

WARM-BOUWEN, EEN ALTERNATIEF VOOR THERMISCHE ISOLATIEMATERIALEN

EEN AANPAK VOOR ENERGIEBESPARING IN GEBOUWEN DOOR HET ALTIJD LENTE TE MAKEN

Warm-bouwen, de toevoer van laagwaardige warmte ($15-20^{\circ}\text{C}$) aan de gebouwschil, kan leiden tot een besparing van 30% (primaire) energie voor ruimteverwarming ten opzichte van dezelfde situatie zonder warm-bouwen. Ondiepe geothermie (tot 500 m) of een andere laagwaardige hernieuwbare warmtebron is hierbij een belangrijke sleutel. Warm-bouwen kent minder ruimtebeslag ten opzichte van gelijkwaardige conventionele thermische isolatie. De techniek is daarom vooral interessant bij bestaande gebouwen. Bij warm-bouwen ontstaat veel minder snel inwendige condensatie inherent aan het principe ervan. Zo wordt voorkomen dat schade ontstaat aan vochtgevoelige materialen in de gebouwschil waarvoor anders lastig uit te voeren luchtdichting aan de binnenzijde noodzakelijk zou zijn. Dit artikel beschrijft de werking van warm-bouwen en de kwantificering van de fysische en energetische prestaties.



ir. A. G. (Antonin) van de Bree, Bouwdynamica, Utrecht

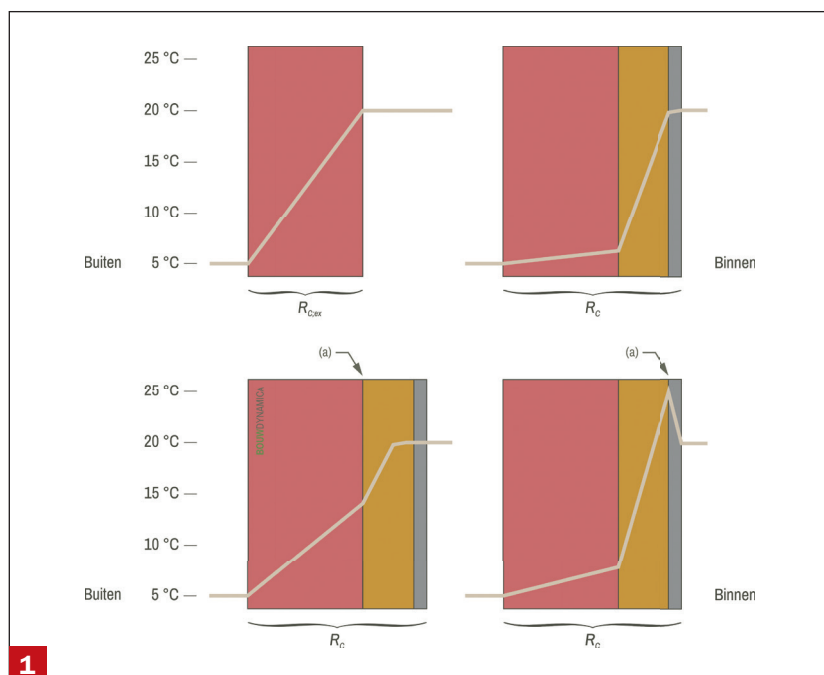
HET PRINCIPE VAN WARM-BOUWEN EN HET VERSCHIL MET WANDVERWARMING

Materiaaleigenschappen bepalen de warmtestroom door een uitwendige scheidingsconstructie waarover een temperatuurverschil bestaat. Bij warm-bouwen en wandverwarming wordt de warmtestroom daarnaast ook bepaald door beïnvloeding van het temperatuurverschil, de drijvende kracht achter de warmtestroom. De warmtestroom is een maat voor de warmteweerstand.

Het verschil tussen warm-bouwen en wandverwarming zit in de actieve laag, het punt in een constructie waar het natuurlijke temperatuurverloop wordt verstoord. Het natuurlijke temperatuurverloop is het passieve gevolg van een temperatuurverschil over de *gehele* constructie. Bij verstoring daarvan door warm-bouwen blijft de temperatuur in de actieve laag *onder* de temperatuur aan de warme zijde van de constructie, zijnde de binnentemperatuur. Bij wandverwarming ligt de temperatuur in de actieve laag juist *boven* de binnentemperatuur. Door de verstoring zal elders in de constructie de temperatuur ook (passief) veranderen. Figuur 1 toont de verschillen in het karakteristieke temperatuurverloop in een constructie voor zuiver passief gedrag met en zonder thermische isolatie, voor wandverwarming en voor warm-bouwen.

Een hogere temperatuur in de actieve laag *vermindert* de warmtestroom aan de warme zijde daarvan (of keert deze zelfs om) en *vermeerdert* de warmtestroom aan de koude zijde. Gelijktijdige vermindering van de warmtestroom aan de warme zijde en vermeerdering van de warmtestroom aan de koude zijde van de actieve laag en toch energie besparen klinkt paradoxaal. Desondanks is energiebesparing mogelijk door verschillen in de energetische kwaliteit van beide warmtestromen.

Een temperatuur in de actieve laag *onder* de temperatuur in de aangrenzende ruimte impliceert dat nog een andere warmtebron nodig is om de gewenste binnentemperatuur te bereiken. Naarmate de temperatuur van de actieve laag de gewenste binnentemperatuur nadert, neemt de rol van deze andere warmtebron wel af. Warm-bouwen leidt tot een besparing van (primaire) energie wanneer de benodigde (primaire) energie om de actieve laag op de gewenste temperatuur te houden *minder* is dan de bespaarde (primaire) energie voor de andere verwarming.



1 Karakteristiek temperatuurverloop in de winter voor (van linksboven met de klok mee): een ongeïsoleerde gevel, een geïsoleerde gevel, een geïsoleerde gevel met wandverwarming en een enigszins geïsoleerde gevel met warm-bouwen. De actieve laag ligt bij punt (a). Verschillen in warmte-overdracht aan het oppervlak zijn genegeerd

PARAMETERS

De warmtestroom in constructies zónder warm-bouwen wordt bepaald door het temperatuurverschil over de constructie ($\theta_i - \theta_e$), de warmteweerstand (R) van het materiaal of de materialen waaruit de constructie is samengesteld, de oppervlakte van de constructie (S), de warmteoverdracht aan weerszijde van de constructie (α_e, α_i) en de zoninstraling op de gevel (Q_{zon}). Mét warm-bouwen wordt de warmtestroom ook bepaald door de temperatuur in de actieve laag (θ_{AL}), mede als gevolg van de daar toegevoerde warmte ($Q_{H;WB}$), en door de positie van de actieve laag in de constructie. Het gaat dan om de positie van de actieve laag in relatie tot de warmteweerstand van de constructie aan weerszijden van de actieve laag ($R_{C;e}, R_{C;i}$). De energetische prestaties van warm-bouwen worden verder bepaald door:

- De (primaire) energie-efficiëntie ($\eta_{H;WB}$ of SPF_{WB}) waarmee de warmte ($Q_{H;WB}$) voor de actieve laag kan worden opgewekt en getransporteerd.
- De benodigde energie ($Q_{E;WB;dist}$) voor het circuleren van de warmte door de actieve laag. Deze wordt weer bepaald door een groot aantal andere zaken zoals leidinglengte, leidingdiameter, leidingweerstand en stroomsnelheid.
- De (primaire) energie-efficiëntie van de (bestaande) andere warmtebron ($\eta_{H;aux}$) waarmee warm-bouwen concurreert.

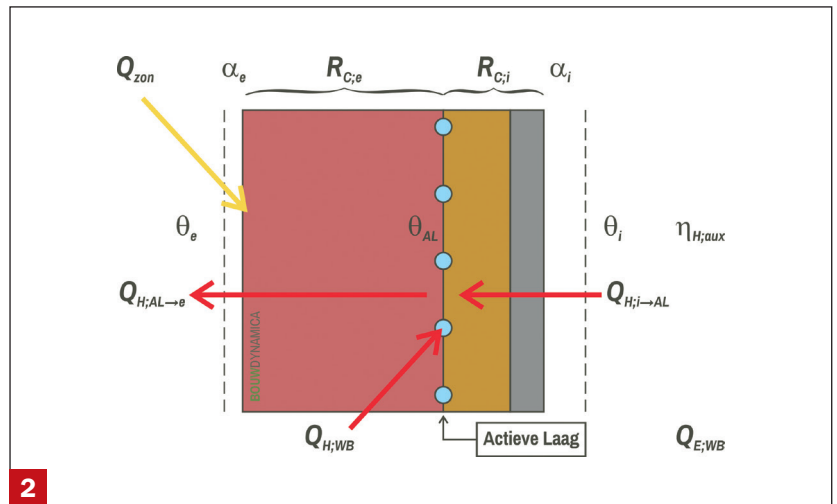
Figuur 2 toont schematisch de parameters die invloed hebben op de werking en de prestaties van warm-bouwen.

Theoretisch is warm-bouwen mogelijk voor de gehele gebouwschil. De gevel ligt het meest voor de hand. Bij andere delen van de gebouwschil is warm-bouwen ook mogelijk maar minder praktisch. Warm-bouwen kan aan de binnenzijde of buitenzijde van de gevel worden aangebracht. Voor een goede prestatie van warm-bouwen is een warmteweerstand aan dezelfde zijde als de actieve laag van belang. Dit volgt uit beschouwing van de volgende extreme situaties:

- Bij toepassing geheel aan de binnenzijde, dus *zonder* een (extra) warmteweerstand eveneens geheel aan de binnenzijde, werkt warm-bouwen (eerder) als koeling vanwege de toegepaste temperatuur in de actieve laag (15-18°C) die onder de ruimtetemperatuur (19-21°C) ligt. De (al aanwezige) ruimteverwarming zal dit compenseren met extra energieverbruik tot gevolg.
- Bij toepassing geheel aan de buitenzijde, dus *zonder* een (extra) warmteweerstand eveneens geheel aan de buitenzijde, wordt vooral de buitenlucht verwarmd. Bij een groot temperatuurverschil tussen de actieve laag en de buitenlucht is bovendien relatief veel verwarmings- en pompvermogen nodig om de actieve laag op de gewenste temperatuur te houden. Het vermogen kan alleen worden vergroot door verhoging van de aanvoertemperatuur en/of het debiet. Beide opties leiden tot meer (primaire) energieverbruik.

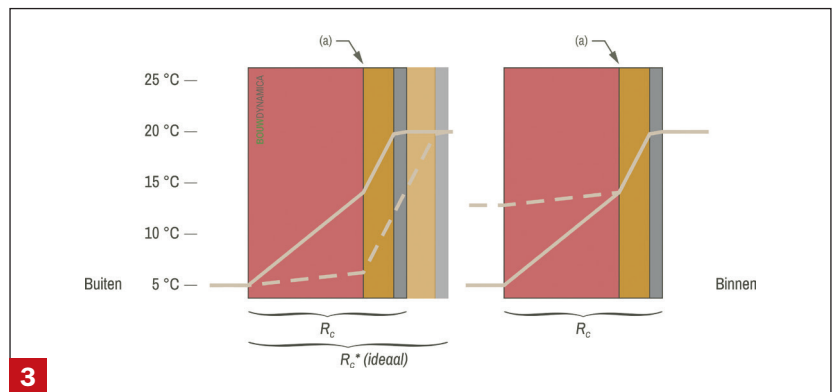
SCHIJBARE WARMTEWEERSTAND OF SCHIJBARE BUITENTEMPERAATUUR

Door de toegevoerde warmte stijgt de temperatuur van de constructie ten opzichte van de situatie zonder warm-bouwen. Deze verstoring leidt tot een vlakkere temperatuurgradiënt aan de warme zijde van de actieve laag. De ruimteverwarming heeft geen weet van de aanwezigheid van warm-bouwen – evengoed is er gewoon meer thermische isolatie aanwezig. Voor de ruimteverwarming *lijkt* het alsof de vlakkere temperatuurgradiënt helemaal doorgaat tot aan de actieve laag, met daar *dezelfde* temperatuur als *zonder* warm-bouwen.



2

Schematische weergave van een constructie met warm-bouwen en de bijbehorende energiestromen en relevante parameters

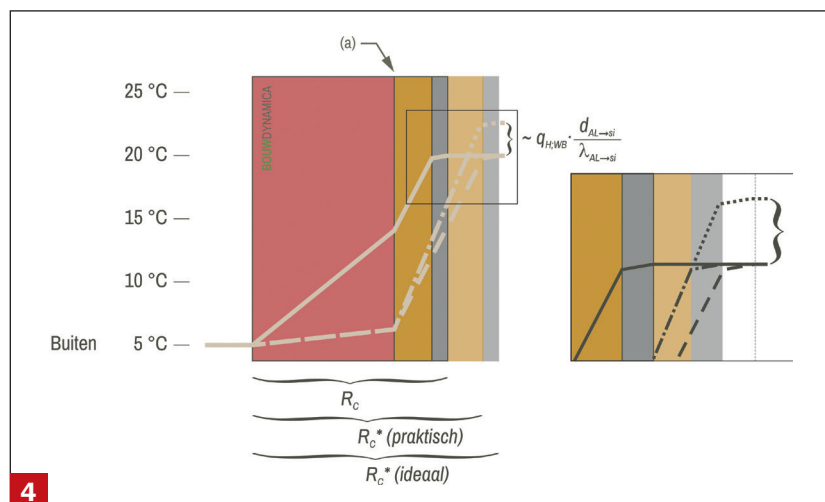


3

De prestatie van warm-bouwen in de vorm van een schijnbare warmteweerstand (R_c^*) (links) of een schijnbare buitentemperatuur (rechts). De onderbroken lijn is het schijnbare temperatuurverloop. De actieve laag ligt bij punt (a)

Fysisch gezien mag het temperatuurverloop in een constructie geen sprong vertonen. Om toch de vlakkere temperatuurgradiënt zonder sprong aan te laten sluiten bij de (ongewijzigde) condities aan de binnen- en buitenzijde van de constructie, moet de dikte van de thermische isolatie aan de warme zijde schijnbaar worden vergroot. Zo ontstaat de schijnbare warmteweerstand (R_c^*).

Het is ook mogelijk om naar warm-bouwen te kijken aan de hand van de fysiek aanwezige warmteweerstand (R_c). In dat geval vertrekt vanuit de (warmere) actieve laag dezelfde temperatuurgradiënt naar buiten als *zonder* warm-bouwen om zo een temperatuursprong te vermijden. De temperatuur aan het buitenoppervlak van de constructie komt dan hoger uit dan zonder warm-bouwen. Met warm-bouwen is het buiten dus schijnbaar altijd lente. Alhoewel een elegante benadering, is deze minder praktisch dan een schijnbare warmteweerstand. Figuur 3 illustreert beide benaderingen.



4 Karakteristiek temperatuurverloop (doorgetrokken lijn) en schijnbaar temperatuurverloop bij de schijnbare thermische isolatie voor een praktische (onderbroken streep-stippellijn) en een ideale (onderbroken streeplijn) situatie in de winter. De actieve laag ligt bij punt (a)

Voor de werking van warm-bouwen zijn de bron en het (primaire) energetische rendement van de warmte niet relevant, wel voor de energetische prestatie. Ideaal zou zijn wanneer geen energie nodig is voor de temperatuurverhoging. Dat is echter onmogelijk. De benodigde (primaire) energie kan worden verdisconteerd in een kleinere afvlakking van de temperatuurgradiënt aan de warme zijde van de actieve laag ten opzichte van de ideale situatie. Het verschil tussen de praktijk en de ideale situatie vertaalt zich naar een schijnbaar hogere oppervlaktetemperatuur aan de warme zijde van de constructie. De hogere temperatuur is evenredig met de benodigde (primaire) energiestroom voor warm-bouwen ($q_{H,WB}$) en met de warmteweerstand aan de warme zijde van de actieve laag ($d_{AL \rightarrow SI} / \lambda_{AL \rightarrow SI}$)

UITGANGSPUNTEN FYSISCHE EN ENERGETISCHE PRESTATIES

De parameters van warm-bouwen en hun tijdafhankelijkheid maken het lastig om de prestaties van warm-bouwen analytisch te bepalen. De tijdafhankelijkheid ontstaat doordat de temperatuur van de actieve laag enigszins fluctueert als gevolg van wisselende omstandigheden waardoor de temperatuurgradiënt aan de warme zijde fluctueert en daarmee ook de schijnbare warmteweerstand. De tijdafhankelijkheid kan bovendien ook actief zijn, bijvoorbeeld in de vorm van een regeling voor de temperatuur en/of het debiet van warm-bouwen. In plaats van analytisch, zijn de werking en prestaties daarom bepaald met behulp van een dynamische gebouw-

simulatie aan de hand van de warmteoverdracht van de ruimte naar het binnenoppervlak. In deze warmteoverdracht komen de effecten van alle betrokken parameters samen. De hiervoor gebruikte rekensoftware is Energy-Plus versie 8.5.

Concreet zijn de prestaties van warm-bouwen bepaald voor een vrijstaande woning (drie bouwlagen, gebruiksoppervlakte 294 m²) met spouwloze gevels. Dit is een woningtype met relatief veel dichte geveldelen en heeft daardoor relatief veel baat bij thermische isolatie of alternatieven daarvoor. In totaal is 225 m² warm-bouwen toegepast in de gevels. Vloer, dak en daglichtopeningen zijn voorzien van conventionele thermische isolatie. Tabel 1 toont de kenmerken van de gesloten geveldelen met warm-bouwen voor de variant A, die als basis diende voor het onderzoek naar geschikte waarden voor de verschillende parameters.

Bodemwarmte en zonnewarmte zijn onderzocht als hernieuwbare warmtebron, al dan niet in combinatie met een elektrische warmtepomp. Voor bodemwarmte is uiteindelijk vooral gekeken naar ondiepe geothermie met een gesloten bodemlus van 450 meter diep waarmee temperaturen van 15-16°C omhoog worden gehaald. Voor de geothermische gradiënt in dit bodemgebied is gerekend met 0,0225 K/m [3] (Uit ander onderzoek komt 0,0209 tot 0,027 K/m naar voren voor de geothermische gradiënt [2].) Voor zonnewarmte is naar zonnecollectoren gekeken.

Pompenergie speelt een belangrijke rol in de prestaties van warm-bouwen. De leidingsystemen voor de winning en afgifte van warmte zijn daarom in detail meegenomen in het rekenmodel (zie tabel 2). Een warmtepomp springt zo nodig bij indien de bodem of de zon een te lage temperatuur levert.

Door de relatief lage temperatuur voor warm-bouwen (15-20°C) is de *seasonal performance factor* (SPF) voor de warmtepomp hoog: 10-11. Dit is circa twee maal zo groot als bij vloerverwarming (30-35°C). Als het energieverbruik voor de bron- en/of circulatiepomp(en) ook wordt meegenomen, dan ligt de SPF tussen 7 en 16. Bij hogere SPF's is de inzet van de warmtepomp minimaal of afwezig.

In de studie is gewerkt met een weersafhankelijke regeling waarbij de aanvoertemperatuur naar de actieve laag afhangt van de buitentemperatuur: van 18°C in de winter tot 16°C in de tussenseizoenen. Wanneer het *setpoint* voor de actieve laag dat toelaat, dan ligt het debiet lager om pompenergie te besparen.

Tabel 1: Constructieopbouw en kenmerken gevel met warm-bouwen voor de variant A. De actieve laag (AL) van warm-bouwen is hier opgenomen in een pleisterlaag

Materiaal	d mm	R _c m ² K/W	λ _{reken} W/mK	ρ kg/m ³	c J/kgK
Metselwerk	230	0,27	0,840	1700	800
Pleisterlaag (AL)	10	0,01	0,800	1600	840
Hout/cellulose-isolatie	40	0,93	0,043	45	1380
Gipsplaat	10	0,01	0,810	1680	840
Totaal	290	1,23			

HEFBOOM

Bij een bepaalde uitvoering en regeling van warm-bouwen ontstaat dezelfde warmteoverdracht aan het binnenoppervlak, dus dezelfde warmtebehoefte, als bij een bepaalde warmteweerstand met alleen thermische isolatie. Voor de ruimteverwarming lijkt het alsof de constructie schijnbaar deze warmteweerstand heeft. De verhouding tussen deze schijnbare en de fysiek aanwezige warmteweerstand van een bepaalde bouwkundige constructie is de invloed of hefboom van warm-bouwen (F_{WB}) (1). Gebruik van een

hefboom op de fysiek aanwezige warmteweerstand maakt warm-bouwen bruikbaar in statische rekenmodellen met vaste waarden voor de warmteweerstand van constructies.

$$F_{WB} = \frac{R_c^*}{R_c} = \frac{\alpha_i}{\alpha_i^*} \quad (1)$$

Met:

- F_{WB} Hefboom warm-bouwen
- R_c Warmteweerstand van de constructie zonder warm-bouwen in $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
- R_c^* Schijnbare warmteweerstand van de constructie met warm-bouwen in $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
- α_i Warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnenzijde van een constructie zonder warm-bouwen in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- α_i^* Warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnenzijde van een constructie met warm-bouwen in $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

In veel rekenmodellen is de warmteoverdracht aan het oppervlak veelal een vaste waarde. In werkelijkheid varieert de warmteoverdracht naar de gebouwschil in de tijd onder de invloed van de zon, de wind, de temperatuur, de warmteweerstand van de gevel en de kenmerken van de ruimte. Voor de nauwkeurige bepaling van de hefboom van warm-bouwen is een nauwkeurige bepaling van de warmteoverdracht vereist waarin zowel convectie, kortgolvlige straling als langgolvlige straling zijn meegenomen.

Een hefboom groter dan 1 betekent dat warm-bouwen fysisch of energetisch beter presteert dan dezelfde situatie zonder warm-bouwen. De volgende vier specifieke hefbomen voor de fysische en energetische prestaties zijn gedefinieerd.

- $F_{WB,fys}$ hefboom voor de warmteweerstand van de gevel in vergelijking met zonder warm-bouwen. Dit is de hefboom die je zelf voelt (comfort).
- $F_{WB,fys,stat}$; hefboom $F_{WB,fys}$ gecorrigeerd voor (gebruikelijke) vaste waarden van de warmte-overgangsweerstanden van de constructie.
- $F_{WB,syst,E}$; hefboom op systeemniveau waarin tevens de benodigde netto energie voor het op temperatuur brengen van de actieve laag is verdisconteerd. Dit is de hefboom die de energiemeter voelt.
- $F_{WB,syst,P}$; hefboom op systeemniveau waarin tevens de benodigde netto *primaire* energie voor het op temperatuur brengen van de actieve laag is verdisconteerd. [1] Dit is de hefboom die de aarde voelt en jij financieel.

De rekenwaarde voor de hefbomen voor warm-bouwen zijn bepaald op gebouwniveau voor een jaar. De basis hiervoor zijn de waarden per geveldeel per uur inclusief de invloed van variaties in zonbelasting en binnentemperatuur.

De hefboom $F_{WB,fys}$ is de verhouding in warmteoverdracht op fysisch niveau. De aard van de aan de actieve laag toegevoerde warmte is hierbij *niet* van belang. Voor de bepaling van energiebesparing is de aard van de warmte *wel* van belang. De hefboom is te splitsen in de warmtestroom *zonder* warmbouwen en de relatieve vermindering

Tabel 2: Kenmerken, eigenschappen en afmetingen van leidingsystemen. Het boorgat bevat een U-vormig bodemlus

Kenmerk	Vloer-verwarming	Warm-bouwen	Bodemlus	Diepe bodemlus
Boorgatdiameter [mm]			135	170
Buislengte (enkele richting) [m]	90	60	2x76	1x450
Buisafstand h.o.h. [mm]	100	100	70	110
Buisbuitendiameter [mm]	16,4	11,6	32	50
Buiswanddikte [mm]	2,7	1,3	3,0	4,6
Buiswarmtegeleiding [W/mK]	0,43	0,43	0,43	0,43
Wandruwheid [mm]	0,005	0,005	0,010	0,010
Opslag drukverlies appendage	50%	50%	25%	25%
Typische stroomsnelheid [m/s]	0,2-0,3	0,15-0,2	0,3-0,4	0,2-0,3

(of vermeerdering) hiervan *met* warm-bouwen (2).

De hefboom *zonder* warm-bouwen is per definitie gelijk aan 1. De rest is de bijdrage van warm-bouwen: $\Delta F_{WB,fys}$.

$$F_{WB,fys^*} = 1 + \Delta F_{WB,fys} \quad (2)$$

De bijdrage van warm-bouwen aan de lagere warmtebehoefte voor de ruimteverwarming $\Delta Q_{H,RV}$ vraagt een investering in energie voor warm-bouwen $Q_{H,WB}$ die met een bepaalde efficiëntie voor opwekking en distributie van warmte SPF_{Tot} wordt verkregen. Hierdoor ontstaat een hefboom op systeemniveau (3).

$$F_{WB,syst,E} = 1 + \Delta F_{WB,fys} \cdot 1 - \left(\frac{Q_{E,WB}}{\Delta Q_{H,RV}} \right) \quad (3)$$

Waarbij:

$$Q_{E,WB} = \frac{Q_{H,WB}}{SPF_{Tot}} \quad (3a)$$

$$\Delta Q_{H,RV} = Q_{H,RV} \cdot \frac{G_{d,\bar{\theta}_i}^*}{G_{d,\bar{\theta}_i}} - Q_{H,RV}^* \quad (3b)$$

Waarbij:

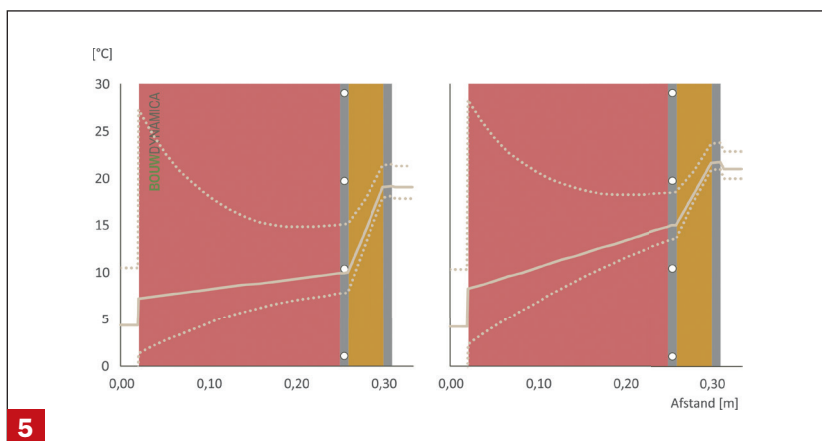
$$G_{d,\bar{\theta}_i}^* = \frac{\sum_{j=1}^{8760} G_{h,\bar{\theta}_{e,j}}}{24} = G_{h,\bar{\theta}_{e,j}} = \begin{cases} \bar{\theta}_i - \theta_{e,j} & | \theta_{e,j} < \bar{\theta}_i \\ 0 & | \theta_{e,j} \leq \bar{\theta}_i \end{cases} \quad (3c)$$

De graaddagen in (3b) volgens (3c) corrigeren het subtiele verschil in gemiddelde binnentemperatuur in het stookseizoen tussen de dynamische berekening zonder en met warm-bouwen.

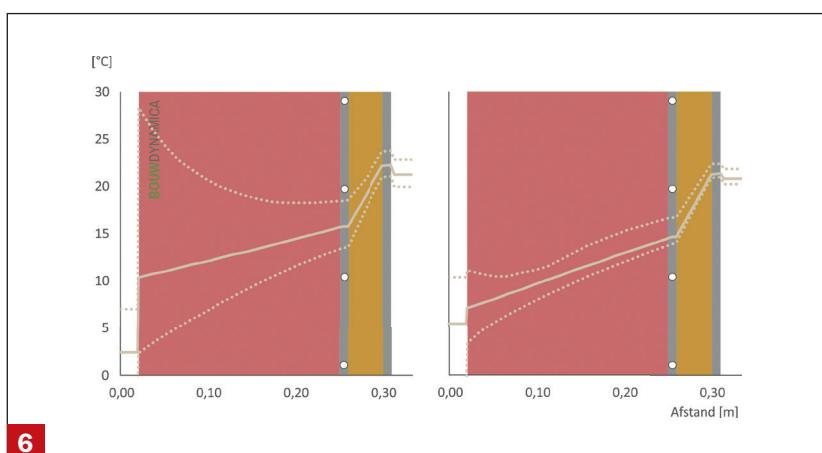
Vergelijking (3) houdt nog geen rekening met de primaire energie die aan de benodigde warmte voor warm-bouwen en de benodigde warmte voor de ruimteverwarming ten grondslag ligt. Dat kan als volgt (4):

$$F_{WB,syst,P} = 1 + \Delta F_{WB,fys} \cdot 1 - \left(\frac{Q_{E,WB}}{\Delta Q_{H,RV}} \cdot \frac{PEF_{WB}}{PEF_{RV}} \right) \quad (4)$$

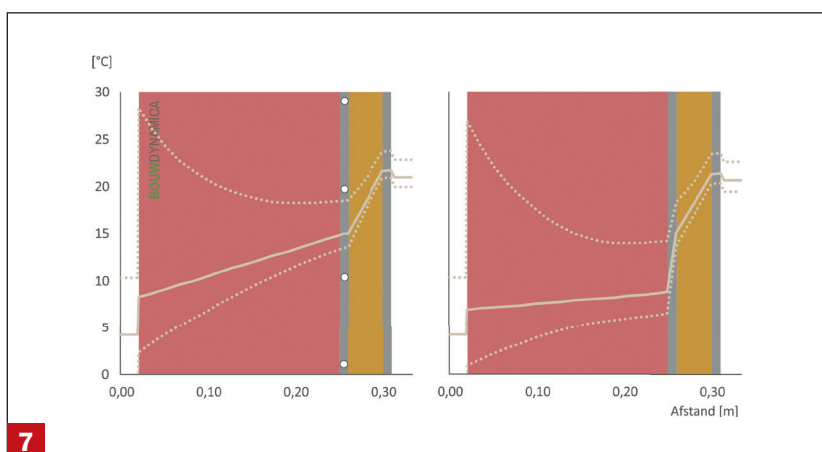




5 Berekend temperatuurbereik in een uitwendige scheidingsconstructie zonder (links) en met (rechts) warm-bouwen geactiveerd tijdens de week van 15-21 december van het referentieklimaatjaar A2-20% van NEN 5060:2008. De doorgetrokken lijn is het weekgemiddelde temperatuurverloop



6 Berekend temperatuurbereik in een uitwendige scheidingsconstructie met warm-bouwen geactiveerd tijdens zonnig (en kouder) 17-18 december (links) en niet-zonnig 19-21 december (rechts) van het referentieklimaatjaar A2-20% van NEN 5060:2008. De doorgetrokken lijn is het gemiddelde temperatuurverloop



7 Berekend temperatuurbereik in een uitwendige scheidingsconstructie met warm-bouwen geactiveerd (links) en met de equivalente warmteweerstand geconcentreerd in de actieve laag (rechts) tijdens de week 15-21 december van het referentieklimaatjaar A2-20% van NEN 5060:2008. De doorgetrokken lijn is het weekgemiddelde temperatuurverloop.

FYSISCHE WERKING EN ENERGETISCHE PRESTATIES

De fysische werking van warm-bouwen kan inzichtelijk worden gemaakt aan de hand van het temperatuurverloop in de constructie. Figuur 5 tot en met 7 tonen het temperatuurverloop in steeds twee verschillende maar gerelateerde situaties.

De invloed van zoninstraling op de temperatuur in de actieve laag zelf is gering bij voldoende thermische massa in de gevel (zie figuur 6 waar de zonnige en niet-zonnige dagen apart in beeld zijn gebracht).

Het effect van warm-bouwen kan rekenkundig worden geconcentreerd in de actieve laag zelf. Bij een gegeven dikte en een homogeen materiaal is dat te vertalen in een schijnbare warmtegeleiding van de actieve laag (λ_{AL}). In het geval van een pleisterlaag van 10 mm, waarin de watervoerende leidingen voor warm-bouwen zijn opgenomen, ligt de schijnbare warmtegeleiding van de actieve laag dan in de orde grootte van 0,007-0,009 W/mK voor de variant A. Dat is vergelijkbaar met vacuümisolatie (figuur 7).

Wanneer de actieve laag een denkbeeldig vlak is in de constructie, dan is de schijnbare warmtegeleiding zelfs nihil en ontstaat een denkbeeldige temperatuursprong in dat denkbeeldige vlak. Aan de koude zijde ervan gedraagt de constructie zich dan hetzelfde als *zonder* warm-bouwen en aan de warme zijde hetzelfde als *met* warm-bouwen.

De gevoeligheid van de fysische en energetische prestaties voor de belangrijkste parameters zijn onderzocht met varianten. Tabel 3 en 4 beschrijven de kenmerken en resultaten van variant A en van de gevonden varianten waarbij *alle* [cursief] hefbomen groter zijn dan 1.

De variant A zoals beschreven bij de uitgangspunten heeft fysisch een schijnbaar hogere warmteweerstand dan zonder warm-bouwen ($F_{WB,fys} > 1$). Energetisch is het echter lood om oud-ijzer ($F_{WB,sys,E} \approx 1$) en wat betreft milieu (primaire energie) en energielasten ben je daarmee zelfs slechter uit ($F_{WB,sys,P} < 1$) (tabel 4). Voor de variant A is teveel duurdere energie nodig met een slechtere primaire energiefactor (elektriciteit) dan dat er energie wordt bespaard door de (al aanwezige) andere warmtebron.

Om bij de variant A wel primaire energie te besparen, is het al voldoende om aan de koude zijde van de actieve laag enige extra warmteweerstand toe te voegen (Variant B: 15 mm steenwol, variant C: 15 mm steenwol + anderhalf maal dikkere gevel). Door de extra isolatie daalt de inzet van de warmtepomp en de circulatiepomp(en) en dus daalt het elektriciteitsverbruik. Meer thermische massa verbetert de hefbomen ook door minder uitschieters in het debiet om de gewenste temperatuur in de actieve laag te behouden. Uitschieters vragen onevenredig meer pompenergie.

In het kader van een gevoeligheidsanalyse is onder andere de invloed van 15 mm meer of minder isolatie aan de warme zijde onderzocht bij variant B. De uitkomsten zijn niet zijn opgenomen in de tabel, maar als volgt verwoord. De verhouding in warmteweerstand aan weerszijde van

Tabel 3: Kenmerken varianten warm-bouwen

	A	B	C	D	E	F	G
Constructie	Steens muur	Steens muur	1½-steens muur	Zie B	Steens muur	Zie B	Steens muur
	--	15 mm steenwol	15 mm steenwol		40 mm hout/-cellulose		15 mm steenwol
	Actieve Laag	Actieve Laag	Actieve Laag		Actieve Laag		Actieve Laag
	40 mm hout/-cellulose	40 mm hout/-cellulose	40 mm hout/-cellulose		15 mm steenwol		80 mm hout/-cellulose
	10 mm stuc	10 mm stuc	10 mm stuc		10 mm stuc		10 mm stuc
$T_{a,AL}$	18-16°C	18-16°C	18-16°C	19-17°C	21-19°C	18-16°C	18-16°C
Zonne-collector	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee
Elektrische warmtepomp	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee
Warmtebron	1x 450 m 0,5 L/s	1x 450 m 0,5 L/s	1x 450 m 0,5 L/s	1x 450 m 0,5 L/s	1x 450 m 0,5 L/s	1x 450 m 0,5 L/s	1x 450 m 0,5 L/s

de actieve laag (R_{ci}/R_{ce}) voor 25 mm, 40 mm en 55 mm isolatie is respectievelijk 0,86, 1,37 en 1,89. De hefboomen $F_{WB,fys}$ en $F_{WB,sys,E}$ nemen daarbij enigszins toe. De hefboom $F_{WB,sys,P}$ neemt echter licht af naar respectievelijk 1,10, 1,09 en 1,05. De afname voor de hefboom $F_{WB,sys,P}$ bij 40 mm ten opzichte van 25 mm is zo klein dat 40 mm toch de betere keuze is omdat de absolute (schijnbare) warmteweerstand groter is.

Verhoging van de aanvoertemperatuur leidt tot een vlakke temperatuurgradiënt aan de warme zijde van de actieve laag maar ook tot meer warmteverlies aan de koude zijde. De aanvoertemperatuur in relatie tot de omvang en de positie van de thermische isolatie is zeer kritisch, zoals blijkt uit het volgende.

Verhoging van de aanvoertemperatuurregeling naar 21-19°C bij de constructieopbouw van variant B leidt tot het instorten van de hefboom $F_{WB,sys,P}$ naar 0,66. Dit kan evenwel eenvoudig worden omgezet in een hefboom $F_{WB,sys,P}$ van +1,12 door de isolatielagen aan weerszijde van de actieve laag te verwisselen (variant E). Tegelijk verbetert sterk het comfort ($F_{WB,fys} \approx 4,0$). Hieruit blijkt dat warm-bouwen neigt naar wandverwarming naar mate de aanvoertemperatuur stijgt en de (relatieve) warmteweerstand aan de warme zijde van de actieve laag afneemt.

Uit variatie in het debiet van warm-bouwen tussen 0,59 en 0,94 L/s voor het onderzochte object blijkt dat het optimale debiet rond de 0,70 L/s ligt. Daarbij is uitgegaan van een aanvoertemperatuurregeling van 16-18°C.

Een bodembron van circa 450 meter diep is (nog) ongebruikelijk. Wanneer een standaard bodembron van circa 75 meter diep wordt toegepast, dan is de temperatuur van het opgepompte water slechts 11°C in het stookseizoen. De warmtepomp moet harder werken voor het gewenste temperatuurniveau voor de actieve laag. Meer inzet van de warmtepomp is ongunstig voor de hefboom $F_{WB,sys,P}$ die dan afneemt van 1,09 (variant B) naar 0,58.

Uit het oogpunt van energieverbruik en investeringskosten is het wenselijk als geen warmtepomp nodig is.

De (gemiddelde) temperatuur van de actieve laag is dan wel afhankelijk van de temperatuur van de warmtebron zelf. De variant met ondiepe geothermie tot 500 meter zonder verdere temperatuurverhoging leidt tot de hoogste hefboom $F_{WB,sys,P}$ (1,30 en 1,31 voor varianten F en G). Interessant hierbij is dat bij een verdubbeling van de warmteweerstand aan de warme zijde van de actieve laag de hefboom $F_{WB,sys,P}$ vrijwel gelijk blijft. De besparing van primaire energie voor de ruimteverwarming gaat blijkbaar evenredig op met de benodigde extra primaire energie voor de circulatiepomp(en).

Bodemregeneratie in de zomer met een zonnecollector blijkt weinig zinvol. De aan de bodem geleverde temperatuur lekt op korte termijn vrij snel weg naar de omgeving maar vraagt wel extra pompenergie die doorwerkt in de hefboom. Het effect op lange termijn is niet onderzocht. Buiten het stookseizoen, wanneer warm-bouwen niet is geactiveerd, werkt alleen de fysiek aanwezige (kleinere) warmteweerstand. Daardoor is in de zomer temperatuuroverschrijding bij warm-bouwen minder waarschijnlijk dan bij gelijkwaardige conventionele thermische isolatie die het gehele jaar door werkt.

CONCLUSIES

Bij warm-bouwen ligt de temperatuur in de actieve laag van een uitwendige scheidingsconstructie nog onder de ruimtetemperatuur. De toevoer van warmte aan de

Tabel 4: Hefbomen warm-bouwen, schijnbare warmteweerstand (R_c^*), de temperatuur van de actieve laag tijdens het stookseizoen (T_{AL}) en de gemiddelde temperatuurverhoging ten opzichte van dezelfde situatie zonder warm-bouwen geactiveerd (ΔT_{AL})

Variant	$F_{WB,fys}$	$F_{WB,fys,stat}$	$F_{WB,sys,E}$	$F_{WB,sys,P}$	R_c^* m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
A	1,98	2,00	1,03	-0,13	2,44	15,1	+4,4
B	1,52	1,53	1,34	1,09	2,50	15,1	+2,4
C	1,56	1,58	1,38	1,12	2,79	15,6	+2,4
D	1,52	1,54	1,34	1,08	2,51	15,1	+2,4
E	3,82	3,91	2,68	1,12	6,29	19,3	+3,2
F	1,69	1,71	1,52	1,30	2,78	15,6	+2,9
G	1,97	2,00	1,69	1,31	4,94	15,3	+4,1

constructie levert fysisch gezien altijd een schijnbare warmteweerstand op die groter is dan de fysiek aanwezige warmteweerstand. Een schijnbare warmteweerstand kan worden uitgedrukt in een hefboom op de fysiek aanwezige warmteweerstand van de constructie. Of er netto minder (primaire) energie voor ruimteverwarming nodig is in vergelijking met dezelfde situatie zonder warm-bouwen geactiveerd, wordt bepaald door de aard van de aan de actieve laag toegevoerde warmte, door de bereikte temperatuur in en de positie van de actieve laag in de constructie en door de benodigde pompenergie. De onderlinge afstemming van de betrokken parameters is kritisch. De netto (primaire) energiebesparing kan worden verdisconteerd in de hefboom.

Er zijn meerdere constructies gevonden die leiden tot een netto besparing van primaire energie voor ruimteverwarming. De energetisch best presterende constructies maken gebruik van ondiepe geothermie (op circa 450 meter diep) of restwarmte met dezelfde energiekwaliteit. Hierbij is geen verdere temperatuurverhoging voor warm-bouwen nodig vanuit een andere bron. De besparing van primaire energie is hierbij circa 30%.

De achterliggende studie [1] is uitgevoerd in opdracht van RVO op verzoek van de Topsector Energie, TKI Urban Energy en was mede mogelijk dankzij een bijdrage uit het O&O-fonds voor de bouwnijverheid. Dank gaat ook uit naar de stichting WarmBouwen voor het kritisch volgen van de studie. ■

BRONNEN

- ▶ [1] Bree, A. G. van de, Warm-bouwen – Energetische prestaties op basis van dynamische simulaties, Bouwdynamica, 2018 (https://bouwdynamica.nl/wp-content/uploads/2019/03/KOVG160160.R01-2.Energetische_prestaties_warm-bouwen_mbv_dynamische_simulatie_Met_bijlagen.pdf)
- ▶ [2] Drijver, B. et al., Meer met bodemenergie – Literatuuronderzoek (rapport 2) / Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur (rapport 8), IF Technology / WUR / Deltares / Bioclear, 2012
- ▶ [3] Limberger, J., *Thermo-mechanical characterization of the lithosphere: Implications for geothermal resources*, Universiteit Utrecht, 2018



ENERGY BUILDINGS AND COMMUNITIES IN BRUSSEL

Onder de paraplu van het Internationaal Energie Agentschap (International Energy Agency, IEA) werken 26 landen samen in het Technical Collaboration Programme (TCP) Energy in Buildings and Communities (EBC). EBC richt zich op het ontwikkelen van kennis over energie, binnenmilieu en duurzaamheid in de gebouwde omgeving. Zowel België als Nederland zijn lid van EBC.

Op 12 en 13 juni organiseerde België de halfjaarlijkse vergadering van het uitvoerend comité. Deze vergadering werd voorafgegaan door een “publieke” Technical Day op 11 juni in Brussel, waarbij samengewerkt werd met de NVBV.

Op de dag is een groot aantal voordrachten gehouden, variërend van technisch diepgaande onderwerpen die in EBC annexen worden behandeld tot aan uitleg over het Belgisch en Nederlands Klimaatbeleid.

In het volgende nummer van het blad zal uitgebreid op een deel van deze presentaties worden ingegaan.

De dag werd afgesloten met “interactive voting”. Als preview op het volgend blad alvast enkele uitkomsten van deze “voting”:

- Het aantal deelnemers uit België en Nederland was ongeveer gelijk.
- Bijna 70% van de mensen vond de informatie nuttig tot zeer nuttig. Het resterende

deel dacht dat de informatie wellicht nuttig zou kunnen zijn.

- 90% van de mensen wil graag vaker geïnfomeerd worden over IEA EBC activiteiten.
- 75% van de mensen wist niet dat de Europese vlag na een eventuele Brexit gewoon 12 sterren houdt. ■



Locatie van de Technical Day: het Herman Teirlinck gebouw in Brussel. Bron: extensa.eu