebouw aan de windzijde. (b) beeld na 20 minuten. Er is nauwelijks een temperatuurdaling in de oppervlaktetemperatuur, maar door het vlamvormige patroon is het duidelijk dat we met een luchtlek te maken hebben (42).

Er zijn echter ook luchtlekken die geen vlamvormig patroon achterlaten (Figuur 71). Door de aanhoudende wind is de oppervlaktetemperatuur zodanig afgekoeld dat geen temperatuursverandering meer lijkt te zijn. Daardoor lijken het eerder koudebruggen te zijn. Verdere analyse is dan nodig (§4). In dit geval is het maken van meerdere beelden noodzakelijk, in combinatie met een hoger drukverschil dan aanwezig op dat moment.



Figuur 71 (a): startbeeld van een raam op de 10de verdieping van een flatgebouw aan de windzijde. Er was een zichtbare opening rechts bovenaan het raam. (b): beeld na 20 minuten. Op het IR-beeld is er enkel een luchtlek te merken aan de hoek. Door de oppervlaktetemperatuur voor en na de onderdruk te vergelijken, werd duidelijk dat het om een luchtlek ging (42).

2.3 Impact van het temperatuurverschil

Volgens de normen zouden temperatuurverschillen tot 5 °C (Tabel 21, p125) voldoende zijn om luchtlekken met thermografie te detecteren. Volgens de simulaties die werden uitgevoerd in dit onderzoeksproject zou echter een temperatuurverschil van minimum 10 °C aanwezig moeten zijn om in een tijdsbestek van 25 minuten een daling van 1 °C te zien bij een luchtlek met 10 mm breedte. Figuur 72 toont de resultaten van de simulaties van de raamaansluiting, onder een constant drukverschil van 20 Pa en verschillende temperatuurverschillen tussen binnen en buiten.

Uit de in-situ metingen bleek echter dat een temperatuurverschil van 10 °C tussen binnen en buiten niet noodzakelijk is als het enkel de bedoeling is om luchtlekken te visualiseren. Bij lage temperatuurverschillen tussen binnen en buiten kan gebruik gemaakt worden van een smallere lens, hogere IR-resolutie en een kleinere temperatuurschaal om luchtlekken beter zichtbaar te maken. Bovendien gelden de simulatieresultaten van Figuur 72 voor een groot luchtlek dat 10 mm breed is. Bij kleinere luchtlekken zal de infiltratielucht sneller langs het oppervlak strijken, waardoor de oppervlaktetemperatuur sneller zal dalen (Hoofdstuk 5, §3.3 van dit hoofdstuk). Ten slotte wordt de zichtbaarheid ook beïnvloed door de oppervlakken waarlangs de infiltratielucht strijkt (§3.1) en door de nabijheid van koudebruggen (§3.2).



Figuur 72 Invloed van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten op de oppervlaktetemperaturen langs lijn L1 (Figuur 68a). Een temperatuurverschil van 10°C geeft een verandering van 1°C vlak bij het luchtlek na 25 minuten onder 20Pa onderdruk, in de simulatie van de raamaansluiting. Hoe hoger het temperatuurverschil, hoe duidelijker luchtlekken afgetekend zullen zijn.

Natuurlijk geldt - net zoals bij isolatiegebreken-: hoe hoger het temperatuurverschil tussen binnen en buiten, hoe duidelijker luchtlekken afgetekend zijn op het binnenoppervlak.

3 Interne invloedsfactoren

3.1 Oppervlakken aan het luchtlek

Niet elk luchtlek zal zich op dezelfde manier manifesteren op een IR-beeld. Afhankelijk van de positie van het luchtlek (in een binnenhoek, in het vlak van een wand, in een raamaansluiting) zal dit meer of minder zichtbaar zijn op een IR-beeld. In het kader van dit onderzoeksproject werden een tiental voegen van een testhuisje onderzocht waarbij duidelijk werd dat niet ieder luchtlek even duidelijk gevisualiseerd werd op een IR-beeld. De voegen kunnen qua vorm onderverdeeld worden in drie types (Figuur 73).











Figuur 73 Overzicht van de verschillende aansluitingstypes (42).

Bij luchtlekken **in het vlak** is geen duidelijke aftekening zichtbaar. In de aansluiting op de IR-foto is enkel aan de uiteinden van de voeg een daling van de oppervlaktetemperatuur te zien (Figuur 73). De richting van de luchtstroom stond loodrecht op het vlak van de wand en kwam rechtstreeks de ruimte binnen, zonder ergens aan een oppervlak te strijken. In de case op Figuur 73 was de detaillering aan de hoeken van de aansluiting onvoldoende luchtdicht waardoor de koude lucht langsheen de kopse zijden van de langsvoeg binnenstroomde, waardoor het oppervlak aan de uiteinden wel afgekoeld was na 25 minuten. De zichtbaarheid van voegen in het vlak was in dit geval afhankelijk van de detaillering van onder andere de kopse uiteinden. Indien de opbouw van de aansluiting niet op voorhand gekend was, zou verkeerdelijk gedacht kunnen worden dat deze voeg niet luchtdicht was. Het is dus van belang om op voorhand de opbouw van een aansluiting te kennen om de richting van de luchtstroming te kunnen inschatten.

Bij **aansluitingen in een binnenhoek** wordt na enkele minuten een vlamvormig patroon zichtbaar. Door de locatie van het luchtlek in de hoek, kan de koude infiltratielucht langs het dak- of wandoppervlak strijken waardoor de oppervlaktetemperatuur daar zal dalen.

Bij **raam- en deuraansluitingen** ten slotte is ook het van belang om op voorhand te weten hoe de aansluiting opgebouwd is. Op die manier kan de stroming van de infiltratielucht voorspeld worden. In dit geval komt de lucht binnen via de minerale wol, waardoor het oppervlak daar afkoelt. Indien er een dag met veel wind zou zijn, was deze aansluiting al op voorhand afgekoeld en zou dit verkeerdelijk als een koudebrug gezien kunnen worden.

3.2 Luchtlek aan een koudebrug

Op locaties waar een luchtlek samen voorkomt met een koudebrug, duurt het langer vooraleer een duidelijke verandering in oppervlaktetemperatuur te zien is. De oppervlaktetemperatuur aan deze aansluitingen is immers af verlaagd onder invloed van de koudebrug.

Figuur 74 toont de simulatie van een wand-plafond aansluiting en wand-wand aansluiting, aan het begin van de luchtdichtheidstest. Het oppervlak waar een luchtlek en een koudebrug samen voorkomen (voeg plafond-wand) is na een half uur slechts 3,6°C afgekoeld, terwijl dit voor de aansluiting tussen twee geïsoleerde wanden al 4,9 °C is (Figuur 75).



Figuur 74 (a)Modellering van de wand-plafond en wand-wand aansluiting. (b) Beeld van de temperatuurverdeling aan het begin van de simulatie. Bij de wandplafond aansluiting is de oppervlaktetemperatuur initieel iets lager aan het lek.



Figuur 75 Verschil in thermische detaillering geeft een verschillende snelheid in de daling van de oppervlaktetemperatuur bij onderdruk en inspectie van binnenuit. In deze simulatie was de voeg plafond-wand uitgevoerd met een houten plank die een koudebrug vormt.

3.3 Breedte van een luchtlek

Indien een vaste constante onderdruk verondersteld is, zal de oppervlaktetemperatuur aan een groot luchtlek trager dalen dan aan een klein luchtlek. Bij een groot luchtlek zal de luchtsnelheid lager liggen, waardoor het oppervlak aan het luchtlek trager afkoelt.

Daarnaast komt de koude lucht bij grote luchtlekken ook zonder drukverschil binnen, waardoor vaak al na enkele minuten geen wijziging in de oppervlaktetemperatuur meer te zien is bij een opgelegde onderdruk (Figuur 76). Dit wil zeggen dat het maken van meerdere beelden in de tijd bij grote luchtlekken geen extra informatie zal opleveren. De oppervlaktetemperatuur zal zeer traag zakken of constant blijven. Meestal zijn deze lekken ook met het blote oog waarneembaar, waardoor thermografie allicht meer zal dienen om de invloed van het luchtlek op de omringende oppervlakken in kaart te brengen dan om de grootte van het lekdebiet door het luchtlek in te schatten.



Figuur 76 Bij grote luchtlekken komt de koude lucht ook zonder drukverschil binnen, waardoor vaak al na enkele minuten geen wijziging in de oppervlaktetemperatuur meer te zien is. In dit geval bleef de oppervlaktetemperatuur constant na 4 minuten. Dit effect is te vergelijken met situaties waarbij er veel wind is. (IR-foto: ε = 0,90, θ_{refl} = 20 °C) (42)

Voor smalle, kleine luchtlekken is het maken van een beeldensequentie echter wel noodzakelijk om ze zichtbaar te maken (Figuur 77). Enkel wanneer er veel wind is en de luchtlekken zich in een binnenhoek bevinden waardoor een vlampatroon zichtbaar wordt, zal dit niet noodzakelijk zijn.



Figuur 77 Voor kleine luchtlekken is het maken van meerdere beelden gedurende een lange tijd wel noodzakelijk om ze zichtbaar te maken (42).

4 Analyse van IR-beelden van luchtlekken

4.1 Beoordeling

4.1.1 Luchtlek onderscheiden van een koudebrug

Het grote onderscheid tussen een luchtlek en een koudebrug is het verloop van de oppervlaktetemperatuur in de tijd. Bij luchtlekken zal de binnenoppervlaktetemperatuur typisch dalen, bij een koudebrug blijft deze constant. Het maken van meerdere beelden tijdens de inspectie is noodzakelijk om achteraf een koudebrug van een luchtlek te kunnen onderscheiden. In de analyse kunnen de IRbeelden van elkaar afgetrokken worden waardoor enkel de oppervlakken die beïnvloed worden door een luchtlek zichtbaar blijven (Figuur 78).



Figuur 78 Door de oppervlaktetemperaturen van het startbeeld te verminderen met de oppervlaktetemperaturen na een bepaalde tijdsperiode (in dit voorbeeld 16 minuten) blijft enkel de temperatuurverandering over. Op die manier worden koudebruggen uit het beeld gefilterd en blijven enkel de zones beïnvloed door het luchtlek over.

4.1.2 Gebruik van de temperatuurfactor

Eén mogelijkheid om de ernst van luchtlekken te beoordelen, is met behulp van de temperatuurfactor [21]. De temperatuurfactor ligt tussen 0 en 1 en moet groter zijn dan 0,7[-] om oppervlaktecondensatie en schimmelvorming te vermijden (68):

$$f = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \ge 0.7 \quad [-]$$

Waarbij θ_{si} de temperatuur van het binnenoppervlak, θ_e de buitentemperatuur en θ_i de binnentemperatuur is. Hoe lager de temperatuurfactor, hoe groter de negatieve impact van het luchtlek is.

Ter illustratie

Het gebruik van de temperatuurfactor in de thermografische inspectie van luchtlekken is niet nieuw. In Estland werd een luchtdichtheidsstudie van 32 woningen uitgevoerd met behulp van een pressurisatietest en thermografie om de voornaamste oorzaken van luchtlekkage in kaart te brengen (69). Op Figuur 79 is een aansluiting tussen een muur en een plafond weergegeven samen met de temperatuurfactoren op drie punten voor en tijdens het in onderdruk zetten van de woning (ΔP = 50 Pa).


Figuur 79 Het opsporen en kwantificeren van luchtlekken: voor (links) en tijdens (rechts) het in onderdruk zetten van de woning (69).

In de labotesten die werden uitgevoerd in dit onderzoek werd nog een stap verder gegaan door de temperatuurfactor van een volledig IR-beeld te berekenen. Aangezien een IR-beeld bestaat uit een matrix met oppervlaktetemperaturen, is het relatief eenvoudig om via Excel of Matlab een volledig diagram van de temperatuurfactor te verkrijgen. Op die manier kunnen zones met een hoger risico op schimmelvorming gevisualiseerd worden.



Figuur 80 (a) Het thermografisch beeld van een luchtlek in een plafond-wand aansluiting. (b) diagram van de temperatuurfactor van hetzelfde beeld.

De berekening van de temperatuurfactor kan een manier zijn om de impact van één luchtlek op de omringende oppervlakken in te schatten. Hierbij is het belangrijk om de binnen- en buitentemperatuur dicht bij het luchtlek te meten. In grote ruimtes kan de binnentemperatuur aan een luchtlek in een plafondwandaansluiting immers enkele graden hoger zijn dan de binnentemperatuur aan de vloer-wandaansluiting, waardoor de temperatuurfactor niet representatief is als er met één gemiddelde binnentemperatuur gerekend wordt.

4.2 Onderlinge vergelijking is niet mogelijk

Op een thermografisch beeld lijkt het alsof het mogelijk is om de grootte van een luchtlek exact te kwantificeren en verschillende probleemaansluitingen volgens lekdebiet te rangschikken. Uit de labotesten en in-situ metingen werd echter duidelijk dat het in de praktijk onmogelijk is om het luchtlekdebiet op basis van thermografische beelden in te schatten.

Ten eerste is het niet mogelijk om bijvoorbeeld een luchtlek in het vlak te vergelijken met een luchtlek in een binnenhoek. Bij het laatste type worden vlamvormige patronen zichtbaar, terwijl de aftekening bij luchtlekken in het vlak afhankelijk is van de detaillering van de aansluiting (§3.1).

Het lekdebiet kan ook niet afgeleid worden uit de snelheid waarmee de oppervlaktetemperatuur aan een luchtlek verandert. De snelheid van deze verandering wordt bepaald door de detaillering van de aansluiting met luchtlek, de aanwezigheid van eventuele koudebruggen en de breedte van het luchtlek. De oppervlaktetemperatuur ter plaatse van een groot luchtlek zal minder snel dalen omdat de lucht er trager doorstroomt en omdat de oppervlakken al afgekoeld zijn. Wanneer de beelden van elkaar worden afgetrokken, zouden brede luchtlekken –soms ten onrechte- een kleinere impact op de oppervlaktetemperatuur vertonen.

Daaraan gekoppeld is het ook niet evident om de grootteorde en het verloop van de temperatuurfactor tijdens de inspectie van verschillende luchtlekken te vergelijken. In de labometingen en insitu metingen bleef de temperatuurfactor constant bij grote openingen (Figuur 81).



Figuur 81(a) IR-foto van een hoekaansluiting, waarbij de onderste helft een voeg van 7mm breed vertoonde (ter hoogte van de aanduiding). (b)Verloop van de temperatuurfactor in het punt op (a). Door de grote opening onderaan verandert het oppervlak aan het luchtlek niet van oppervlaktetemperatuur (42).

5 Besluit

Thermografie is een handige tool om luchtlekken op te sporen tijdens een pressurisatietest. Helaas zullen luchtlekken niet altijd duidelijk te onderscheiden zijn van een koudebrug. Dit is afhankelijk van de volgende zaken:

- De windsnelheid tijdens de inspectie: Indien er veel wind is voor en tijdens de inspectie, zullen enkel luchtlekken die een vlamvormig patroon aftekenen op het IR-beeld duidelijk zichtbaar zijn. Luchtlekken die geen vlamvormig patroon vertonen, zoals brede luchtlekken aan een raamaansluiting, kunnen verward worden met een koudebrug en vergen verdere analyse door een hoger drukverschil op te leggen en meerdere IR-beelden van elkaar af te trekken.
- De locatie van het luchtlek t.o.v. een koudebrug:
 - Bij koudebruggen is de binnenoppervlaktetemperatuur al lager dan bij wanddelen aan de isolatie. De oppervlaktetemperatuur zal dus hoogstens aan het begin van de pressurisatietest beperkt veranderen. Het maken van beeldensequenties kan soms helpen, vooral de beelden direct na het opleggen van het drukverschil zijn belangrijk.
- De voorkennis van de thermograaf De thermograaf zou voor de inspectie moeten weten hoe aansluitingen opgebouwd zijn om de richting van de luchtstroming zo goed mogelijk te kunnen voorspellen. Luchtlekken in het vlak kunnen lijken op koudebruggen. In

sommige gevallen kan het luchtlek verkeerdelijk aan de aansluiting toegeschreven worden, terwijl de lekkage misschien aan de kopse zijden van een aansluiting zit (zie Figuur 73). Met enige voorkennis kunnen bepaalde zaken al tijdens de inspectie uitgesloten worden.

Luchtlekken in een binnenhoek, bijvoorbeeld tussen plafond en wand, vloer en wand of ter plaatse van een raamaansluiting, laten een vlamvormig patroon achter en zijn altijd zichtbaar met thermografie van zodra er een druk- en temperatuurverschil aanwezig is. Hoe hoger deze verschillen, hoe duidelijker dergelijke luchtlekken te zien zijn.

1 Wat is actieve thermografie?

Sommige schadegevallen worden pas zichtbaar wanneer het oppervlak blootgesteld wordt aan een externe stralingsbron. Wanneer bewust gebruik gemaakt wordt van de zon of een andere warmtebron, wordt gesproken van actieve thermografie. Voor gebouwtoepassingen heeft actieve thermografie potentieel om bijvoorbeeld vocht- en luchtinsluitsels achter de façadepanelen van de buitengevel of onder het dakoppervlak op te sporen.

Luchtinsluitsels zullen sneller opwarmen en afkoelen dan intacte delen van een wand, terwijl dit bij vochtinsluitsels net trager gaat. Door een IR-beeld te nemen tijdens het opwarmen of afkoelen, zullen dergelijke schadefenomenen het duidelijkst zichtbaar worden. Figuur 82 toont bijvoorbeeld het effect van de zonnestraling op een luchtinsluitsel achter keramische gevelbekleding (70). Luchtinsluitsels onder een pleisterlaag kunnen ook perfect opgespoord worden met actieve thermografie (71).



Figuur 82 Luchtinsluitsels achter een keramische gevelbekleding opsporen (70)

Actieve thermografie wordt ook toegepast in de monumentenzorg, om bijvoorbeeld een beeld te vormen van vocht in muren of om de diepte van barsten onder het oppervlak in te schatten (72). In sommige gevallen kan de diepte van een barst exact berekend worden, maar dan moet de positie en intensiteit van de stralingsbron exact gemonitord worden.

Deze nauwkeurigheid is in de praktijk, bijvoorbeeld op een werf, niet altijd haalbaar. In de huidige bouwpraktijk zal actieve

thermografie dan ook voornamelijk gebruikt worden om schadegevallen zichtbaar te maken, zonder de hoeveelheid vocht of de diepte van de luchtinsluitsel te willen kwantificeren.

In het kader van dit onderzoeksproject werden twee casestudies uitgevoerd waarbij IR-lampen werden gebruikt als stralingsbron. Er werd ook een nagevulde spouw met luchtholte gemodelleerd om de impact van de zonnestraling op de zichtbaarheid van de luchtholte in te schatten. In deze situaties heeft actieve thermografie zeker potentieel om schadegevallen dicht bij het oppervlak te traceren. Tegelijk zijn er een aantal aandachtspunten bij deze techniek.

2 Aandachtspunten

2.1 De juiste timing is belangrijk

Lucht- en vochtinsluitsels die vlak onder het meetoppervlak zitten, bijvoorbeeld onder een bitumineuze dakafdichting, zijn doorgaans goed zichtbaar tijdens het opwarmen of afkoelen tijdens en na zonnestraling. Echter, hoe dikker de laag tussen het insluitsel en het buitenoppervlak, hoe kleiner de temperatuurverschillen zijn en hoe crucialer het wordt om op het juiste tijdstip een IR-foto te nemen.

Ter illustratie: Luchtholtes in een nageïsoleerde spouw met actieve thermografie

Is het mogelijk om een nageïsoleerde spouw te inspecteren na directe bezonning? Dit werd getest in de simulaties uit Hoofdstuk 2 §2.2 waar simulaties werden uitgevoerd op een nagevulde spouw met een spouwbreedte van 5 cm (Hoofdstuk 2, Figuur 13). Tijdens de bezonning zal de luchtholte sneller opwarmen dan het intacte deel van de wand, maar vlak na het opwarmen verdwijnt het temperatuurverschil omdat het oppervlak aan de luchtholte ook sneller afkoelt. Indien de zon actief gebruikt wordt in de inspectie van na-isolatie, moet dus enkele uren na de start van de afkoeling gewacht worden.

Figuur 83 toont dat het maximaal temperatuurverschil (0,8 °C) voorkwam 4 uur na de piek in zonnestraling. Aan het begin van het afkoelproces zullen luchtholtes in spouwen dus onzichtbaar

zijn.

Gezien de kleine temperatuurverschillen die luchtholtes in spouwen veroorzaken, zal de timing heel precies bepaald moeten worden. Ook bij gebruik van de zonnestraling zullen de lens, IRresolutie en windsnelheid cruciaal zijn voor de zichtbaarheid van luchtholtes na directe zonnestraling (Figuur 83).



Figuur 83 Buitenoppervlaktetemperaturen ter hoogte van een luchtholte in een nagevulde spouwmuur en ter hoogte van een intact deel. De temperatuur van het oppervlak aan de luchtholte was maximaal 0.8°C lager dan aan het intact deel. Bovendien zijn luchtholtes in geval van zon enkel zichtbaar tijdens het afkoelen.

Daarbovenop is het gebruik van de zon vaak niet haalbaar door de schaduw van de omringende gebouwen en moet er genoeg zonnestraling op de wand ingewerkt hebben om voldoende grote temperatuurverschillen te genereren tijdens het afkoelingsproces. Ook bij bewust gebruik van de zon, is het niet evident om luchtholtes op te sporen met thermografie.

2.2 Niet toepasbaar bij lage emissiviteit

Actieve thermografie is niet toepasbaar op oppervlakken met een lage emissiviteit. De patronen die dan zichtbaar worden, zijn eerder te wijten aan een verschillende ruwheid of vervuiling van de gevel.

De praktijk: Blaasjes in een witte gevelcoating

Tijdens de meting werden twee gevels met een verschillende oriëntatie opgemeten. Uitgaande van de meting op de westgevel (Figuur 84, links) lijkt er lucht in de blaasjes te zitten, uit de meting op de oostgevel (Figuur 84 rechts) lijkt het water te zijn. Hoewel er door openprikken van een blaasje vastgesteld kon worden dat dit gevuld was met water, was dit niet eenduidig af te leiden uit de IR-beelden bij opwarmen en afkoelen.



Figuur 84 Actieve thermografie op een oppervlak met lage emissiviteit (Case Lint)

Volgens de technische fiche van de witte coating, had het oppervlak een emissiviteit die lager was dan 0,10. Dit betekent dat minstens 90% van de straling afkomstig van de witte coating, gereflecteerde straling van de omgeving is. De lage emissiviteit van het geveloppervlak enerzijds en de gladdere textuur van de blaasjes anderzijds, zorgen ervoor dat het oppervlak aan de blaasjes een andere oppervlaktetemperatuur vertoont op het IR-beeld. Op oppervlakken met een lage emissiviteit is het dus onmogelijk om schadegevallen onder het oppervlak te analyseren met actieve thermografie.

2.3 Enkel fenomenen dicht bij het oppervlak

Met actieve thermografie is het mogelijk om schadegevallen net onder het oppervlak op een niet-destructieve wijze te detecteren. Om schadefenomenen op te sporen die dieper in het dak- of gevelpakket zitten, is de techniek echter ontoereikend.

De praktijk: Inspectie van een plat dak

In een tweede casestudie werd actieve thermografie ingezet om de oorsprong van een lek in een dak op te sporen. Als stralingsbron werden opnieuw IR-lampen ingezet om het dakpakket plaatselijk te verwarmen. Voorafgaand werd een klassieke thermografische inspectie uitgevoerd om de interessante plaatsen voor actieve thermografie te bepalen. Figuur 85 toont de locatie van de opstelling pal boven de vermoedelijke plaats van het lek.

Tijdens het opwarmen (Figuur 87) en afkoelen (Figuur 88) werden de naden tussen de isolatiepanelen zichtbaar. Het oppervlak ter hoogte van de naden warmde trager op en tijdens het afkoelen bleef de oppervlaktetemperatuur ook lager. Dit wijst op een hoger vochtgehalte ter hoogte van de naden. Helaas was het niet mogelijk om de dieper liggende oorzaak zichtbaar te maken met deze techniek.



Figuur 85 Opstelling met IR-lampen op het plat dak





Figuur 87 Tijdens het opwarmen: de warmere zones zijn duidelijk afgebakend. Het dakoppervlak ter plaatse van Sp2 warmt trager op dan ter plaatse van Sp1. Dit kan wijzen op een voeg tussen de isolatieplaten met een hoger vochtgehalte.



Figuur 88 Tijdens het afkoelen: Na ongeveer een kwartier afkoelen werden de twee warmere zones geometrisch afgebakend door een koudere strip ter hoogte van Sp2. Mogelijks is dit een voeg tussen de isolatieplaten onder het dakoppervlak die nog steeds een lagere temperatuur heeft. Het oppervlak is dus niet voldoende opgewarmd om een verschil in opwarm- of afkoelsnelheid waar te nemen.

3 Besluit

Actieve thermografie heeft potentieel om ingezet te worden in de bouwpraktijk op kwalitatieve basis. Dit betekent dat enkel vochten luchtinsluitsels vlak onder het dak- of gevelpakket betrouwbaar in beeld gebracht kunnen worden. Voor diepere schadegevallen moeten andere technieken gebruikt worden. Bovendien moet het oppervlak een hoge emissiviteit hebben opdat actieve thermografie toepasbaar is. 1. Commission, EU European. EC 2011. Europe 2020 targets. 2011.

2. **Willockx, Arnout.** Using the inverse heat conduction problem and thermography for the determination of local heat transfer coefficients and fin effectiveness for longitudinal fins. *Doctoral paper.* Gent : Universiteit Gent, 2010. p. 283.

3. **Barreira, E, et al., et al.** Infrared thermography application in building diagnosis: A proposal for test procedures. *Infrared thermography application in building diagnosis.* s.l.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. 91-117.

4. **Dall'O, G.** Infrared Audit. *Green energy audit of buildings.* s.l. : Springer-Verlag London, 2013, pp. 111-125.

5. **Ibarra-Castanedo, C and Maldague, P.** Infrared Thermography. *Handbook of technical diagnostics.* s.l.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. 175-220.

6. **Jewett, J and Serway, R.** *Physics for scientists and engineers with modern physics.* Belmont USA : Thomson Higher Education, 2008.

7. *Recent advances in the use of infrared thermography.* **Meola, C and Carlomango, G.M.** 15, 2004, Measurement science and technology, pp. 27-58.

8. **Charlier, Laurence.** Utilisation de la thermographie infrarouge pour la determination des dépenditions thermique d'un bätiment. Liège : Université de Liège, 2007.

9. *Infrared thermography for building diagnostics.* **Balaras, C and Argiriou, A.** Energy and Building 34, 2002, pp. 171-183.

10. *Thermography: Practical guide.* **Eads, L, Epperly, R and Snell, J.** ASHRAE Journal, March 2000, pp. 51-55.

11. *Infraroodthermografie*. **De Visscher, P and Delmotte, C.** WTCB Tijdschrift, Brussel : Wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf, 1998, p. 4.

12. **Bérubé Dufour, M.** *Quantification of air leaks through the building envelope using infrared thermography.* Canada : University of Concordia, 2005. p. 209. Master Dissertation.

13. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. Asdrubali, F, Baldinelli, G and Bianchi, F. Applied Energy 35, 2012, pp. 365-373.

14. **BS EN 673.** Glass in building-Determination of thermal transmittance U-value: Calculation method. s.l. : British Standard, 1998.

15. **Fluke.** Emissivity values of common materials. s.l.: Fluke, 2007.

16. FLIR. Gebruikershandleiding FLIR Tools/Flir Tools+. 2015.

17. **Omega.** Table of total emissivity. via http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z088-089.pdf : s.n.

18. **Avdelidis, P and Moropoulou, A.** Emissivity considerations in building thermography. 2003. Energy and Buildings 35, pp. 663-667.

19. **ASTM E1862-97.** Standard Test Method for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers. s.l. : ASTM American society for testing and materials, 2002.

20. **ASTM E1993-99a.** Standard test method for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers. s.l. : ASTM American society for testing and materials, 2005.

21. **ASTM C1060-11a.** Standard practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings. s.l. : ASTM American society for testing and materials, 2011.

149

22. Vorschlag zur standardisierten darstellung von wärmebildern mit QualiThermo. Tanner, C, et al., et al. s.l.: Bauphysic Heft 6, 2011.

23. *Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of building.* Lehmann, B and Ghazi Wakili, K. Applied energy 110, 2013, pp. 29-43.

24. The differences between large buildings and residential infrared thermgraphic inspection is like night and day. **Colantonio, A and McIntosh, G.** Alberta : 11th Canadian Conference on Building science and technology, 2007. p. 13.

25. **NBN EN 13187.** Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes-infrared method. Brussels, Belgium : Bureau voor Normalisatie.

26. **BS EN 13187.** Thermal performance of buildings-Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes-infrared method. London, U.K. : BSI, 1999.

27. Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: results of a field test. Dall'O', G, Sarto, L and Panza, A. Energies 6, 2013, pp. 3859-3878.

28. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes. **Fokaides, P.A. and Kalogirou, S.A.** Applied Energy 88, 2011, pp. 4358-4365.

29. Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography. **Taylor**, **T, Counsell, J and Gill, S.** Energy and Buildings 66, 2013, pp. 222-231.

30. Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque buildnig elements on site. Albatici, R and Tonelli, A. Energy and Buildings 42, 2010, pp. 2177-2183.

31. *Bauthermografie-Praxis: Tipps & Tricks für Einsteiger.* **Behaneck, M.** Gebäude energie berater 2, 2011, pp. 44-49.

32. **VATh.** Bauthermografie: zur Planung, Durchführung und Dokumentation infrarotthermografischer Messungen an Bauwerken oder Bauteilen von Gebäuden. 2011. Bundesverband für Angewandte thermografie e.V., p. 15.

33. **TheCH.** Standard de qualité bâtiment . Neuhausen, Switzerland : s.n., 2010. Association Suisse de thermographie (theCH).

34. **RESNET.** Interim guidelines for thermographic inspections of buildings. s.l. : RESNET Residential energy services network, 2012.

35. **Pearson, C.** Thermal Imaging of Building Fabric. s.l. : BSRIA, 2011. BSRIA Guide 39, p. 30.

36. Analysis of thermograms for the estimation of dimensions of cracks in the building envelope. **Bérubé Dufour, M, Derome, D and Zmeureanu, R.** Infrared Physics & Technology 52, 2009, pp. 70-78.

37. Surface temperatures of insulated glazing units: Infrared thermography laboratory measurements. **Griffith**, **B.T.**, **Türler**, **D** and **Arasteh**, **D**. ASHRAE Transactions, University of California, Berkeley, USA : s.n., 1995.

38. **Physibel.** *Voltra. 3-dimensional dynamic simulation tool using the finite element method.* Version 7.0. Maldegem, Belgimu : s.n., 2008.

39. **Hens, Hugo.** *Building physics-Heat, Air and Moisture.* Berlijn : Ernst & Sohn, 2012. p. 315. ISBN 978-3-433-03027-1.

40. **Van De Mergel, Steffen.** *Opstellen van randvoorwaarden voor een thermografische analyse van de gebouwschil aan de hand van in-situ metingen en numerieke simulaties.* Gent : Universiteit Gent, Vakgroep Architectuur en Stedenbouw, Academiejaar 2014-2015.

p. 111. Masterproef voor Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde.

41. **Orlove, G.** What does sensitivity (NETD) mean when applied to a thermal imager? . [Online] 2012. [Cited: Oktober 28, 2015.] http://irinformir.blogspot.be/2012/05/what-does-sensitivity-netd-mean-when.html.

42. **Dewulf, Bieke and Goetelen, Cleo.** *Opsporen en kwantificeren van luchtlekken in de gebouwschil aan de hand van thermografie.* Gent : Universiteit Gent, Vakgroep Architectuur en stedenbouw , 2015. p. 179. Masterproef ingediend tot het behalen van: Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde.

43. **Beulque, Sarah.** *Uitvoeringskwaliteit van na-isolatie van spouwmuren.* Gent : Universiteit Gent, Academiejaar 2013-2014. p. 145. Masterproef voor het behalen van: Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur.

44. Brick cavity walls: A performance analysis based on measurements and simulations. Hens, H, Janssens A., et al. Journal of Building Physics, Vol.31, No.2, 2007.

45. Experimental analysis of cavity ventilation behind rainscreen cladding systems: A comparison of four measuring techniques. Langmans, Jelle and Roels, Staf. Building and Environment 87, 2015, pp. 177-192.

46. **Janssens, Arnold.** Bouwsfysica 1 (Cursus 3de bachelor ingenieur-architect). Gent : s.n., 2015.

47. Langmans, Jelle. *Feasibility of exterior air barriers in timber frame construction.* Heverlee, Belgium: KU Leuven, Science, Engineering & Technology, 2013. PhD Dissertation presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor in Engineering Science.

48. **Deconinck, An-Heleen and Roels, Staf.** *KU Leuven - Microtherm NV-Rapport 8: Metingen case-study Meeuwstraat.*

Leuven : s.n., 2014. O&O Bedrijfsproject VIP-Vacuümisolatiepanelen voor de bouwsector.

49. **NBN B62-002.** Thermische prestaties van gebouwen-Berekening van de warmtedoorgangscoëfficiënten (U-waarden) van gebouwcomponenten en gebouwelementen-Berekening van de wartmeoverdrachtscoëfficiënten door transmissie (Ht-waarde) en ventilatie (Hv-waarde). Brussel, België : Belgisch Bureau voor Normalisatie, 2008.

50. **EN ISO 6946.** Building components and building elements-Thermal resistance and thermal transmittance-calculation method. 2007.

51. *Element 29: Wärmeshuts in Hochba.* **Thomas , F, et al., et al.** Faktor Verlag, Zürich : s.n.

52. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. **Mirsadeghi, M, Costola, D and et.al.** Applied Thermal Engineering 56, 2013, pp. 134-151.

53. *High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building.* **Blocken, B, et al., et al.** Building and environment 44, pp. 2396-2412.

54. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a fullscale building facade. Taki, A.H. and Loveday, D.L. Heat Mass Transfer. Vol 39 No 8, 1996, pp. 1729-1742.

55. Surface temperature measurement of insulating glass units using infrared thermography. **Elmahdy, H.** ASHRAE Transactions Vol 102, 1996, pp. 489-496.

56. **Taylor, A.H.** *An introduction to error analysis.* Sausalito, California : University Science Books, 1997.

57. **NBN EN 674.** Glas voor gebouwen. Bepaling van de warmtedoorgangscoëfficiënt (U-waarde)-Mehtdoe met

afgeschermde verwarmingsplaat. s.l.: BIN. Belgisch Bureau voor normalisatie, 2011.

58. **NBN EN 675.** Glas voor gebouwen. Bepaling van de warmtedoorgangscoëfficiënt (U-waarde)-Methode met warmtestroommeter..s.l.: BIN. Belgisch Bureau voor normalisatie, 2011.

59. **ISO 8320.** Thermal insulation-Determination of steady-state thermal resistance and related properties- Guarded hot plate apparatus. 1991.

60. **Wright, J and Sullivan, H.F.** Glazing system U-value measurement using a guarded heater plate apparatus. Waterloo, Canada : ASHRAE Transactions. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, 1998. pp. 1325-1337.

61. **VDI/VDE 3511-Part 4.** Temperature Measurement in industry. Radiation thermometry. s.l. : VDI/VDE Gesellschaft Messund Automatiserungstechnik (GMA), 2011.

62. **Flores Larsen, S and Hongn, M.** Determining the infrared reflectance of specular surfaces by using thermographic analysis. s.l. : Renewable Energy 64, 2014. pp. 306-313.

63. **Krenzinger, A and de Andrade , A.C.** Accurate outdoor glass thermographic thermometry applied to solar energy devices. 2007. Solar Energy 81(8), pp. 1025-1034.

64. **Raytek.** Emissivity values for common materials & non-metals. [Online] Raytek, mei 5, 2014. http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/IReducation/EmissivityNonMetals.htm.

65. **Haustraete, Joke.** *U-waarde bepaling van glas: vergelijking van thermografische metingen en numerieke simulaties.* Gent : Universiteit Gent, Vakgroep Architectuur en Stedenbouw, Academiejaar 2014-2015. p. 220. Masterproef ingediend tot het behalen van: Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde.

66. **Ray, M and Rogers, A.L.** *Analysis of wind shear models and trends in different terrains.* . University of Massachusetts, Department of mechanical & industrial engineering : s.n., 2006.

67. **NBN EN 13829.** Thermische eigenschappen van gebouwen-Bepaling van gebouwen-Overdrukmethode. Brussel, België : BIN.Belgisch bureau voor normalisatie, 2001.

68. **Senave, E, et al., et al.** *Annex 14 Condensation and Energy.* s.l. : The International Energy Agency (IEA).

69. Airtightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. **Kalamees, T.** Building and Environment 42, 2007, pp. 2369-2377.

70. Passive thermography evaluation of bonding defects in adhered ceramic tiling: experimental and in-situ measurements. Laranjeira, J, et al., et al. Bordeaux : QIRT, 2014. p. 10.

71. *Quantitative infrared thermography in buildings.* **Grinzato, E, Valivov, V and Kauppinen, T.** Energy and Building 29, 1998, pp. 1-9.

72. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. **Kortados**, **E.Z., et al., et al.** Construction and building materials 48, 2013, pp. 1261-1266.

Bijlage 1: Emissiviteitstabel

In een thermografische camera zijn doorgaans enkele standaard emissiviteiten van materialen geprogrammeerd. Daarnaast is bij iedere camera ook een emissiviteitstabel te vinden in de handleiding. Bij wijze van vergelijking, werd de emissiviteiten aangegeven door Fluke (15), Flir (16) en Omega (17) in deze tabel samengevat. Doorgaans komen de emissiviteitswaarden overeen en zijn ze geschikt voor een algemene thermografische inspectie op bv. koudebruggen of luchtlekken.

Wanneer er geen overeenkomst in emissiviteit is tussen de verschillende fabrikanten, kan dit te wijten zijn de aan omstandigheden waarin de emissiviteit bepaald werd. De werd biivoorbeeld emissiviteit bii verschillende omgevingstemperaturen bepaald of in andere golflengtes. Vandaar is het belangrijk om de emissiviteit ook in-situ te bepalen, zeker nauwkeurige oppervlaktetemperatuurmetingen wanneer gevraagd zijn.

Emissiviteitstabel: De waarden aangegeven door drie verschillende producenten van thermografische camera's of meetsystemen. *: golfbereik werd niet gespecifieerd. **Emissiviteit werd bepaald bij 0 °C.

	θ(°C)	golflengte(µm)	Fluke** (15)	Flir (16)	Omega* (17)
Zwarte elektrische	<105	8 tot 14	0,95	≈ 0,96	
tape (vinyl)		3 tot 5	0,95	< 0,96	
Aluminiumfolie	27	10		0,04	
manimumone		3		0,09	
Aluminium, geanodiseerd.	70	3 tot 5		0,61	
lichtgrijs, mat	70	8 tot 14		0,97	
Aluminium, geanodiseerd.	70	3 tot 5		0,67	
zwart, mat	70	8 tot 14		0,95	
Aluminium,	70	3 tot 5	0,07	0,47	
gegoten,	70	8 tot 14		0,46	
gezandstraald	100				0,18

			Fluke**	Flir	Omega*
	θ(°C)	golflengte(µm)	(15)	(16)	(17)
Asbest (bord. lei)		totaal			
	20	spectrum	0,96	0,96	0,96
Asbest	25	2 + - + 5		0.04	
(vioertegel)	35	3 tot 5		0,94	
Asfalt	4	6 tot 20		0,967	
Baksteen					
(alumina,		0 · · · F			
chamottesteen)	17	3 tot 5		0,68	
Baksteen	17	2 tot F	0.05	0,86-	
Bakstoon	17	5 101 5	0,05	0,01	
(metselwerk)	35	3 tot 5		0 94	
Baksteen	00	0 101 0		0,51	
(metselwerk,		totaal			
gepleisterd)	20	spectrum		0,94	
Baksteen (rood,		totaal			
gewoon)	20	spectrum		0,94	
Baksteen (rood,		totaal		0,88-	
ruw)	20	spectrum		0,93	0,93
Baksteen	20	totaal		0.05	
Rakstoon	20	spectrum		0,05	
(watervast)	17	3 tot 5		0.87	
	1,	totaal		0,07	
Beton	20	spectrum		0,92	
Beton droog	36	3 tot 5		0,95	
Beton ruw	17	3 tot 5		0,97	0,94
Cement	0-200				0,96
Emaille		totaal			
	20	spectrum		0,9	
Emaille (lak)	20	totaal		0,85-	
	20	spectrum		0,95	
Gips	20	spectrum		0,8-0,9	0,80-0,90
Glas	0		0,92		
Glas, nonex	100				0,82
Glas, glad	0-93				0,92-0,94
Graniet (gepolijst)	20	6 - 20		0,849	0,45
Graniet (ruw)	21	7 - 20		0,879	
Hout	17	3 tot 5		0,98	
157					

			Fluke**	Flir	Omega*
	θ(°C)	golflengte(µm)	(15)	(16)	(17)
Hout	19	6 - 20		0,962	
Hout (geschaafd)		totaal			
flour (gesenaard)	20	spectrum		0,9	0,89
Hout (geschaafd		totaal			
eiken)	20	spectrum		0,8-0,9	0,91
Hout (triplex,	9.6	o F		0.00	
glad, droog)	36	3-5		0,82	
Hout (triplex,	20	2 5		0.02	
Onbenandeld)	20	3-5		0,83	
Hout (WIt,	20	totaal		0700	
vocnugj	20	spectrum		0,7-0,8	
Huid (menselijk)	22	lotaal		0.00	
lizer on staal	52	spectrum		0,90	
(bodokt mot rodo		totalo		0.61	
(Deuekt met Toue	20	construm		0,01-	0.70
lizer en staal	20	spectrum		0,05	0,70
(rood geroest		totale			
hlad)	20	spectrum	0.69	0.69	
lizer en staal	20	totale	0,09	0,09	
(elektrolytisch)	22	spectrum		0.05	
lizer en staal		speed and		0,00	
(zwaar geroest)	17	3 - 5	0.96	0.96	
lizer en staal (vers	17	totale	0,50	0,70	
gewalst)	20	spectrum	0,24	0,24	
lizer en staal		totale	,	,	
(glanzende	20	spectrum	0,74	0,82	
oxidelaag)	100	•			0.74
lizer on staal (heat	100	totalo			0,74
IJZEI EII Stadi (IIEEt	20	spectrum	0.77	0.77	
lizer en staal (net	20	spectrum	0,77	0,77	
hewerkt met		totale			
noliiststeen)	20	spectrum		0.24	
lizer en staal	20	speed and		0,21	
(ruw. vlak		totale		0.96-	
oppervlak)	50	spectrum	0.96	0.98	
lizer en staal		totale	-,	- /	
(sterk geoxideerd)	50	spectrum		0,88	
Ijzer		*			
gegalvaniseerd		totale			
(blad, geoxideerd)	20	spectrum	0,28	0,28	
Ijzer		totale			
gegalvaniseerd	30	spectrum	0,23	0,23	

			Fluke**	Flir	Omega*
	θ(°C)	golflengte(µm)	(15)	(16)	(17)
(blad, gepolijst)		totale			
ljzer, gegoten	38	spectrum		0,63	
(geoxideerd)	199	-			0.64
lizer, gegoten		totale			
(gepolijst)	38	spectrum	0,21	0,21	
lizer, gegoten		totale	-		
(gietstuk)	50	spectrum	0.81	0.81	
		totale	,	,	
Koper	50	spectrum	0.65	0.6-0.7	
(geoxideerd)	0.0	-1	-,	-,,	0.07
	38				0,87
Koper		1			
(geoxideerd tot		totale	0.00	0.00	
zwartheid)		spectrum	0,88	0,88	
Koper					
(geoxideerd,		totale			
zwaar)	20	spectrum		0,78	
		totale			
	27	spectrum		0,78	
Koper					
(geoxideerd,					
zwart)	38				0,78
Koper (gepolijst,		totale			
mechanisch)	22	spectrum	0,01	0,015	
Koper		totale			
(geschuurd)	27	spectrum		0,07	
Lak (zwart,					
glanzend, op ijzer		totale			
gespoten)	20	spectrum	0,87	0,87	0,78
Lak (rwart mat)		totale		0,96-	
Lak (Zwait, Illat)	40-100	spectrum	0,97	0,98	0,96
Lood (geoxideerd,		totale			
grijs)	20	spectrum	0,28	0,28	0,28
Mortel	17	3 tot 5		0,87	
Mortel (droog)	36	8 tot 14		0,94	
OSB	20	3 tot 5		0,90	
Piepschuim					
(isolatie)	37	3 tot 5		0,60	
PUR (isolatie)	70	3 tot 5		0,29	
	70	8 tot 14		0,55	

	0(00)		Fluke**	Flir	Omega*
	θ(°C)	golflengte(µm)	(15)	(16)	(17)
PVC (plastic vloer,					
mat, met	70	2 4 5 4		0.04	
structuurj	70	3 tot 5		0,94	
		8 tot 14		0,93	
Pleister	17	3 tot 5		0,86	
Pleister (ruwe		totale			
coating)	20	spectrum		0,91	
Roestvrijstaal					
(blad, gepolijst)	70	3 tot 5		0,18	
Roestvrijstaal					
(blad,					
onbehandeld, iets					
gekrast)	70	8 tot 14		0,28	
Stucco (ruw. kalk)	1. (0.0	totale		0.04	
	okt/90	spectrum		0,91	
Tegel	1 17	<u> </u>		0.04	
(geglazuurd)	17	3 tot 5		0,94	
Verf (8					
verschillende				0.00	
kieuren en	70	2 4 4 4 5		0,88-	
kwaliteiten)	70	3 tot 5		0,96	
	70	9 tot 14		0,92-	
Vornis (on oikon	70	0 101 14		0,94	
narketyloer)	70	3 tot 5		0.90	
parketvioerj	70	5 101 5		0,50	
	70	8 tot 14		0,90	
Vezelplaat (hard	70	0 101 11		0,70	
onbehandeld)	20	3 tot 5		0.85	
Spaanplaat	70	3 tot 5		0.77	
1 1	70	5 101 5		0,77	
	70	8 tot 14		0,89	
Zandsteen	10	(.		0.04	o (-
(gepolijst)	19	6 tot 20		0,91	0,67
Zandsteen (ruw)	19	6 tot 20		0,94	
Zink (blad)		totale			
	50	spectrum	0,20	0,20	
Zink (glanzend,					
gegalvaniseerd)	38				0,23

Bijlage 2: Algemene checklist

Voor en tijdens de meting:

- 1. Plaatsing van aluminiumfolie en emissiviteitstape ter plaatse van de op te meten objecten
- 2. Positie van de camera bepalen
- 3. Opmeten van de invloedrijke binnen- en buitenparameters + tijdstip:
 - a. Buiten- en binnentemperatuur
 - b. Relatieve vochtigheid buiten en binnen
 - c. Windsnelheid, bewolking, zonneschijn, oriëntatie, aantal uur na neerslag (buiten) op het moment van de meting en de historiek tot drie dagen voor de meting
 - d. Afstand camera-object
 - e. Emissiviteit en gereflecteerde temperatuur
 - f. Vochtgehalte indien de metingen dienen voor het inschatten van thermische prestaties
- 4. Instellen en bedienen camera
 - a. Kiezen van de juiste lens aangepast aan de toepassing
 - Scherpstellen met het scherm op grijswaarden. Met een duidelijk scherp beeld in grijswaarden, zijn de oppervlaktetemperaturen in iedere weergave het scherpst afgelijnd.
 - c. Emissiviteit en gereflecteerde omgevingstemperatuur instellen.
 - d. De camera een kwartier laten klimatiseren indien de camera verplaatst werd naar een ruimte met een andere temperatuur dan de bewaartemperatuur. Dit is belangrijk voor de correctheid van de eerste beelden en de kalibratie.
 - e. Tijdens de meting kan handmatig gekalibreerd worden.

Voor een specifieke werkwijze en benodigdheden wordt verwezen naar:

- p.71 voor isolatiegebreken
- p.123 voor luchtlekken

Vereiste omgevingscondities:

- Volgens de normen: Tabel 3, p.20
- Voor U-waarde berekening:
 - Wachttijden met zwaar bewolkt, windstil weer:
 - Buiten: Tabel 5, p.26
 - Binnen: Tabel 6, p.27
 - Maximale toegelaten temperatuurschommeling
 - Buiten: Tabel 11, p.37
 - Binnen: Tabel 12, p.38
 - Wachttijden na stijging of daling van de binnentemperatuur
 - Tabel 13, p.39
- Voor de optimale zichtbaarheid van gebouwgebreken:
 - o Tabel 14, p.48

In het verslag:

- Volgens de normen: Tabel 16, p.63
- Vermelding weerdata: Tabel 17, p.66

Trefwoordenlijst

Emissiviteit	
Definitie	5
In-Situ Bepaling17	7
FOV53	3
IFOV	5
Infraroodstraling4	ŀ
Kalibreren	
IR-Camera57	7
Met Onafhankelijk Instrument 59)
Koudebrug	
Geometrisch80)
Structureel73	3
Luchtdichtheidstest 122	2
Luchtinsluitsels140)
Luchtrotatie	
In De Spouwisolatie76	5
Luchtrotaties	
Rondom De Isolatie76	5
Na-Isolatie78	3
Neerslag	
Voor Thermische Prestaties32	2
NETD	5
Observatiehoek	3
Oppervlaktemodificerende	
Materialen19)
Overgangscoëfficiënten hi en he99)
Pixel	3
Resolutie	3
Reflectie	
Definitie11	L

In-Situ Bepaling15
Reflectie- En Absorptievermogen 91
Spiegelreflectie
Straling Van De Hemelkoepel
Voor Isolatiegebreken
Voor Thermische Prestaties 30
Temperatuurfactor 135
Temperatuurprofielen94
Temperatuurschaal93
Temperatuursverandering
Binnen
Buiten
Temperatuurverschil Tussen
Binnen En Buiten 40
Thermische Effusiviteit23
Definitie90
Zichtbaarheid Van Gebreken90
Thermografie
Hoofdwet6
U- En R-Waarde98
Nauwkeurigheid101
Vochtinsluitsels 140
Wind
Voor Isolatiegebreken51
Voor Thermische Prestaties 31
Windspoeling76
Zonnestraling
Voor Isolatiegebreken
Voor Thermische Prestaties 27

Infraroodthermografie vindt steeds vaker zijn weg in de bouwsector: voor het opsporen van koudebruggen, als inspectietool van luchtdichtheid of als controlemiddel voor de uitvoeringskwaliteit. Het goede gebruik van thermografie bij bouwapplicaties hangt echter samen met een grondige kennis van de bouwconstructie, de principes van warmte-, lucht en vochttransport én een basiskennis van alle invloedsfactoren die een thermografische opname kunnen beïnvloeden.

Dit boekje verschaft inzicht in alle aspecten die bij thermografie op de gebouwschil komen kijken.

Stippel je perfecte isolatietraject uit op **www.renoverenmetisover.be**

Alle lastenboeken, technische fiches en ATG-goedkeuringen overzichtelijk en up-to-date!



www.renoverenmetisover.be

Je dak isoleren? Je buitenmuren isoleren? Je ondergrond isoleren? Of andere akoestische isolatiemaatregelen treffen?

Op **www.renoverenmetisover.be** worden alle oplossingen en systemen voor renovatie en na-isolatie van ISOVER overzichtelijk opgelijst en besproken. Met premie- en verdelersinfo, plaatsingsfilmpjes, tips voor een perfecte luchtdichting....

Kortom: alle info om je perfecte isolatietraject meteen te laten beginnen.

