

Koudebruggen en luchtdichtheid: berekening, impact op de bouwprestaties

Hugo S.L.C. Hens

Gewoon hoogleraar, K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Laboratorium Bouwfysica. E-mail: hugo.hens@bwk.kuleuven.be

Inleiding

Hoe kunnen we koudebruggen het beste definiëren? Fysisch gaat het om alle plaatsen in de schil waar het warmtetransport twee- of driedimensionaal verloopt, de plaatselijke warmtestroom hoger ligt dan het oppervlakteaandeel in het geheel doet onderstellen en de oppervlaktetemperatuur binnen lager uitvalt dan bij de aangrenzende vlakke elementen. Koudebruggen kunnen een direct gevolg zijn van de geometrie van een detail of van de wijze waarop het detail is uitgewerkt. Dikwijls gaat het om een combinatie van beide. Vanuit bouwkundig oogpunt zijn de klassieke voorbeelden:

- De knoop tussen een gelijkvloerse wand in metselwerk en de draagvloer waarbij de vloerisolatie tussen de uitvlaklaag bovenop die draagvloer en de dekvloer zit
- Overgang tussen funderingen en wanden in metselwerk of wanden en kolommen in beton
- Balkons
- Vloerplaten in contact met het buitenblad van de spouwmuur of dagzomend
- Lateien, balken en kolommen aangestort tegen het buitenblad of dagzomend
- Raamdorpels
- Negsluitingen
- Vloeren en binnenwanden tegen buitenwanden in geval van binnenisolatie
- Dakranden
- Korse gevels ter hoogte van een geïsoleerde zoldervloer
- De knopen tussen scheidingsmuren en vloeren bij niet verwarmde aangrenzende ruimten

Aan het laboratorium bouwfysica startte het systematische onderzoek naar de impact van koudebruggen op de gebouwkwaliteit in de jaren zeventig van vorige eeuw.

Intussen is geweten dat naast koudebruggen een ander element speelt in de afname van allerlei prestaties: lucht lekkage. Globaal kunnen we in de lucht lekkage zeven stromingspatronen onderscheiden, elk met een specifieke impact.

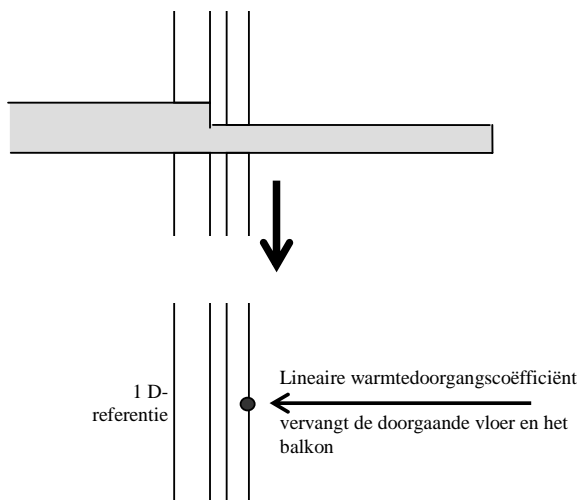
In wat volgt wordt op dit alles nader ingegaan. Daarbij is geen volledigheid nagestreefd. Zoiets zou een boek vol vragen. Ook gaan we niet in op de wiskundige aanpak van koudebruggen en lucht lekkage. Dat zou ons te ver leiden.

Definities en rekenprogramma's

Lijn- en puntwarmtedoorgangscoefficiënt

De impact van een koudebrug op de isolatiekwaliteit, de warmte- en de koudevraag en het energieverbruik voor verwarming en koeling wordt ingerekend via een lijn- (ψ) of een punt- (χ) warmtedoorgangscoefficiënt.

De lijn (of lineaire) warmtedoorgangscoefficient geeft de extra warmtestroom per lopende meter lineaire koudebrug en per Kelvin temperatuurverschil tussen de twee omgevingen die door het bouwdeel met lineaire koudebrug gescheiden worden ten opzichte van een rekenreferentie zonder de lineaire koudebrug. Wat de referentie is, dient vooraf te worden afgesproken. Neem een balkon. Bij de referentie worden zowel het balkon als de vloerplaat weggedacht. De spouwmuur loopt gewoon door en waar het balkon zit komt de lijnwarmtedoorgangscoefficiënt. De waarde ervan vindt men door met behulp van een programma voor tweedimensionaal warmtetransport de warmtestroom door het 1 l.m. detail en een voldoende groot deel van de constructie aan beide zijden ervan te berekenen, dan met de klassieke formules voor de warmtedoorgangscoefficiënt de warmtestroom door de ééndimensionale referentie te bepalen, die van het tweedimensionale transport af te trekken en het resultaat te delen door het temperatuurverschil dat bij de berekening werd aangenomen.



Figuur 1 Omzetting van het werkelijke detail in een rekenreferentie

De puntwarmtedoorgangscoefficiënt geeft op analoge wijze de extra warmtestroom per koudebrug en per Kelvin temperatuurverschil tussen de twee omgevingen die door het bouwdeel met de koudebrug gescheiden worden. De berekening is wat moeilijker dan bij een lijnwarmtedoorgangscoefficiënt. Gaat het om een lokale koudebrug in een overigens homogeen bouwdeel, dan wordt de warmtestroom eerst driedimensionaal berekend, waarna van de gevonden waarde die door de ééndimensionale referentie wordt afgetrokken en men het resultaat deelt door het aangenomen temperatuurverschil. Betreft het een lokale koudebrug die het resultaat is van de kruising van twee lijnkoudebruggen, dan slaat de puntwarmtedoorgangscoefficiënt op de extra warmtestroom tegenover een rekenreferentie van het vlakke deel met de twee lijnkoudebruggen.

Stappen we van een bouwdeel over naar de schil als geheel, dan geldt inbegrepen koudebrugwerking voor de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt:

$$U_m = \frac{\sum U_i A_i + \sum \psi_j L_j + \sum \chi_k}{\sum A_i} \quad [1]$$

met U_i de warmtedoorgangscoefficiënt van de schilsamenstellende bouwdeelen., A_i hun oppervlakte en L_j de lengte van de aanwezige lineaire koudebruggen. Hoe groter de lijnwarmtedoorgangscoefficiënten, hoe belangrijker de totale lengte aan lineaire koudebruggen en hoe meer punkoudebruggen met grote punkwarmtedoorgangscoefficiënt, des te groter de impact van koudebrugwerking op de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt van de schil, op het peil van warmte-isolatie, enz. Procentueel wordt de impact groter in de mate de bouwdeelen over hun oppervlakte beter geïsoleerd zijn. Vandaar ook de uitspraak dat bij strengere eisen aan het peil van warmte-isolatie, koudebruggen steeds meer als stoorzenders optreden en door een correcte bouwkundige detaillering in de mate van het mogelijke monddood moeten gemaakt.

Rekenwerk uit de jaren tachtig geeft aan dat bij niet geïsoleerde woningen koudebrugwerking het warmteverlies door geleiding (berekend met als referentie de buitenwerkse afmetingen) met zo'n 10% deed toenemen. Werd spouwvulling in overigens traditioneel gedetailleerde woningen met spouwmuren toegepast, dan kon koudebrugwerking de geleidingsverliezen met 35% tot 40% doen stijgen. Zoiets betekent dat bij de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt, die zonder koudebruggen bijvoorbeeld rond 0.6 W/(m².K) zou hebben gelegen, 0.21 tot 0.24 W/(m².K) moest worden bijgeteld. Binnenisolatie gaf ±hetzelfde resultaat als de gevulde spouwmuur, terwijl met buitenisolatie de toename terugviel tot 10 à 16%.

Temperatuurfactor

Details die de naam 'koudebrug' dragen zorgen plaatselijk voor lagere binnenoppervlakte-temperaturen dan men zou hebben bij een koudebrug-vrije oplossing. Niet het volledige temperatuurbeeld op het binnenvlak wordt doorgaans bekeken maar wel de laagste temperatuur. Die geeft men dimensieloos weer als een temperatuurfactor:

$$f_{h_i} = \frac{\theta_{s_i} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad [2]$$

Hierbij is θ_{s_i} de laagste binnenoppervlakte-temperatuur, θ_e de buitentemperatuur en θ_i de binnentemperatuur, alle in °C. Het suffix h_i wijst erop dat de waarde van de temperatuurfactor afhangt van de warmteovergangscoefficiënt tegen het binnenvlak, zelf bepaald door de plaatselijke situatie qua convectie en straling en de referentietemperatuur die men aanneemt. In principe bezigt de Europese norm de effectieve temperatuur in het midden van de ruimte als referentie en neemt als warmteovergangscoefficiënt 7.8 W/(m².K) horizontaal, 10 W/(m².K) bij warmtetransport verticaal van onder naar boven en 6 W/(m².K) bij warmtetransport verticaal van boven naar onder. In werkelijkheid kan de referentietemperatuur behoorlijk verschillen van de effectieve waarde in het kamermidden. Neem de neg rond een raam. De hoekfactor voor straling met de binnenomgeving en het glas is er ±gelijk, namelijk 0.5. Stel dat we met enkele beglazing te doen hebben en het buiten al enkele dagen gemiddeld 0°C is en binnen

effectief 20°C. De glastemperatuur is dan 5.4°C. Waar normaal de referentietemperatuur 20° effectief is, dienen we bij de neg te rekenen met 15.7°C. Met dubbel glas wordt dat 17.8°C en met lage e, argongevuld dubbel glas 19.2°C, dwz amper verschillend van 20°C.

Dikwijls wordt in zulke gevallen niet de referentietemperatuur, maar de overgangscoefficiënt aangepast. Dat geeft problemen, in die zin dat de warmteovergangscoefficiënt dan een niet lineaire, dalende functie wordt van de oppervlaktetemperatuur van de neg. Toch werd in de Europese norm afgesproken het warmteverlies door een koudebrug met de klassieke warmteovergangscoefficiënten te berekenen en voor de temperatuurfactor een lagere waarde, 4.5 W/(m².K), te nemen.

Rekenprogramma's

Wel bekend voor het begroten van het driedimensionale warmtetransport door bouwkundige details zijn de programma's TRYSCO en VOLTRA van Physibel. In beide wordt het driedimensionale warmtetransport opgelost met behulp van de methode van de controle volumes. Daarbij wordt het te berekenen detail opgedeeld in kubus- of balkvormende volumes en schrijft men per volume het energie-evenwicht. Daarbij moet in stationair regime de som van de warmtestromen die uit de buurvolumes naar het beschouwde volume komen nul zijn. In niet stationair regime daartegen wordt dat gelijk aan de wijziging in opgeslagen enthalpie in het beschouwde volume. Zit in het beschouwde volume een warmtebron of een warmteput, dan wordt die mee in het evenwicht opgenomen. Zouden er naast geleidingstromen ook enthalpiestromen tussen komen, dan dienen die mee in de balans betrokken te worden.

Natuurlijk zouden we ook het volledige gebouw meteen driedimensionaal in controel volumes kunnen opdelen en als geheel uitrekenen. Alleen leidt zo iets tot extreem veel controle volumes en reusachtige stelsels van vergelijkingen.

TRYSCO en VOLTRA zijn natuurlijk niet de enige pakketten. In Zweden is er HEAT, terwijl ook algemene programma's voor eindige elementenberekeningen gebruik kunnen worden om er problemen van driedimensionaal warmtetransport mee op te lossen.

Bouwkundige impact

Die bekijken we aan de hand van concrete voorbeelden.

Lijn- en puntwarmtedoorgangscoefficiënt

Binnenisolatie

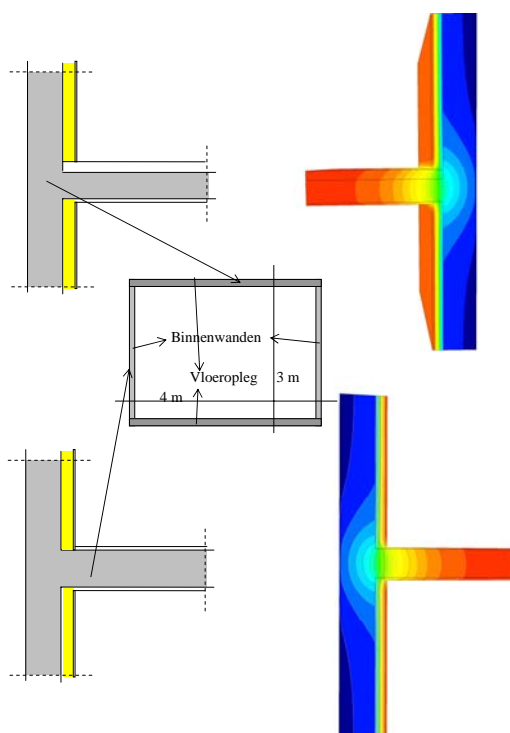
Bij een luchtdichte massieve muur en correct geplaatste binnenisolatie hangt de netto warmtedoorgangscoefficiënt U_0 af van de dikte en de aard van het isolatiemateriaal. Zo geldt voor een wand uit steens metselwerk:

U_0- waarde W/(m².K)	Isolatie dikte cm				
	MW	PUR	EPS	XPS	CG
0.6	4.0	3.0	4.0	3.5	5.0
0.2	17.0	12.5	16.0	13.0	20.0

Bij $U_0=0.6$ W/(m².K) blijven de benodigde dikten matig, 3 tot 5 cm. De stap naar 0.2 W/(m².K) geeft dikten van 12.5 tot 20 cm, d.w.z. vergelijkbaar met de wanddikte.

Koudebruggen trekken de warmtedoorgangscoefficiënt (U), nu bruto genoemd, omhoog. Binnenisolatie kent twee niet op te lossen details: (1) vloeropleg en (2) aansluiting van een binnen- op een buitenwand. Figuur 2 toont de isothermen bij een gietbouw wand in gewapend beton, binnen geïsoleerd met 6 cm EPS, $\lambda=0.04 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ en de dekvloer tegen de betonwand gestort.

Tabel 1 begroot het effect van beide koudebruggen op de bruto warmtedoorgangscoefficiënt bij een $4.8 \times 3 \text{ m}^2$ grote buitenwand. De tabel spreekt voor zich: een waarde maar liefst 84 tot 122% hoger dan netto. Blijkbaar is binnenisolatie geen systeem waarmee een goede isolatiekwaliteit te halen valt. Anders gezegd, het isolatierendement is laag. Bij voorliggende gietbouwconstructie vraagt $U=0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ een 24 cm dikke isolatielaag, waar 5 cm zou moeten volstaan.

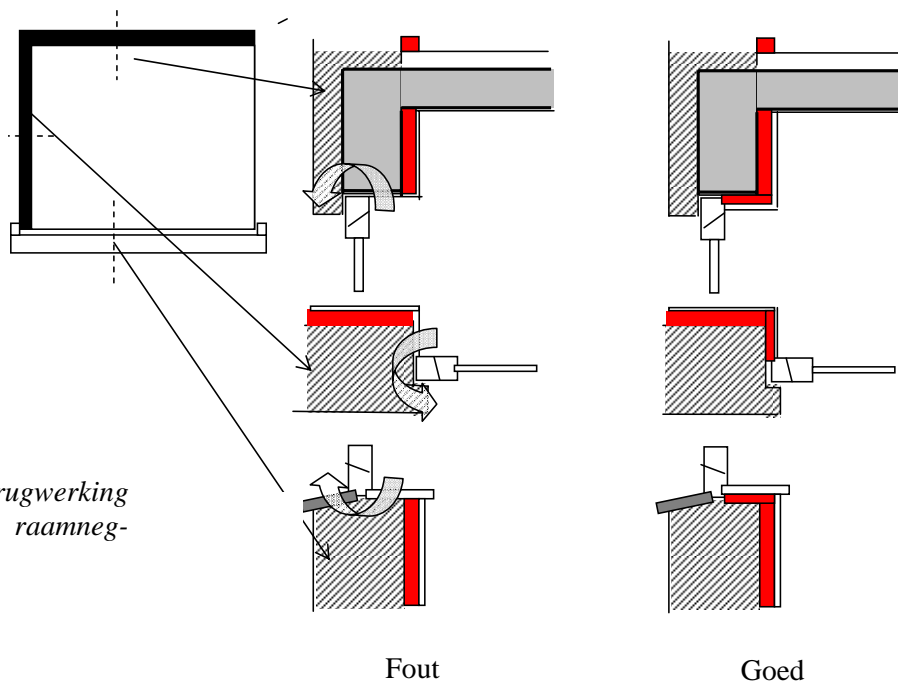


Figuur 2 Koudebrugwerking bij binnenisolatie, vloeropleg en aansluiting tussen binnenwand en gevel bij gietbouw (rood: richting 20°C, blauw: richting 0°C)

Tabel 1 Binnenisolatie bij gietbouw, bruto warmtedoorgangscoefficiënt

Isolatie-dikte	U_o	Gevel/ binnenmuur	Vloeropleg	Bruto U-waarde	$\Delta U/U_o$
m	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	ψ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	ψ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	%
0.06	0.55	0.87	0.84	1.01	84
0.08	0.43	0.86	0.83	0.89	107
0.10	0.36	0.84	0.80	0.80	122

Ook alle andere details vragen de nodige aandacht. Rond ramen en deuren moeten we bijvoorbeeld de neggen mee isoleren



Figuur 3 Koudebrugwerking bij binnenisolatie, raamneggen

Buitenisolatie

Voor een netto warmtedoorgangscoefficiënt 0.6 of 0.2 W/(m².K) zijn bij een massief deel met dikte 19 cm de isolatiedikten van tabel 2 nodig.

Tabel 2 Isolatiedikten bij buitenisolatie

Muur	U _o W/(m ² .K)	isolatiedikte cm			
		MW	PUR	EPS	CG
Snelbouw, d=19 cm	0.6	4.0	3.0	4.0	5.0
	0.2	16.0	12.5	17.5	20.0
Lichte snelbouw, d=19 cm	0.6	1.5	1.0	1.5	2.0
	0.2	14.0	10.0	15.0	16.5

De aard en de dikte van het massieve deel spelen amper een rol. Alleen zeer goed isolerende bouwblokken hebben enig effect. Ook leidt 0.2 W/(m².K) niet tot zeer grote totale dikten. Lichte snelbouw met PUR komt inbegrepen de pleister op ≈ 31 cm.

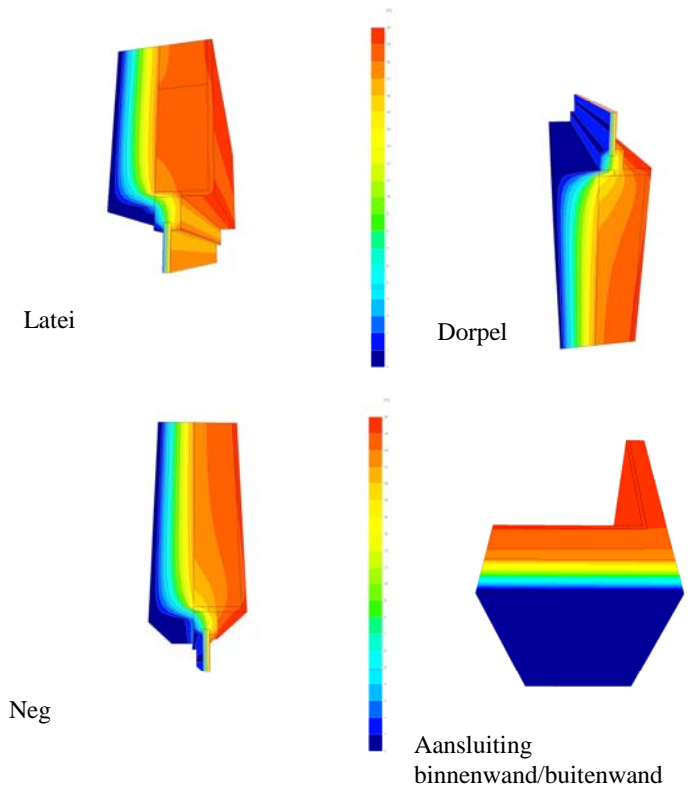
Bij buitenisolatie sluit de bruto warmtedoorgangscoefficiënt nauw aan bij netto waarde. Tabel 3 illustreert dat voor de details uit figuur 4 (wand uit 14 cm snelbouw en als buitenisoltie 12 cm minerale wol).

Tabel 3 Lijnwarmtedoorgangscoefficiënten voor een reeks details

Detail (wand: kalkzandsteen)	ψ W/(m.K)
Latei	0.093
Neg	0.068
Dorpel	0.050
Vloeropleg	0.005
Binnenmuur	0.000

Tabel 4 Lijnwarmtedoorgangscoefficiënten van 4 verschillende negoplossingen

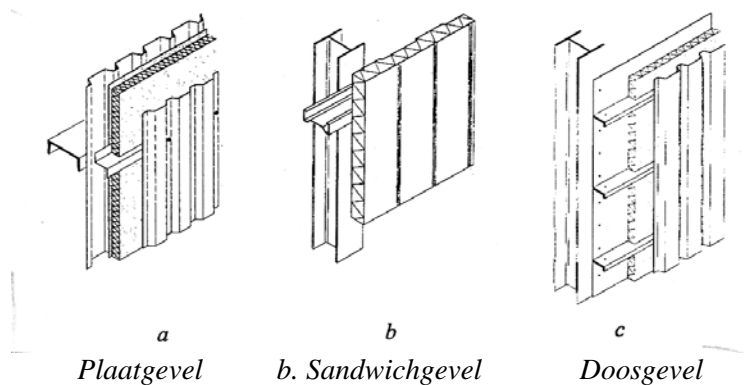
Detail Massieve wand, betonblokken, 10 cm MW	ψ W/(m.K)
(1)	0.12
(2)	0.20
(3)	0.08
(4)	0.09



Figuur 4 Koudebrugwerking, bij een massieve wand in snelbouw, $d=14$ cm) met een 12 cm dikke, gepleisterde buitenisolatie, details, isothermen (0°C buiten, 20°C binnen)

Van het negdetail in de figuur zijn ooit vier uitvoeringen experimenteel doorgemeten: (1) raam achter het voorvlak van de massieve muur, neg geïsoleerd, (2) raam achter het voorvlak van de massieve muur, neg niet geïsoleerd, (3) raam in het voorvlak van de massieve muur, buitenisolatie vormt aanslag, (4) raam in het voorvlak van de massieve muur, geen aanslag. Uit tabel 3 blijkt dat (2) het slechtste presteerde en (3) het beste. Als tabel 4 onderlijnt bleef het verschil tussen de vier vrij beperkt.

Metaalconstructie



Figuur 5 Metalen gevels

Bij metalen gevels (figuur 5) zorgt koudebrugwerking ervoor dat de netto warmtedoorgangscoefficiënt als maat voor de isolatiekwaliteit tekort schiet, zie tabel 5. Een probleem is echter dat de werkelijke bruto warmtedoorgangscoefficiënt moeilijk te voorspellen valt. Inderdaad spelen, als de tabel toont, de contact-

weerstand in de raakvlakken tussen de metalen delen een grote rol. Die heeft men amper in handen. Wel kan het effect ervan prima worden uitgevlakt als een 'ideale' thermische snede wordt voorzien.

Tabel 5 Warmtedoorgangscoefficiënt van een doosgevel (U_o is berekend, U_m gemeten)

Doosgevel, gevuld met 80 mm MW		U_o W/(m ² .K)	U_m W/(m ² .K)	$\Delta U/U_o$ %
1. Geen thermische snede ter hoogte van de dooslippen, buitenplaat om de twee rijen op een dooslip bevestigd		0.36	0.74	105
2. Geen thermische snede ter hoogte van de dooslippen, buitenplaat per rij op de dooslippen bevestigd		0.36	0.89	147
3. Geen thermische snede ter hoogte van de dooslippen, buitenplaat om de twee rijen op een dooslip bevestigd, effect van de luchtlaag tussen dooslip en buitenplaat (D in mm)	D	0.38	1.10	183
	0.0		0.85	136
	0.5		0.78	116
	1.0		0.74	105
4. Optimale thermische snede		0.36	0.54	50

Temperatuurfactoren

Vluggere vervuiling

Ter plaatse van koudebruggen vervuilt een binnenvlak vlugger dan op andere plaatsen. De reden dient gezocht in de lagere temperatuur en de daardoor hogere relatieve vochtigheid tegen het binnenvlak. De hogere luchtvochtigheid doet stofdeeltjes gemakkelijker samenklitten en tegen het oppervlak kleven.

Barstvorming

Is een direct gevolg van de grotere temperatuurschommelingen in de goed geleidende betonplaten, balken of kolommen, die de warmte-isolatie doorbreken en zo koudebrugwerking veroorzaken. 's Winters zorgt de lage temperatuurfactor voor lagere temperaturen, 's zomers voor hogere! Daardoor gaan de koudebrug vormende elementen meer bewegen dan de omliggende, door de warmte-isolatie afgeschermden delen, met een versterkte scheurvorming als resultaat.

Grotere kans op schimmelvorming

De laatste decennia is heel wat onderzoek op schimmelontwikkeling gebeurd. Daardoor is geweten dat de isopleten van de schimmels, de voedingswaarde van de ondergrond waarop ze ontkiemen, de dynamica van het locale microklimaat met de relatieve vochtigheid als voornaamste parameter en de duur dat een bepaald microklimaat zich voordoet de bepalende factoren zijn. Naar ontwerp toe zijn uit dat soort onderzoek als hanteerbare regels naar voor geschoven:

1. Zorg ervoor dat over langere perioden (4 weken of meer) de relatieve vochtigheid niet boven volgende waarde uitkomt:

$$\phi = 0.033\theta_{si}^2 - 1.5\theta_{si} + 96 \quad [3]$$

$$0 \leq \theta_{si} \leq 45^\circ\text{C}$$

met θ_{si} de binnenoppervlaktetemperatuur. De grenswaarde voor relatieve vochtigheid wordt het laagste bij 22.7°C , te weten 79%. Bij koudebruggen controleert men of aan de eis voldaan is via de temperatuurfactor

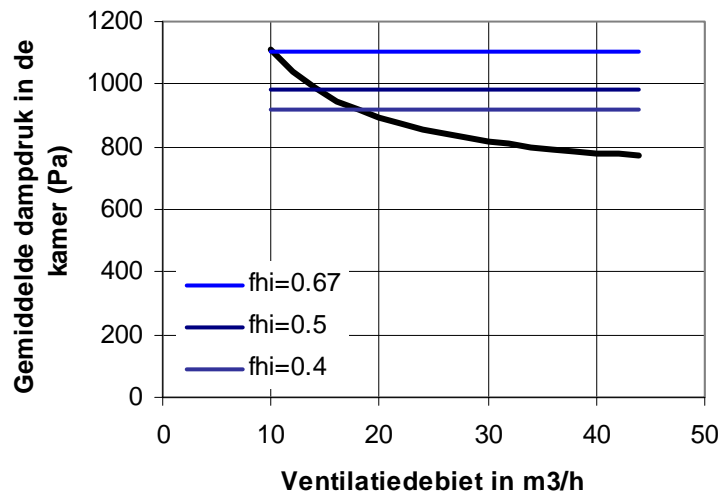
2. Ligt de relatieve vochtigheid boven de gegeven parabool, dan verkort de periode van ont-kiemen tot:

$$\phi \geq \min[100, 100 - 5.8 \ln(T)] \quad [4]$$

met T de duur in dagen.

Hoe vertaalt zich dat concreet? Neem een slaapkamer. Stel dat die een volume heeft van 43 m³ en er elke nacht twee personen slapen. Die zorgen voor een waterdampproductie van in totaal 800 g per nacht (8 uren). De kamerwanden en het meubilair zijn behoorlijk vochtbufferend, waardoor de dampdruk binnen maar beperkt schommelt. In het nieuwe raam zit lage e, argongevuld dubbel glas, U=1.1 W/(m².K). We zijn in de maand januari, buitentemperatuur gemiddeld 3.2°C bij een waterdampdruk van 670 Pa. Binnen is het gemiddelde 15°C. Als variabele geldt de ventilatiestroom door de kamer. Koudebrugwerking is er aan de latei boven en de neggen rond het raam, met als laagste temperatuurfactor x. Figuur 10 toont hoeveel ge-ventileerd moet worden, wil men schimmel vermijden. Dat blijkt alles samen flink mee te vallen. Bij een temperatuurfactor 0.4 volstaat een debiet groter dan 17 m³ per uur. Wil men in de slaapkamer een binnenluchtkwaliteit IDA 3, dan is bijvoorbeeld al een debiet ≥44 m³/h nodig. Of, ventileren voor een goede luchtkwaliteit volstaat in veel gevallen om schimmel te vermijden

Het verhaal ziet er minder leuk uit als 's avonds in het dagvlak van de raamopening een gordijn wordt dicht geschoven. Reden: met het gordijn dicht dalen de temperatuurfactoren op de neg rondom. Daardoor neemt het risico op schimmelaantasting toe. Ook kan er lucht vanuit de dagzone naar de slaapkamer stromen –typisch het geval bij door thermische trek gedomineerde natuurlijke ventilatie. Dat doet de waterdamptoevoer naar de dikwijls amper verwarmde slaapkamer toenemen, met een groter risico op schimmelaantasting als resultaat.



Figuur 6. Nodig ventilatiedebiet om in de slaapkamer schimmelvorming tegen de latei te vermijden

Oppervlaktecondensatie

Waar bij schimmel gekeken wordt naar een lokaal microklimaat over een langere periode, is oppervlaktecondensatie een momentaan fenomeen. Bereikt de relatieve vochtigheid tegen een binnenvlak 100%, dan is condensvorming een feit. Bij hygroscopische, capillair actieve vlakken zal men daarom nog geen condensdruppels zien. De capillariteit zorgt er immers voor dat

het condens direct wordt opgezogen. Bij niet capillaire vlakken daartegen krijgt men een wolk van fijne druppeltjes. Blijft een vlak op 100% relatieve vochtigheid, dan is schimmel onwaarschijnlijk. Gaat een door condens nat geworden vlak drogen, dan wordt steedsde temperatuur/relatieve vochtigheid combinatie gepasseerd waarbij schimmel vlug kan ontkiemen.

Luchtlekkage

Algemeen

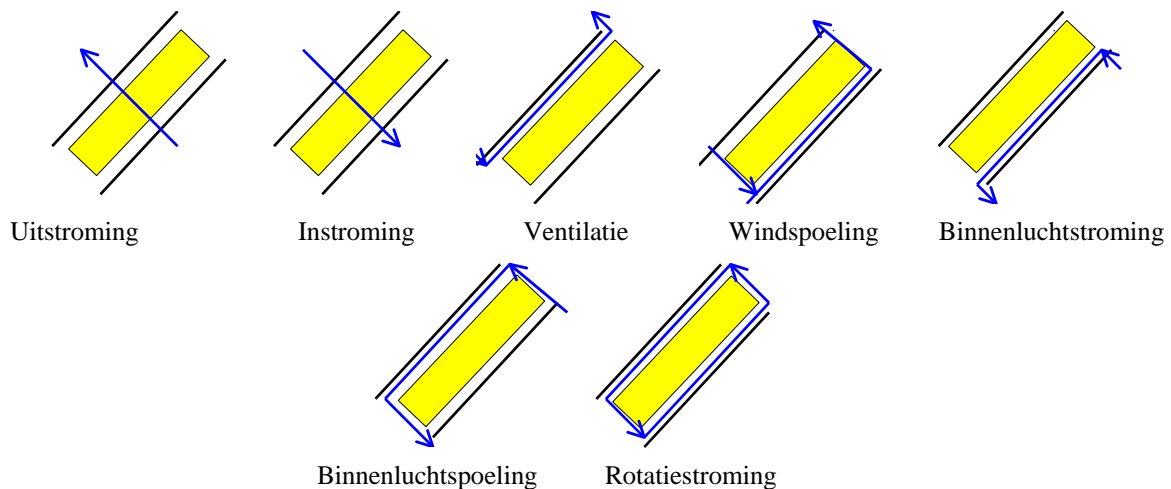
Staat koudebrugwerking al lang in de belangstelling, iets minder duidelijk is dat bij luchtlekkage. Aan het Laboratorium Bouwfysics van de K.U.Leuven is het onderzoek daarover gestart in de jaren tachtig van vorige eeuw, eerst bij daken en nadien bij spouwmuren, binnenisolatie, buitenisolatie en houtskeletbouw. Onderscheid werd daarbij gemaakt tussen 7 luchtstromingpatronen: uitstroming, instroming, ventilatie, windspoeling, binnenluchtstroming, binnenluchtspoeling, rotatiestroming, elk met zijn eigen specifieke nadelen.

Luchtuitstroming	Tast de isolatiekwaliteit aan Verhoogt in koude en gematigde klimaten het risico op inwendige condensatie in de materiaallagen aan de buitenzijde van de warmteisolatie
Luchtinstroming	Tast de isolatiekwaliteit aan Nekt de thermisch niet stationaire kwaliteit Verhoogt in warme, vochtige klimaten, waar binnen gekoeld en de lucht gedroogd wordt, het risico op inwendige condensatie achter de binnenafwerking Verhoogt in koude en gematigde klimaten het risico op schimmelontwikkeling en oppervlaktecondensatie Doet de kans op tochtklachten toenemen Breekt de akoestische isolatie af
Ventilatie	Doorgaans geroemd als alleen maar positief In werkelijkheid is spouwventilatie in veel gevallen een overbodige complicatie. Ook kan ze bij constructies, waar de buitenschil maar een zeer beperkte warmteverstand heeft, voor ongewenste onderkoelingscondensatie zorgen
Windspoeling	Tast de isolatiekwaliteit aan Nekt tot zekere hoogte de thermisch niet stationaire kwaliteit Verhoogt in warme, vochtige klimaten, waar binnen gekoeld en de lucht gedroogd wordt, het risico op inwendige condensatie achter de binnenafwerking Verhoogt in koude en gematigde klimaten het risico op schimmelontwikkeling en oppervlaktecondensatie
Binnenluchtstroming	Amper nadelen, tenzij...
Binnenluchtspoeling	Tast de isolatiekwaliteit aan Verhoogt in koude en gematigde klimaten het risico op inwendige condensatie in de materiaallagen aan de buitenzijde van de warmteisolatie

Rotatiestroming

Tast de isolatiekwaliteit aan

Kan in koude en gematigde klimaten het risico op inwendige condensatie verhogen



Figuur 7 De zeven luchtstromingspatronen

In werkelijkheid vermengen deze zeven patronen zich doorgaans tot één complex luchtstromingbeeld dat de opgesomde specifieke nadelen combineert.

Het verhinderen van uit- en instroming vraagt om het inbouwen van een continue luchtdichte laag. Het tegengaan van spoeling en rotatiestroming legt strikte eisen op aan de globale uitvoeringskwaliteit.

Bouwkundige impact

Binnenisolatie

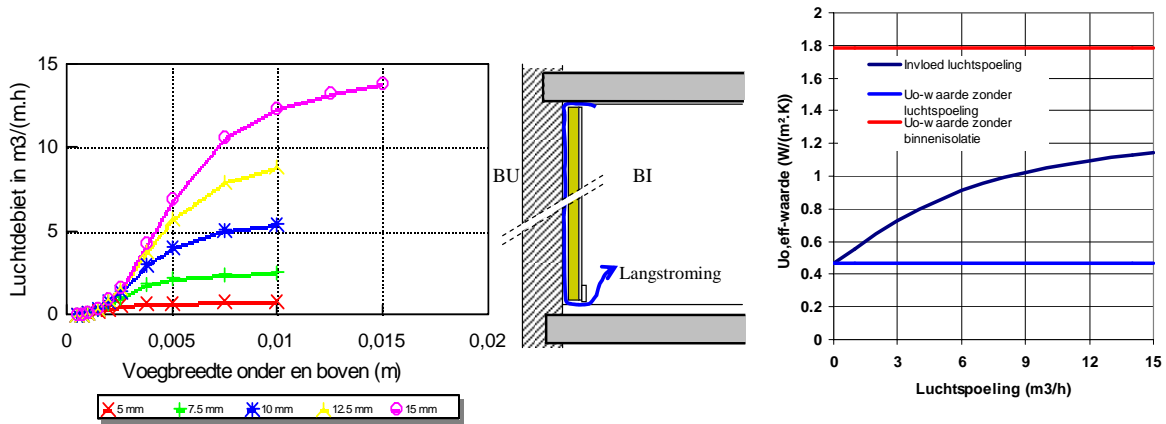
Figuur 8 toont wat binnenluchtspoeling door thermische trek aan debiet betekent bij een steen dikke muur in metselwerk met als binnenisolatie 6 cm minerale wol. Zonder haalt de netto warmtedoorgangscoefficiënt een waarde $0.47 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Met stijgt in het slechtste geval het bruto resultaat tot $1.15 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, een toename met 145%! Dat slechtste geval staat voor een 15 mm wijd luchtlagje tussen isolatie en massieve muur en een 15 mm wijde voeg onder en boven. Niet uitzonderlijk in de dagdagelijkse bouwpraktijk. De bruto warmtedoorgangscoefficiënt neemt, als de figuur aangeeft, op een niet lineaire wijze toe met het debiet. Het vervelend is dat dit's winters het grootste is, wanneer de warmte-isolatie haar functie optimaal zou moeten vervullen

Luchtspoeling vermijden, is niet moeilijk. Een kitvoeg tussen de binnenafwerking en de vloer of tussen de binnenafwerking en het plafond volstaat. Natuurlijk zijn naast luchtspoeling ook andere stromingspatronen mogelijk. Zo is een binnenisolatie met minerale wol vrij gevoelig aan rotatiestroming rond en in de wol.

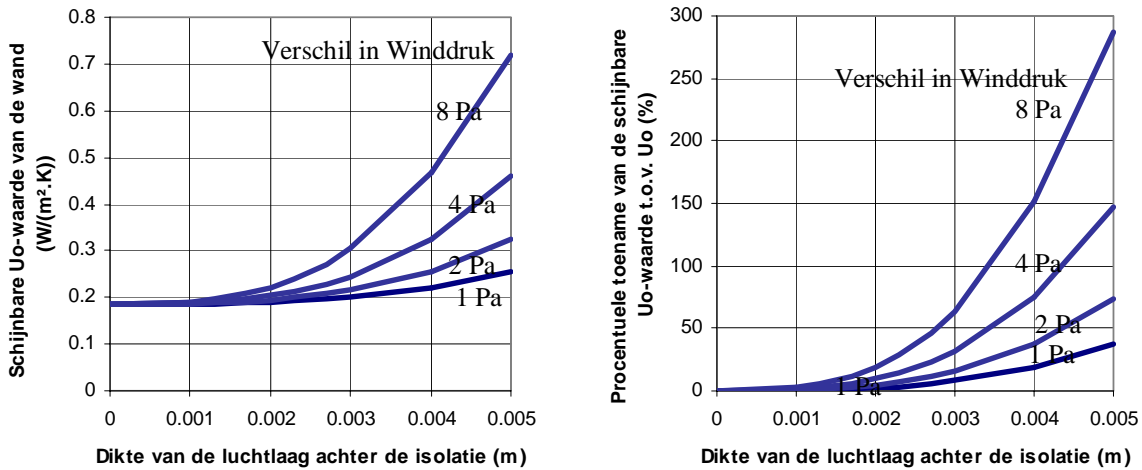
Gepleisterde buitenisolatie

Is windspoeling mogelijk, dan krijgen we in functie van het gemiddelde winddrukverschil bij een gevel van twee verdiepingen tussen isolatietop en isolatieaanzet de bruto warmtedoorgangscoefficiënt van figuur 9. Eens de doorgaande luchtlag dikker dan 2 mm, neemt de waarde sterk af met toenemend winddrukverschil. Hetzelfde geldt voor thermische trek, zie

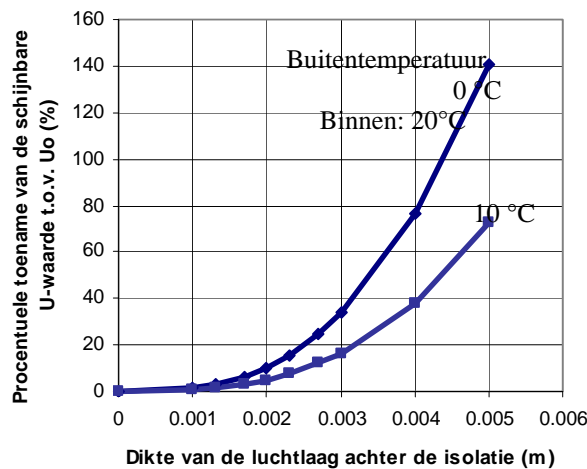
figuur 10. Alleen is het trekeffect een blijver en daardoor vervelender dan het windeffect. Beide onderlijnen echter wel het belang van een correcte kleeftechniek, waarbij bij elke plaat de omtrek dicht wordt gezet.



Figuur 8 Binnenisolatie: winters luchtdebiet door thermische trek in het luchtlaagje tussen warmte-isolatie en wand. Parameter: breedte van het luchtlaagje



Figuur 9 Windspoeling achter de buitenisolatie. Bruto warmtedoorgangscoefficiënt, procentuele toename ten opzichte van de netto waarde voor de wand zonder windspoeling



Figuur 10 Thermische trek achter de buitenisolatie. Bruto warmtedoorgangscoefficiënt, procentuele toename ten opzichte van de netto waarde voor de perfect uitgevoerde wand

Spouwmuren

Bij spouwmuren zorgen vooral rotatiestroming en windspoeling voor problemen. Hoe groot het verschil tussen de bruto en de netto warmtedoorgangscoefficiënt kan zijn, is experimenteel nagemeten in het VLIET proefgebouw op 2 maal 6 gevulde spouwmuren, waarvan er 6 zuid west en 6 noord oost waren georiënteerd. Bij de muren 2, 4 en 6 was de uitvoering volgens het boekje, bij de muren 1, 3 en 5 slordig, in die zin dat er open voegen tussen de isolatieplaten onderling gelaten werden en de platen niet tegen het binnenblad waren aangetrokken.

De resultaten vindt men samengevat in de tabellen 6 en 7. Uit beide tabellen blijkt dat het verschil in bruto warmtedoorgangscoefficiënt tussen goede en slechte uitvoering aanzienlijk, zeker bij een stijve isolatieplaat als XPS. Merkwaardig is dat na luchtdichting van het binnenblad de verschillen toenemen. Dat heeft te maken met de bolle temperatuurlijn in het binnenblad bij luchtuitstroming.

Figuur 11 maakt het fenomeen van rotatiestroming zichtbaar.

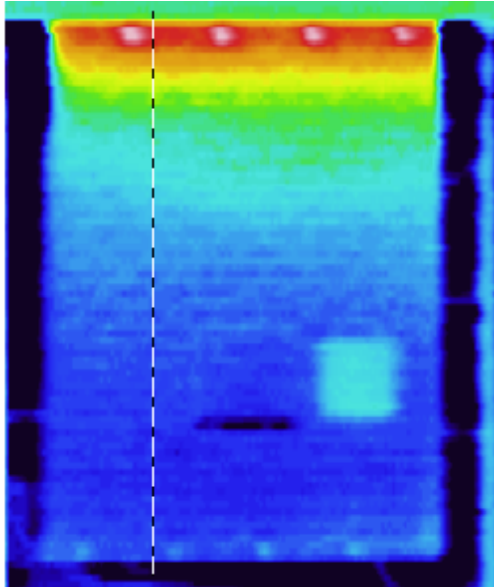
Tabel 6 Gemeten warmtedoorgangscoefficiënt bij spouwmuren met netto warmtedoorgangscoefficiënt 0.2 W/(m².K), luchtdoorlatend binnenblad

Cavity wall: veneer filled cavity inside leaf, no render Workmanship?	Fill		Intended U-value W/(m ² .K)	Measured U-value W/(m ² .K)			
	Partial	Full		First winter		Second winter	
				SW	NE	SW	NE
1. Poor		MF	0.22	0.37	0.32	0.39	0.33
2. Good		MF	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21
3. Poor	XPS		0.21	0.86	0.86	0.86	0.86
4. Good	XPS		0.21	0.23	0.21	0.23	0.21
5. Poor		XPS	0.21		0.51	0.60	0.79
6. Good		XPS	0.20	0.21		0.22	0.22

Tabel 7 Gemeten warmtedoorgangscoefficiënt bij spouwmuren met netto warmtedoorgangscoefficiënt 0.2 W/(m².K), luchtdicht binnenblad

Cavity wall: veneer filled cavity inside leaf, no render Workmanship?	Fill		Intended U-value W/(m ² .K)	Measured U-value W/(m ² .K)			
	Partial	Full		Second winter Before a-t*		Second winter After a-t	
				SW	NE	SW	NE
1. Poor		MF	0.22	0.39	0.33	0.44	0.35
2. Good		MF	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22
3. Poor	XPS		0.21	0.86	0.86	0.94	1.03
4. Good	XPS		0.21	0.23	0.21	0.27	0.21
5. Poor		XPS	0.21	0.60	0.79	0.68	0.94
6. Good		XPS	0.20	0.22	0.22	0.22	0.22

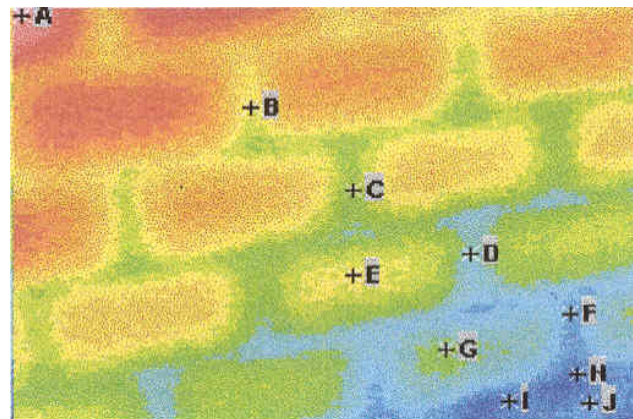
*: a-t: air tightening



Figuur 11 Muur met slordig uitgevoerde spouwvulling, infrarood foto van het buitenblad tijdens koud weer. De rode kleur boven maakt duidelijk dat het buitenblad daar een stuk warmer is dan lager het geval is. Reden: rotatiestroming rond de spouwvulling

Details

Dat luchtstroming ook op het niveau van de details speelt, toont figuur 12. Op de infrarood foto van een gepleisterd binnenblad kan men duidelijk de voegen tussen de snelbouwstenen aflezen. De reden is simpel. De slecht gevulde kopse voegen worden door de wind uitgespoeld.



Figuur 12 Infrarood foto van een gepleisterd binnenblad. De voegen tussen de snelbouw zijn probleemloos af te lezen

Besluit

Zowel koudebrugwerking als een gebrek aan luchtdichtheid heeft nadelige gevolgen voor de globale thermische kwaliteit en de vochthuishouding bij bouwdelen. Bij een gebrekkige luchtdichtheid komen daar nog andere elementen bij, zoals een slechtere thermisch transiënte respons, een afbouw van de akoestische eigenschappen en tocht.

Beide vermijden vraagt om een consequente detaillering en een goede uitvoering. Beide zijn nog te dikwijls een probleem.