



De thermische isolatie en de luchtdichtheid van gebouwen zijn twee prestaties die elkaar aanvullen. Samen met de hygiënische ventilatie, maken deze aspecten de pijlers uit voor het ontwerp, de constructie en de renovatie van comfortabele en energie-efficiënte gebouwen. Om deze prestaties ook ter hoogte van de bouwknopen te kunnen verzekeren, dient met ervoor te zorgen dat niet alleen de thermische isolatie, maar tevens het luchtscherm ononderbroken is. Daar waar de impact van de thermische isolatie gemakkelijk bepaald kan worden door berekening, is dit niet het geval voor de luchtdichtheid. Deze moet immers gemeten worden met behulp van een pressurisatieproef.

Energetische aspecten van bouwknopen

1 Bouwknopen ontwerpen met het oog op de thermische isolatie en de luchtdichtheid

Bouwknopen hebben een impact op de thermische prestaties van het gebouw. Hun relatieve belang is des te groter naarmate het beoogde prestatieniveau hoog is. De warmteverliezen via deze knopen kunnen berekend worden en maken het voorwerp uit van normen. Het effect ervan wordt eveneens in aanmerking genomen in de gewestelijke energieprestatie-eisen (EPB).

Wat de hygrothermische prestaties betreft, verwacht men van een bouwknop enerzijds dat hij toelaat om de warmteverliezen door transmissie (kwantificering met behulp van de ψ - en χ -factoren) te verminderen, en anderzijds dat het risico op oppervlaktecondensatie en schimmelontwikkeling op deze plaats tot een minimum beperkt wordt. Deze twee prestaties zijn nauw met elkaar verbonden. Het risico op condensatie en schimmelontwikkeling kan beoordeeld worden door een numerieke berekening op basis van de temperatuurfactor (f). Zo bestaan er aanbevelingen met betrekking tot de temperatuurfactor die bereikt moet worden om dit risico te beperken.

Wat de luchtdichtheid betreft, zijn er op de bouwknopen als dusdanig geen reglementaire eisen van toepassing. De eventuele aanwezigheid van luchtlekken zal echter wel weerspiegeld worden in de prestaties, opgemeten tijdens een pressurisatieproef op het gebouw. Deze prestatie kan niet bepaald worden door berekening. De luchtlekken hebben een weerslag op de energieprestaties van het gebouw, met name door de infiltratie- en exfiltratieverliezen die ze teweegbrengen. Ze kunnen eveneens aanleiding geven tot inwendige condensatie.

Zowel voor de thermische prestaties als voor de luchtdichtheid bestaat het algemene principe erin om de continuïteit van de thermische isolatie en het luchtscherm ter hoogte van het beschermde volume van het gebouw te verzekeren. Dit principe moet in eerste instantie toegepast worden op het niveau van het gebouw, meer bepaald bij de afbakening van het beschermde volume, en vervolgens op het niveau van de bouwknopen die zich aan de rand van het beschermde volume bevinden. Het luchtscherm moet aangepast worden aan de positie van de thermische isolatie. Vermits het luchtscherm meestal ook dienst doet als dampscherm, moet het zo dicht mogelijk tegen en steeds langs de warme zijde van de isolatie geplaatst worden.

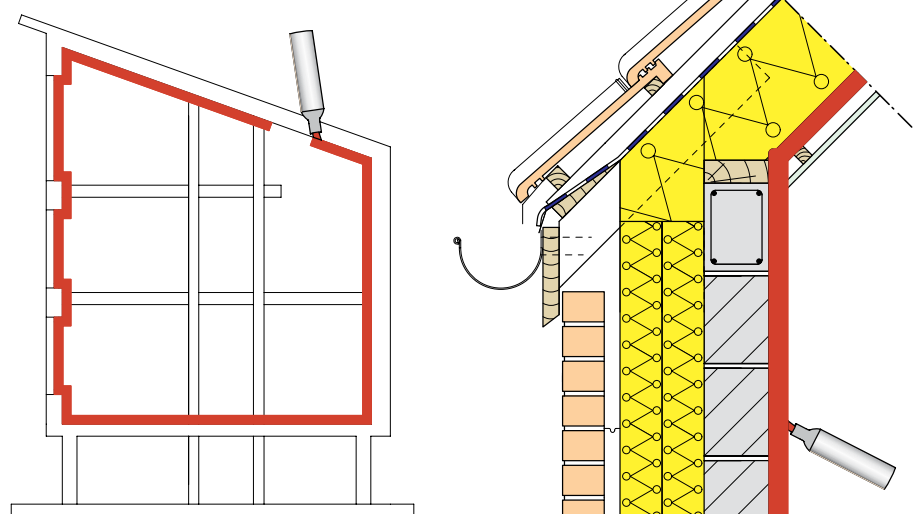
2 Hygrothermische prestaties

2.1 In aanmerking nemen van bouwknopen in de EPB-regelgeving

De reglementaire eisen inzake thermische

isolatie hebben de afgelopen jaren talloze aanpassingen en een gestage verstrenging gekend en dit, zowel op het vlak van de individuele wanden (U_{max} -waarden) als wat het globale isolatiepeil van het gebouw (K-peil) betreft (zie [WTCB-Dossier 2011/3.15](#)). De impact van de bouwknopen wordt sinds 2011-2012 op identieke wijze (zie [www.ibgebim.be](#) voor Brussel, [www.energiesparen.be](#) voor Vlaanderen en [energie.wallonie.be](#) voor Wallonië) in aanmerking genomen in de gewestelijke EPB-regelgevingen (zie [WTCB-Dossiers 2010/3.16](#) en [2011/3.6](#)). Gelet op de verstrenging van de reglementaire eisen en hun niet te onderschatten impact op de prestaties, is het van groot belang om de bouwknopen op een geschikte manier te behandelen.

De bouwknopen kunnen op verschillende manieren in aanmerking genomen worden in

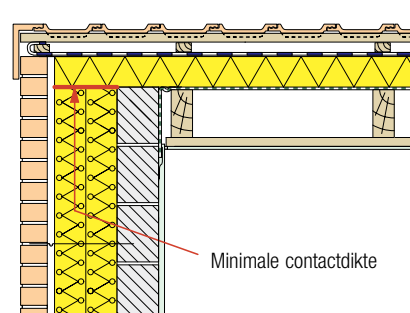


1 | Continuïteit van de thermische isolatie en het luchtscherm (rode lijn) op het niveau van het gebouw en de bouwknopen.

de context van de EPB-regelgeving (opties A, B en C). De gedetailleerde beschrijving van deze opties valt buiten het kader van dit artikel. In de regelgeving zijn er waarden bij ontstentenis opgenomen. Deze kunnen echter zeer ongunstige resultaten opleveren: tot 10 punten op het globale isolatiepeil (K-peil) van het gebouw. Om deze sanctiemaatregel te ontlopen, kan men ervoor opteren om ‘EPB-aanvaarde’ bouwknopen te ontwerpen en uit te voeren (optie B) en deze vervolgens te declareren. Deze conformiteit kan ofwel aangetoond worden door een aantal eenvoudige basisregels te respecteren, dan wel door een numerieke berekening uit te voeren ter bepaling van de ψ - of χ -factoren en daarna te bewijzen dat de beschouwde bouwknop voldoet aan welbepaalde prestatiecriteria (beperkte warmteverliezen door de aanwezigheid van een ononderbroken isolatie). Hoewel dergelijke numerieke berekeningen niet verplicht zijn, laten ze wel toe om betere prestaties in de verf te zetten, of aan te tonen dat een detail dat niet aan de basisregels beantwoordt wel degelijk ‘EPB-aanvaard’ kan zijn.

Indien men kiest voor optie B, kan men meestal op plan en zonder numerieke berekening nagaan of de bouwknopen ‘EPB-aanvaard’ zijn. Hiertoe kan men een beroep doen op drie eenvoudige basisregels:

- **de eerste** is van toepassing op knopen waarbij de thermische-isolatielagen van twee belendende wanden rechtstreeks met elkaar in contact staan en bestaat erin om een toereikende contactdikte tussen beide lagen te waarborgen (zie afbeelding 2)
- **de tweede** bestaat erin om een isolerend bouwdeel tussen de thermische-isolatiela-



Thermische prestatie: 4+ (zie tabel A)
Lucht dichtheid – Prioriteit van de behandeling van de knoop: 1 (zie tabel D)

2 | Basisregel nr. 1: minimale contactdikte tussen de thermische-isolatielagen van twee belendende wanden.

gen van twee belendende wanden toe te voegen (zie afbeelding 3)

- **de derde** bestaat erin om de warmteverliezen te beperken door de weg van de minste warmteweerstand tussen de binnen- en de buitenomgeving te verlengen (deze afstand moet minstens gelijk zijn aan 1 m, zie afbeelding 4).

2.2 Bouwknop of koudebrug?

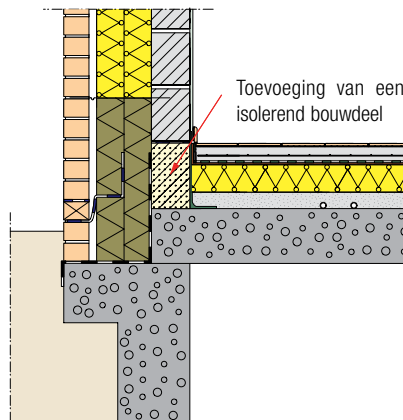
In de EPB-regelgevingen worden ‘bouwknopen’ omschreven als:

- de lineaire verbindingen tussen de verschillende scheidingsconstructies die deel uitmaken van het verliesoppervlak van een gebouw
- de lineaire en puntvormige onderbrekingen in de isolatielaag van de scheidingsconstructies, voor zover ze niet eigen zijn aan de scheidingsconstructies (spouwhaken, skelet ...).

De term ‘koudebrug’ wordt op zijn beurt gedefinieerd in verschillende normen (bv. NBN EN ISO 10211 en NBN EN ISO 14683). Hoewel beide begrippen niet identiek zijn, zijn ze wel nauw met elkaar verbonden.

2.3 Hygrothermische prestatiecriteria en classificatie van bouwknopen

De thermische prestatie van een bouwknop

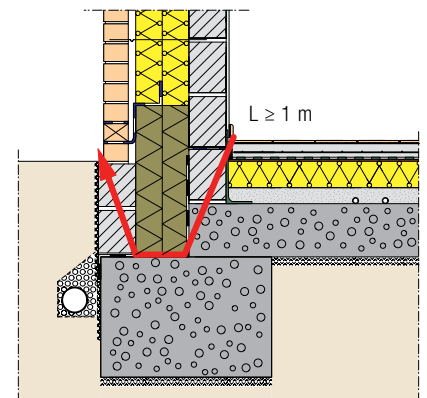


Thermische prestatie: 4+ (zie tabel A)
Lucht dichtheid – Prioriteit van de behandeling van de knoop: 3/4 (zie tabel D)

3 | Basisregel nr. 2: toevoeging van een isolerend bouwdeel.

kan beoordeeld worden aan de hand van een numerieke berekening met speciale programma’s (†) die gebaseerd zijn op de rekennormen (waaronder de NBN EN ISO 10211). De eendimensionale warmteverliezen doorheen het centrale deel van de wanden zijn afhankelijk van de U-waarde ($W/m^2.K$) ervan. Bij de berekening van de warmteverliezen van het gebouw houdt men in eerste instantie enkel rekening met deze U-waarden en dus niet met de bouwknopen. Het is echter belangrijk om weten dat deze warmteverliezen ook een twee- en driedimensionaal fenomeen zijn. Al naargelang van de geometrie van de aanwezige bouwknopen, zal deze eendimensionale berekening dus op bepaalde punten verbeterd moeten worden. Indien de bouwknop lineair is (bv. aansluiting tussen twee wanden), wordt de thermische correctie uitgedrukt door de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt ψ ($W/m.K$). Voor puntvormige bouwknopen (bv. kolom die de isolatie doorboort) wordt de thermische correctie gekarakteriseerd door de puntwarmtedoorgangscoefficiënt χ (W/K).

Het is de taak van de ontwerper om de beoogde energieprestatie van het gebouw in kwestie vast te leggen en de bouwknopen dienovereenkomstig te ontwerpen. Wanneer men zeer hoge thermische prestaties wil bereiken, kan het nodig zijn om over te gaan tot een numerieke berekening van de bouwknopen (zelfs indien deze ‘EPB-aanvaard’ zijn) teneinde de goede prestaties ervan te kunnen exploiteren.



Thermische prestatie: 3+ (zie tabel A)
Lucht dichtheid – Prioriteit van de behandeling van de knoop: 3/4 (zie tabel D)

4 | Basisregel nr. 3: de weg van de minste warmteweerstand moet minstens 1 m lang zijn.

(†) Er bestaan tal van programma’s voor de uitvoering van dit type berekeningen. Het programma KOBRA kan gratis gedownload worden via www.wtcb.be.



Een tweede hygrothermisch prestatiecriteria voor bouwknopen is hun temperatuurfactor f_{rsi} , die het risico op oppervlaktecondensatie en schimmelontwikkeling op de wanden weerspiegelt. Deze temperatuurfactor schommelt tussen 0 en 1. Een waarde van 1 betekent dat de temperatuur aan het binnenoppervlak gelijk is aan de temperatuur van de binnenlucht. Een bouwknop met een gunstige (hoge) temperatuurfactor zal een hoge binnenoppervlakte-temperatuur vertonen, waardoor het risico op oppervlaktecondensatie en schimmelontwikkeling beperkt zal zijn. Dit risico kan ook binnen de perken gehouden worden door het handhaven van een gunstig (niet te vochtig) binnenklimaat. De minimale temperatuurfactoren maken het voorwerp uit van een aantal aanbevelingen. Voor gebouwen met een redelijk droog binnenklimaat wordt er een minimumwaarde van 0,7 vooropgesteld (TV 153). Het is de taak van de ontwerper om de minimaal te bereiken temperatuurfactor voor het beschouwde project vast te leggen. Dit kan eventueel gebeuren op basis van een specifieke hygrothermische studie (2). Voor gebouwen met een hoge vochtproductie, met bijzondere randvoorwaarden en/of met een bijzonder binnenklimaat kunnen er immers strengere temperatuurfactoren nodig zijn. Dit impliceert dat een bouwknop die geschikt is voor een typewoning niet noodzakelijk geschikt is voor een gebouw met een ongunstiger (vochtiger) binnenklimaat.

We willen erop wijzen dat de bepaling van de thermische prestaties en de temperatuurfactor berust op rekenconventies (meetmethode, warmteovergangscoefficient aan het oppervlak, geometrische modellering van de knoop ...) die gerespecteerd moeten worden (3).

In tabel A wordt er op basis van beide vernoemde criteria (de thermische prestatie en de temperatuurfactor) een kwalitatieve classificatie voorgesteld, gaande van bouwknopen met zeer goede prestaties (4★) tot bouwknopen waarbij het risico op oppervlaktecondensatie en schimmelvorming reëel is (0★). De theoretische of weinig waarschijnlijke gevallen zijn aangeduid in het grijs. Het feit dat een bepaalde variant een minder goede score heeft, betekent niet zozeer dat het hier om een slechtere oplossing gaat, maar veeleer dat het toepassingsgebied ervan kleiner is.

Voor projecten waarvoor er bijzondere rand-

A | Kwalitatieve classificatie van bouwknopen naargelang van hun hygrothermische prestaties.

Criteria	Door berekening bepaalde temperatuurfactor $f_{0,25}$			Niet-berekenende temperatuurfactor $f_{0,25}$ (3)
	Voldoet aan een bijzondere eis (1) (2)	$f_{0,25} \geq 0,7$	$f_{0,25} < 0,7$	
Thermische prestatie	Voldoet aan een bijzondere eis	4★	4★	2★ (4)
	'EPB-aanvaarde' knoop (3) (4) (5)	4★/4★	3★	3★/2★
	Knoop die niet 'EPB-aanvaard' is (6)	5★	2★/1★	0★ (6)

(1) Ter illustratie van de in dit artikel gehanteerde benadering werd er voor de temperatuurfactor ($f_{0,25}$) een waarde van 0,85 aangenomen om te kunnen voldoen aan de bijzondere eisenklasse. Het is de taak van de ontwerper om geval per geval en in functie van de specifieke projectvoorwaarden een aanvaardbare grenswaarde vast te leggen en de bouwdetails dienovereenkomstig te ontwerpen/aan te passen.

(2) Zeer ongunstig binnenklimaat.

(3) De temperatuurfactor f zal dikwijls niet berekend worden. Deze factor is echter heel belangrijk wanneer de isolatie onderbroken is. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn wanneer de knopen niet 'EPB-aanvaard' zijn (met name in een renovatiecontext).

(4) Indien er bijzondere eisen gesteld worden, wordt er in principe een numerieke berekening uitgevoerd en is er dus informatie met betrekking tot de temperatuurfactor f beschikbaar.

(5) De overeenkomstigheid met de EPB-criteria wordt beoordeeld ongeacht het feit of er een EPB-eis van toepassing is of niet.

(6) 'EPB-aanvaarde' bouwknop waarbij de basisregels gerespecteerd zijn en/of waarvan de prestaties aangegeven werden door berekening ($\psi \leq \psi_{grens}$).

(7) In het geval van ongeïsoleerde of weinig thermisch geïsoleerde wanden (warmteweerstand $\leq 1,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) – bijvoorbeeld in een renovatiecontext – moet enkel nagegaan worden of de basisregels gerespecteerd werden. Een ψ -waarde \leq de ψ_{grens} -waarde heeft in dit geval slechts weinig zin.

(8) 0★ : bouwknop waarbij het risico op condensatie/schimmelontwikkeling reëel is.

B | Minimaal aanbevolen prestatieniveau voor bouwknopen (naargelang van de projectvoorwaarden).

Situatie	Minimaal aanbevolen prestatieniveau
Gebouw met een (zeer) ongunstig binnenklimaat	4★
Gebouw dat moet beantwoorden aan bijzondere energieprestatie-eisen (zeer performant gebouw)	4★
Gebouw dat moet beantwoorden aan de thermische isolatie-eisen uit de EPB-regelgeving	2★
Alle andere gevallen (bv. een renovatiecontext)	1★
Niet-verwarmde gebouwen	0★

voorwaarden gelden, kan het noodzakelijk zijn om te opteren voor bouwknopen met een zeker prestatieniveau (4★ → 1★). Tabel B geeft aanbevelingen omtrent het minimale prestatieniveau van de bouwknopen in functie van de projectvoorwaarden. Zo is het prestatieniveau 0★ uit den boze voor verwarmde gebouwen. Indien er zich in een bepaald project meerdere van de beschreven situaties kunnen voordoen, dient men rekening te houden met het hoogste aanbevolen prestatieniveau.

2.4 Voorbeeld van de aansluiting van een hellend dak met een puntgevel

Om de verschillende energieprestatieniveaus voor eenzelfde bouwknop te illustreren, wordt er in dit artikel uitgegaan van de aansluiting van een hellend dak met een puntgevel uit metselwerk. Naargelang van de warmtegeleidbaarheidscoefficiënt (λ) van het dragende metselwerk, de aan- of afwezigheid van een thermische isolatie aan de

(2) Voor meer details verwijzen we naar de norm NBN EN ISO 13788.

(3) Bij de bepaling van de temperatuurfactor f_{rsi} houdt men rekening met een ongunstige overgangswaarde aan het oppervlak R_{si} ter waarde van $0,25 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.



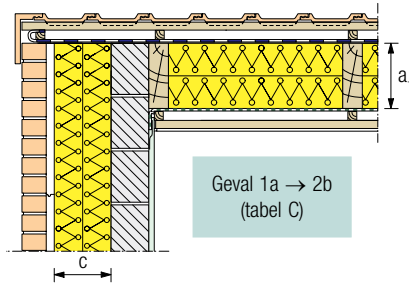
muurkop en het isolatieniveau van de wanden (U-waarden) worden er verschillende gevallen beschouwd, gaande van zeer slecht tot zeer goed presterende knopen (zie tabel C) (4). Er worden eveneens oplossingen voorgesteld die toepasbaar zijn in een renovatiecontext. Om beschouwd te kunnen worden als ‘EPB-aanvaard’, moet de bouwknop in dit geval een ψ_{grens} -waarde van 0 W/m.K vertonen.

Het basisvoorbeeld, dat voor de meest ongunstige gevallen overeenstemt met een knoop waarbij het risico op condensatie en schimmelvorming reëel is, is een spouwmuur zonder isolatie aan de muurkop (zie afbeelding 5). Zowel voor metselwerk uit beton (gevallen 1a en 1b) als voor metselwerk uit gebakken aarde (gevallen 2a en 2b) werden er verschillende thermische prestaties beschouwd: zo werd er in het beschikbare gamma zowel een product met een hoge als met een lage λ -waarde geselecteerd. Verder willen we erop wijzen dat het metselwerk niet alleen moet voldoen aan deze thermische prestatie, maar ook aan bepaalde eisen op het vlak van stabiliteit.

Een beter presterende variant van dit detail bestaat erin om het dragende metselwerk uit beton (geval 3) of gebakken aarde (geval 4) een beetje lager te laten eindigen en de muurkop te isoleren (zie afbeelding 6). Er werd eveneens een variant uit isolerende bouwblokken beschouwd (geval 5).

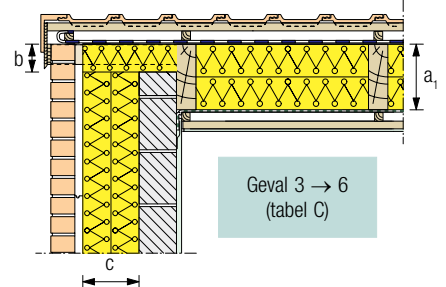
De best presterende onderzochte varianten worden gekarakteriseerd door het feit dat er twee wanden met verbeterde thermische prestaties met elkaar verbonden worden. Bij geval 6 is er zowel een isolatiemateriaal aanwezig tussen de kepers van het dak als ter hoogte van de muurkop (zie afbeelding 12, p. 13). Geval 7 stemt overeen met de uitvoering van een duodak (isolatie tussen de kepers + sarking) en het onmogelijk is om de muurkop te isoleren (geval 2), kan de eenvoudige plaatsing van een sierlijst uit gips in de hoek ervoor zorgen dat er geen luchtcirculatie meer optreedt. Dit kan leiden tot een sterke verhoging van de temperatuurfactor, terwijl het effect op de thermische prestatie verwaarloosbaar blijft. Hoewel deze maatregel de correcte isolatie van het detail geenszins vervangt, zorgt hij wel voor een sterke vermindering van het risico op oppervlaktecondensatie en schimmelvorming.

Er werden ook verschillende oplossingen beschouwd die toepasbaar zijn in een renovatiecontext (zie afbeelding 8). In dit geval is de puntgevel opgebouwd uit massief baksteenmetselwerk met een dikte van 29 cm. De eerste oplossing bestaat erin om enkel een isolatiemateriaal aan te brengen tussen de



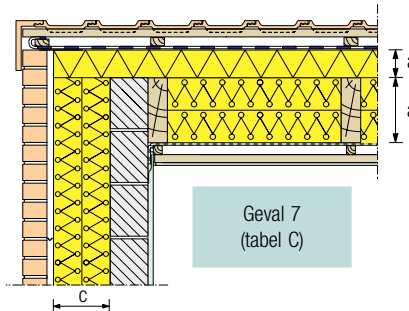
Thermische prestatie: 0* → 2*/1* (of 3*) (zie tabel A)

5 | Aansluiting tussen een puntgevel en een hellend dak; basisgeval; ongeïsoleerde muurkop.



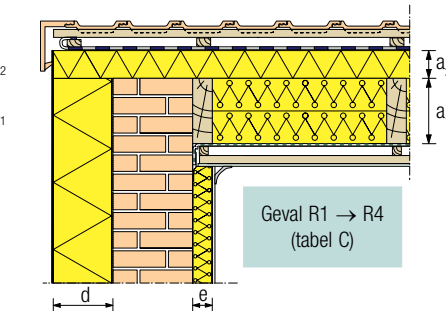
Thermische prestatie: 3* → 4*

6 | Continuïteit van de thermische isolatie dankzij de isolatie van de muurkop.



Thermische prestatie: 4*/4*

7 | Bouwdetail met verbeterde prestaties.



Thermische prestatie: 0* → 4*

8 | Aansluiting tussen een puntgevel en een hellend dak; mogelijke oplossing in een renovatiecontext.

kepers van het dak en de muurkop ongeïsoleerd te laten (geval R1). Bij de varianten R2 en R3 wordt er respectievelijk een bijkomende muurisolatie aangebracht langs de buiten- en de binnenkant. Bij de variant R4 wordt er ten slotte een duodak (isolatie tussen de kepers + sarking) uitgevoerd en wordt er een bijkomende muurisolatie aangebracht langs de buitenkant. Wanneer er een muurisolatie aangebracht wordt langs de buitenkant en het onmogelijk is om de muurkop te isoleren (geval 2), kan de eenvoudige plaatsing van een sierlijst uit gips in de hoek ervoor zorgen dat er geen luchtcirculatie meer optreedt. Dit kan leiden tot een sterke verhoging van de temperatuurfactor, terwijl het effect op de thermische prestatie verwaarloosbaar blijft. Hoewel deze maatregel de correcte isolatie van het detail geenszins vervangt, zorgt hij wel voor een sterke vermindering van het risico op oppervlaktecondensatie en schimmelvorming.

De beschrijving en de prestaties van deze verschillende varianten, evenals de classificatie

van de overeenkomstige bouwknopen, zijn opgenomen in tabel C (p. 11). Hieruit blijkt duidelijk dat het risico op condensatie en schimmelontwikkeling bij een bouwknop die geen specifieke behandeling kreeg redelijk hoog is (0*), terwijl dezelfde bouwknop, mits een aangepaste behandeling, een zeer hoog prestatieniveau kan bereiken (4*).

3 Luchtdichtheidsprestaties

Sedert de invoering van de EPB-regelgeving worden de luchtdichtheidsprestaties in aanmerking genomen bij de berekening van de energieprestatie. Op dit ogenblik is de uitvoering van een pressurisatieproef facultatief in het kader van de regelgeving. Bij gebrek aan dergelijke proefresultaten kunnen de reglementaire berekeningen uitgevoerd worden met behulp van een ongunstige ontstenteniswaarde. Het is echter ook mogelijk om de reële luchtdichtheidsprestatie – gemeten met een pressurisatieproef – in

(4) De waarden die in deze tabel vermeld worden ($f_{0,25}$ en ψ) zijn enkel geldig voor de specifieke beschouwde gevallen (geometrie van de knoop, afmetingen, dikte en thermische prestatie van de materialen, λ -waarden). De KOBRA-bestanden die overeenstemmen met deze varianten zijn beschikbaar op onze website. Dankzij deze bestanden en het KOBRA-programma is het mogelijk om de rekenparameters aan te passen aan de specificiteiten van de beschouwde knoop.


C | Classificatie van de aansluiting van een puntgevel uit metselwerk op een hellend dak naargelang van de thermische prestatie.

Geval	Beschrijving van de variant – Type dragend metselwerk	Karakteristieken a_1, a_2, b, c, d, e in cm ⁽¹⁾ U in $W/m^2.K$	'EPB-aanvaard' volgens de basisregels	'EPB-aanvaard' $\psi \leq \psi_{grens}$ [W/m.K]	$f_{0,25}$ [-]	Warmteverlies van de knoop [%]	Classificatie van de knoop
1a	Ongeïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit beton (hoge λ -waarde)	$a_1 = 23 - c = 10$ $U_{muur} = 0,23 - U_{dak} = 0,20$	✗	✗ $\psi = 0,23$	0,65	146 %	0★
1b	Ongeïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit beton (lage λ -waarde)	$a_1 = 23 - c = 10$ $U_{muur} = 0,22 - U_{dak} = 0,20$	✗	✗ $\psi = 0,022$	0,77	106 %	2★/1★
2a	Ongeïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit gebakken aarde (hoge λ -waarde)	$a_1 = 12 - c = 10$ $U_{muur} = 0,22 - U_{dak} = 0,20$	✗	✗ $\psi = 0,015$	0,77	104 %	2★/1★
2b	Ongeïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit gebakken aarde (lage λ -waarde)	$a_1 = 23 - c = 10$ $U_{muur} = 0,21 - U_{dak} = 0,20$	✗	✓ (✗) ⁽²⁾ $\psi = -0,012$	0,80	99 %	3★ (2★/1★)
3	Geïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit beton (hoge λ -waarde)	$a_1 = 23 - b = 10 - c = 10$ $U_{muur} = 0,23 - U_{dak} = 0,20$	✓	✓ $\psi = -0,024$	0,84	100 % Referentiegeval	3★
4	Geïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit gebakken aarde (lage λ -waarde)	$a_1 = 23 - b = 10 - c = 10$ $U_{muur} = 0,21 - U_{dak} = 0,20$	✓	✓ $\psi = -0,053$	0,84	91 %	3★
5	Ongeïsoleerde muurkop – dragend metselwerk uit isolerende bouwblokken	$a_1 = 23 - c = 10$ $U_{muur} = 0,20 - U_{dak} = 0,20$	✓	✓ $\psi = -0,055$	0,84	88 %	3★
6	Geïsoleerde muurkop – Verbeterde muurisolatie	$a_1 = 23 - b = 10 - c = 20$ $U_{muur} = 0,12 - U_{dak} = 0,11$	✓	✓ $\psi = -0,022$	0,87	76 %	4★/4★
7	Verbeterde muur- en dakisolatie (duodak)	$a_1 = 23 - a_2 = 10 - c = 20$ $U_{muur} = 0,12 - U_{dak} = 0,11$	✓	✓ $\psi = -0,023$	0,90	51 %	4★/4★
Renovatie							
R1	Renovatie – dakisolatie tussen de kepers – ongeïsoleerde massieve muur uit baksteen (29 cm)	$a_1 = 23$ $U_{muur} = 2,28 - U_{dak} = 0,20$	✗	niet van toepassing (ongeïsoleerde wand) ⁽³⁾	0,43	510 %	0★
R2	Renovatie – dakisolatie tussen de kepers + massieve langs buiten geïsoleerde muur – ongeïsoleerde muurkop	$a_1 = 23 - d = 10$ $U_{muur} = 0,26 - U_{dak} = 0,20$	✗	✗ $\psi = 0,18$ zonder sierlijst	0,68	145 %	0★
				✗ $\psi = 0,17$ met een sierlijst uit gips (10 cm)	0,76	142 %	2★/1★
R3	Renovatie – dakisolatie tussen de kepers + massieve langs binnen geïsoleerde muur	$a_1 = 23 - e = 10$ $U_{muur} = 0,28 - U_{dak} = 0,20$	✓	✓ $\psi = -0,09$	0,79	100 %	3★
R4	Renovatie – duodak (isolatie tussen de kepers + sarking) – massieve langs buiten geïsoleerde muur	$a_1 = 23 - a_2 = 10 - d = 10$ $U_{muur} = 0,26 - U_{dak} = 0,11$	✓	✓ $\psi = -0,034$	0,85	83 %	4★/4★

a_1 : dikte van de dakisolatie tussen de kepers; a_2 : dikte van de dakisolatie (sarking); b : dikte van de isolatie van de muurkop; c : dikte van de isolatie van de spouwmuur; d : dikte van de langs buiten aangebrachte muurisolatie; e : dikte van de langs binnen aangebrachte muurisolatie

(1) De waarde van de parameters a_1, a_2, b, c, d en e waarvoor er in deze tabel geen waarde vermeld is, mag gelijkgesteld worden aan nul.
(2) Naargelang van de dikte van de verschillende lagen en de prestaties van de gebruikte materialen, ligt de ψ -waarde van deze variant net boven of net onder de ψ_{grens} -waarde. Het is steeds mogelijk om een numerieke berekening uit te voeren om de werkelijke prestaties van de opbouw in kwestie aan te tonen.
(3) In dit geval is de ψ -waarde gelijk aan -0,42 W/m.K.



rekening te brengen. Vandaag de dag is er geen enkele expliciete reglementaire eis van toepassing op de luchtdichtheid. Voor specifieke projecten kan er daarentegen wel een vrijwillig eisenniveau vastgelegd worden door de bouwheer. Het Brussels Hoofdstedelijk Gewest heeft aangekondigd dat er in de loop van de volgende jaren wel degelijk een luchtdichtheids-eis van kracht zal worden.

In tegenstelling tot de thermische isolatie kan de luchtdichtheidsprestatie van een gebouw of een specifieke bouwknop niet voorspeld of berekend worden. Het is bijgevolg onmogelijk om een eenduidig verband te leggen tussen de uit te voeren bouwdetails en de luchtdichtheidsprestatie die uiteindelijk gemeten zal worden. Men kan echter wel bepalen welke bouwknopen prioritair behandeld moeten worden.

3.1 Een luchtdichte constructie vanaf de ontwerpfase

De realisatie van een luchtdicht gebouw begint vanaf de ontwerpfase. Naast de geometrie van het gebouw en de afbakening van het beschermde volume hebben ook het aantal bouwknopen en hun complexiteit evenals het beoogde ambitieniveau een belangrijke invloed op de technische keuzes die men zal moeten maken voor het gebouw in kwestie. De uitvoering van een luchtdicht gebouw gebeurt in verschillende stappen. Deze zullen gedetailleerd aan bod komen in de desbetreffende TV die binnenkort zal verschijnen. De stappen die specifiek zijn voor bouwknopen zijn opgenomen in afbeelding 9.



9 | Stappen in de uitvoering van de bouwknopen in een luchtdicht gebouw.

D | Classificatie volgens de prioriteit waarmee de bouwknopen behandeld moeten worden (de volledige versie van deze tabel is beschikbaar in de TV 'Luchtdichtheid' die weldra zal verschijnen) (*).

Bouwknop	Massieve constructie (metselwerk)	Houtskeletbouw
Muurvoet	3/4	1
Aansluiting van een hellend dak met een puntgevel	1	1/2
Aansluiting van een tussenvloer met een gevel	3/4	1/2
Doorboring van het dak door leidingen	2	2
Integratie van het schrijnwerk in de ruwbouw	2/3	2/3

(*) 1: zeer grote lekken; 2: grote lekken; 3: onbelangrijke lekken; 4: marginale lekken.

E | Luchtdichtheidsklassen voor bouwelementen; geval van een hellend dak (uittreksel uit de TV 251).

Klasse	Niveau	Beschrijving
Lo	Ontoereikende luchtdichtheid	Weinig verzorgde uitvoering of onzorgvuldig ontwerp; de richtlijnen voor een continue luchtdichtheid werden niet gerespecteerd: er is geen luchtscherm aanwezig of het luchtscherm werd niet ononderbroken aangebracht; het luchtscherm werd niet luchtdicht aangesloten op de wanden of de andere bouwelementen (bv. gordingen of tussenspanen) die het begrenzen.
L1	Goede luchtdichtheid	Verzorgde uitvoering en zorgvuldig ontwerp; de richtlijnen voor een continue luchtdichtheid werden gerespecteerd: de aansluitingen vertonen geen zichtbare lekken.
L2	Gevalideerde en verbeterde luchtdichtheid (L1 + pressurisatieproef + correctie van lekken)	Verzorgde uitvoering en zorgvuldig ontwerp; de richtlijnen voor een continue luchtdichtheid werden gerespecteerd; het prestatieniveau wordt gevalideerd door een <i>in-situ</i> meting, waarbij alle detecteerbare luchtlekken in het bouwelement (in dit geval het hellende dak) opgespoord en afgedicht worden.

3.2 Identificatie van de prioritair te behandelen bouwknopen

Dankzij de ervaring die opgedaan werd op het vlak van luchtdichtheid, was het mogelijk om de luchtlekken in klassen in te delen in functie van hun invloed bij gebrek aan een specifieke behandeling (tabel D). Deze lekken kunnen aanzienlijk zijn of redelijk beperkt. Er kon eveneens een lijst met prioritair te behandelen bouwknopen opgesteld worden, rekening houdend met het belang van de hierdoor veroorzaakte lekken. In gebouwen met een streng eiseniveau kan zelfs het kleinste luchtlek ervoor zorgen dat het vooropgestelde doel niet behaald wordt. In gebouwen waarvoor er een gemiddeld prestatieniveau beoogd wordt, dient men zich prioritair toe te leggen op de belangrijkste lekken. Het is de taak van de ontwerper om voor elk project (naargelang van de specifieke geometrie, de meetstaat en het ambitieniveau) de prioritair te behandelen bouwknopen te bepalen evenals de aard en de omvang van hun behandeling. In functie van de meetstaat van

het betreffende gebouw kunnen bepaalde als minder prioritair beschouwde lekken immers een grotere invloed hebben dan andere.

3.3 Luchtdichtheidsklassen voor bouwelementen

Onzorgvuldig uitgevoerde luchtdichte aansluitingen, met name ter hoogte van lichte wanden, vormen niet zelden het toneel van aanzienlijke luchtlekken. Deze lekken kunnen aanleiding geven tot ernstige inwendige condensatieproblemen. Om dit risico te beperken, en dan vooral in hellende daken, werd er een minimaal kwaliteitsniveau vastgesteld voor de luchtdichte uitvoering van de wand en de aansluitingen (L1 of beter al naargelang van de opbouw; zie tabel E). In de praktijk mag er geen enkel met het blote oog zichtbaar luchtlek blijven bestaan.

In geval van een onzorgvuldig uitgevoerde aansluiting (klasse Lo) kunnen de luchtlekken aanzienlijk zijn. Bij een drukverschil van 50 Pa



10 | Voorbeeld van een 'droog-droog'-aansluiting.

kan er via een vrij oppervlak van 1 cm^2 een luchtdebiet van zo'n 2 tot $3 \text{ m}^3/\text{u}$ passeren. In een gemiddeld gebouw kan een onzorgvuldig uitgevoerde aansluiting tussen een hellend dak en een puntgevel (een 2 mm brede opening over een 25 m lange aansluiting) bij een drukverschil van 50 Pa aanleiding geven tot een lekdebiet van zo'n $1.000 \text{ m}^3/\text{u}$ (6).

3.4 Verzekeren van de continuïteit van de luchtdichtheid

De TV 251 (bijlage D) geeft een gedetailleerde beschrijving van de regels om de continuïteit van de luchtdichtheid te verzekeren. Eerst en vooral dient men voor elke afzonderlijke wand de laag te identificeren die de luchtdichtheid moet waarborgen (functie van luchtscherm). Ter hoogte van de bouwknope dient men erop toe te zien dat de continuïteit van deze luchtdichtheid tussen de wandelementen die de rol van luchtscherm vervullen gewaarborgd is. Hiertoe kan men een beroep doen op verschillende types aansluitingen:

- een 'droog-droog'-aansluiting (zie afbeelding 10), die de continuïteit van de luchtdichtheid waarborgt tussen bouwelementen zoals het soepele membraan, de houten plaat en de droge binnenbepleistering. Producten die in aanmerking komen voor de correcte uitvoering van dit aansluitingstype zijn (een- of tweezijdige) kleefband, lijmen, kittens of samendrukbare stroken. Dit type aansluiting is bijzonder geschikt voor de renovatie van bestaande gebouwen
- een 'droog-nat'-aansluiting, die de continuïteit van de luchtdichtheid waarborgt

(6) In een gebouw van 700 m^3 kan een dergelijk lek zorgen voor een variatie van $1,4 \text{ h}^{-1}$ ($= 1.000/700$) van het luchtverversingsdebiet bij 50 Pa (n_{50}).

F | Vergelijking van de mogelijke oplossingen voor de uitvoering van de aansluiting.

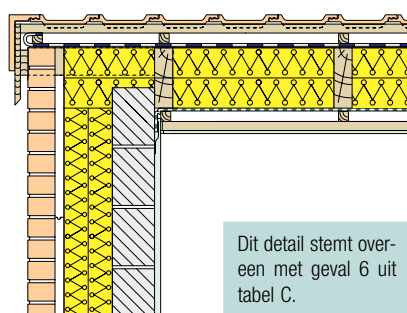
Type behandeling	Initiële prestatie	Uitvoeringsaspect	Duurzaamheid
Geen behandeling (zichtbaar lek)	Klasse Lo – niet toegelaten	–	–
Uitvoering van een 'droog-droog'-aansluiting	Klasse L1 (of L2)	Dit is de enige mogelijke oplossing indien de puntgevel vooraf bepleisterd werd (bv. in een renovatiecontext)	Deze twee aansluitingstypes hebben een vergelijkbare duurzaamheid
Uitvoering van een 'droog-nat'-aansluiting		Bijzondere rol voor de plafonneerder	

tussen bouwelementen zoals het soepele membraan, de houten plaat en de verse bepleistering tijdens de uitvoering van de luchtdichte verbinding. Om de prestaties en de duurzaamheid van deze verbinding veilig te stellen, zijn er vaak specifieke producten vereist. Het kan hiero.a. gaan om aan de ondergrond bevestigde producten die bepleisterd kunnen worden en stroken die in de bepleistering ingebed worden.

3.5 Voorbeeld van de aansluiting van een hellend dak met een puntgevel

In een hellend dak doet het dampscherm meestal ook dienst als luchtscherm. Bij muren uit metselwerk is het doorgaans de binnenbepleistering die deze rol vervult. De continuïteit van de luchtdichtheid tussen deze twee wanden moet verzekerd worden door middel van een geschikte aansluiting ('droog-droog'-aansluiting of 'droog-nat'-aansluiting). Deze aansluitingen zijn hierna voorgesteld voor een muur uit metselwerk (afbeelding 11) en een houtskelwand (afbeelding 12).

De verschillende mogelijke oplossingen voor de uitvoering van de aansluiting zijn vermeld in de vergelijkende tabel F.



Dit detail stemt overeen met geval 6 uit tabel C.

11 | Aansluiting van een hellend dak met een puntgevel uit metselwerk; verbinding tussen het dampscherm en de binnenbepleistering.

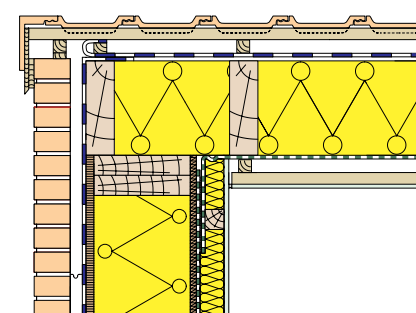
Naargelang van de opgelegde eisen kan het noodzakelijk zijn om de voorgestelde configuratie enigszins aan te passen ter verbetering van de akoestische prestaties. De keuze van een geschikt isolatiemateriaal en een gepaste binnenafwerking en de ont koppeling tussen de binnenafwerking en het timmerwerk door middel van metalen profielen kunnen in deze context een oplossing bieden.

4 Besluit

De luchtdichtheidsprestaties en de thermische isolatie zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden. De beoogde prestatieniveaus kunnen elementair of juist zeer hoog zijn. De prestatie van de bouwknope moet echter steeds in overeenstemming zijn met het globale prestatieniveau dat beoogd wordt voor het gebouw. De kwaliteit van de uitvoering van de bouwknope is van groot belang. Dit aspect moet bijgevolg in aanmerking genomen worden vanaf de ontwerpfasen. ■

X. Loncour, ir., A. Tilmans, ir., en C. Mees, ir.,
afdeling Energie, WTCB

Dit artikel werd opgesteld in het kader van de Normen-Antenne Energie, met de financiële steun van de FOD Economie.



12 | Aansluiting van een hellend dak met een puntgevel uit houtskelbouw.