

BOUWDYNAMICA



Warm-bouwen

Energetische prestatie op basis van dynamische simulaties

Opdrachtgevers

RVO, SBRCURNet

Contactpersoon

Dhr. D. van Rijn (RVO), dhr. M. Kramer (SBRCURNet)

Kenmerk

KOVG160160.R01-2

Datum

30 juli 2018

Auteur

ir. A.G. (Antonin) van de Bree

De opdracht door RVO is op verzoek van de Topsector Energie, TKI Urban Energy.

Dit onderzoek is mede mogelijk gemaakt door een bijdrage uit het O&O-fonds voor de bouwnijverheid.

De kleuren in dit rapport zijn afgestemd op lezen vanaf het beeldscherm.

De *layout* van dit rapport is afgestemd op dubbelzijdig printen.

Dit dient eventueel nog wel zelf zo te worden ingesteld op de printer.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
2	Warm-bouwen.....	2
2.1	Wat is warm-bouwen?.....	2
2.1.1	Hefboom warm-bouwen.....	2
2.1.2	Parameters van warm-bouwen	3
2.1.2.1	Binnentemperatuur.....	4
2.1.2.2	Werktemperatuur	4
2.1.2.3	Verhouding in warmteweerstand aan weerszijde	4
2.1.2.4	Temperatuurval over de actieve laag.....	5
2.1.2.5	Energie-efficiëntie van de ruimteverwarming	5
2.1.3	Verschil tussen warm-bouwen en wandverwarming	5
2.1.4	Uitvoering	6
2.1.5	Overig.....	6
3	Modelbeschrijving.....	8
3.1	Omgeving	8
3.1.1	Buitenklimaat.....	8
3.1.2	Ondergrond.....	8
3.2	Bouwkundig	9
3.2.1	Oriëntatie en gebouwworm.....	9
3.2.2	Plattegronden	9
3.2.3	Dichte geveldelen	10
3.2.4	Beglazing	11
3.3	Installatietechniek.....	12
3.3.1	Ruimteverwarming	12
3.3.1.1	Warmte-opwekking.....	12
3.3.1.2	Warmteafgifte	12
3.3.1.3	Leidingsystemen	13
3.3.2	Warmtebronnen voor warm-bouwen	13
3.3.2.1	Hernieuwbare warmtebronnen	14
3.3.2.2	Warmtepomp	15
3.3.2.3	Ondiepe geothermie	16
3.3.2.4	Temperatuur en regeling.....	16
3.3.2.5	Zonneboiler	18
3.3.2.6	Opslagvaten.....	19
3.4	Rekenmodel	19

4	Bevindingen	20
4.1	Warmteoverdracht uitwendige scheidingsconstructie.....	22
4.1.1	Buitenzijde	23
4.1.2	Binnenzijde.....	23
4.2	Equivalente warmteweerstand.....	24
4.3	Varianten.....	25
4.3.1	Constructie-varianten	26
4.3.1.1	Variatie in constructietype en thermisch isolatiemateriaal	26
4.3.1.2	Variatie in isolatiedikte.....	30
4.3.2	Aanvoertemperatuur-varianten	32
4.3.3	Debiet-varianten	36
4.3.4	Installatietechniek-varianten	39
4.4	Invloed binnentemperatuur.....	43
5	Conclusies & aanbevelingen	46
5.1	Conclusies.....	46
5.2	Aanbevelingen.....	48

Bijlagen

Bijlage I	Temperatuurverloop in de gevel
Bijlage II	Fysische grondslag van warm-bouwen
Bijlage III	Resultatenoverzicht
Bijlage IV	Installatieschema

Samenvatting

Warm-bouwen heeft hetzelfde effect als thermische isolatie: het transmissieverlies door de gebouwschil verminderd. Bij thermische isolatie gebeurt dat door de vergroting van de warmteweerstand. Bij warm-bouwen vermindert het transmissieverlies door de temperatuur van de gebouwschil te verhogen.

Het effect van warm-bouwen kan worden vertaald naar een hefboom (F_{WB}) op de fysiek aanwezige warmteweerstand van de gebouwschil, inclusief de extra materiaallagen in de constructie die zijn aangebracht om warm-bouwen te laten werken. Het product van de fysieke warmteweerstand en de hefboom geeft de equivalente warmteweerstand van warm-bouwen voor ruimteverwarming. De hefboom is gedefinieerd als de verhouding in warmteoverdracht naar het binnenoppervlak van de gebouwschil voor de identiek constructie met en zonder warm-bouwen geactiveerd.

Anders dan bij de fysieke warmteweerstand die alleen afhangt van materiaal-eigenschappen en constant is, hangt de equivalente warmteweerstand en daarmee ook de hefboom af van meerdere parameters. De belangrijkste daarvan zijn: de binnentemperatuur, de hernieuwbaarheid en/of de (fossiele) energie-efficiëntie van de benodigde warmte en de verhouding in (fysieke) warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag. Er zijn meerdere hefbomen per constructie te bepalen: op constructieniveau en op systeemniveau. Op systeemniveau kan ook de invloed van de benodigde primaire energie worden meegenomen in de hefboom.

Om praktische redenen zal warm-bouwen beperkt blijven tot de gevel. De actieve laag van warm-bouwen in de gevel wordt opgewarmd tot typisch 15-19 °C. Het gevolg is dat, van binnenuit gezien, een schijnbaar hogere *buiten*-temperatuur ontstaat. Een dergelijke temperatuur ligt boven het dauwpunt van de gebruikelijke luchtcondities in gebouwen (in het stookseizoen). Een dampremmende laag is daardoor in principe niet meer nodig. Het verwarmen van de gebouwschil geschiedt met watervoerende leidingen.

Warm-bouwen leidt tot hefbomen $F_{WB;bruto}$ en $F_{WB;netto}$ groter dan 1 voor alle onderzochte varianten. Tabel 1.1 toont de onderzochte varianten die óók een hefboom $F_{WB;prim}$ groter dan 1 hebben. Daarmee is de energieprestatie van warm-bouwen op primaire energieniveau beter dan een constructie met dezelfde fysieke warmteweerstand R_C als de *equivalente* warmteweerstand van warm-bouwen.

Tabel 1.1 Hefboom warm-bouwen voor onderzochte varianten met ook een $F_{WB,prim}$ groter dan 1.

Variant	$F_{WB,dyn;bruto}$	$F_{WB,dyn;netto}$	$F_{WB,dyn;prim}$	R_c^* m ² K/W
I.2	1,52	1,34	1,09	2,50
I.4	1,56	1,38	1,12	2,79
I.5	1,41	1,28	1,10	1,83
I.6	1,60	1,37	1,05	3,19
II.1	1,52	1,34	1,08	2,51
II.4	3,82	2,68	1,12	6,29
IV.2	1,69	1,52	1,30	2,78

Toelichting:

a. R_c^* is de equivalente of schijnbare warmteweerstand van de constructie bij warm-bouwen.

b. Constructie-opbouw voor warm-bouwen:

- varianten I.2, II.1 en IV.2 zijn steensmuren met aan de binnenzijde (van binnen naar buiten):

10 mm stuc, 40 mm hout/-cellulose, Actieve Laag warm-bouwen en 15 mm steenwol.

- variant II.4 is een steensmuur met aan de binnenzijde (van binnen naar buiten):

10 mm stuc, 15 mm steenwol, Actieve Laag warm-bouwen en 40 mm hout/-cellulose.

- variant I.4 is een 1½-steensmuur met aan de binnenzijde (van binnen naar buiten):

10 mm stuc, 40 mm hout/-cellulose en Actieve Laag warm-bouwen.

c. Zie rapport voor de specificaties van de overige parameters per variant.

De warmtebronnen voor warm-bouwen zijn zonne-energie en bodemwarmte. Bodemwarmte met een geschikte temperatuur wordt bij voorkeur zonder de hulp van een warmtepomp verkregen. Daarvoor zijn bodemlussen vereist tot circa 500 meter diep. Het temperatuurniveau in de bodem op deze diepte ligt rond de 20 °C. Aan het maaiveld resteert daarvan nog 16-17 °C. In dat geval zijn alleen circulatiepompen nodig, een technisch eenvoudig systeem. De voordelen van warm-bouwen ten opzichte van gewone thermische isolatie zijn:

- Minder isolatiedikte aan de binnenzijde bij een gelijke warmteweerstand en een gelijke energieprestatie, mits juist ontworpen.
- Vermindering van bouwfysisch risico in de constructie. Dit is met name bij gebouwen met kwetsbare materialen in de constructie interessant.
- Mogelijkheid van vrije koeling (van de gebouwschil) in de zomer zonder extra apparatuur of installatietechniek.
- Synergie met lage temperatuur warmtenetten door vergroting van de uitkoeling van het warmtenet indien toegepast in serie met de ruimteverwarming.

Daar staat tegenover dat de uitvoeringskosten hoger zijn dan bij gewone thermische isolatie.

1

Inleiding

Het principe van warm-bouwen komt voort uit een intuïtie dat (hernieuwbare) bodemwarmte voor gebouwen de overbrugging kan vormen voor enerzijds het tekort aan zonne-energie voor de warmtevraag in het stookseizoen en anderzijds het overschot aan zonne-energie in de zomer. De bodem dient daarbij als een enorme warmtebuffer voor zonne-energie. Door de zeer lage temperatuur warmte uit de bodem via de gebouwschil te leiden, draagt het tegelijk bij aan het oplossen van koudebruggen in bestaande gebouwen zonder dat dan dampdichting nodig is.

In gematigde streken tot een diepte van 100-150 meter is de bodemtemperatuur eigenlijk nog te laag voor een goede werking van warm-bouwen en is aanvullende warmte nodig (om de temperatuur te verhogen). De voor warm-bouwen geschikte temperatuur is 15-19 °C. Een hogere temperatuur kan worden verkregen met behulp van een warmtepomp. Dit is lager dan voor lage temperatuur verwarmingssystemen zoals vloerverwarming (30-35 °C). Bij warm-bouwen heeft een warmtepomp daardoor de potentie van een hogere energie-efficiëntie. Het alternatief is een diepere bodembron (tot 500 meter). Dieper in de bodem neemt de bodemtemperatuur toe, wat warm-bouwen sterk ten goede komt.

Intuïtie is mooi maar onvoldoende verklarend. Een principe van de werking vormt wel een kwalitatieve verklaring, maar is op zijn beurt weer niet genoeg om te beoordelen wat de potentie is. Toepassing in de praktijk leert het meeste over de prestaties van en aandachtspunten voor een techniek maar is kostbaar en tijdrovend. Zeker wanneer blijkt dat de prestatie van de techniek wordt bepaald door veel variabelen, zoals bij warm-bouwen het geval is. Om die reden is de prestatie van warm-bouwen onderzocht met behulp van dynamische gebouwsimulaties. Dergelijke simulaties komen dicht in de buurt van de fysische werkelijkheid en hebben als voordeel dat het sneller en goedkoper is dan een praktijkexperiment. Maar hoe goed rekenmodellen ook zijn, praktijkexperimenten blijven altijd nodig. Op basis van de resultaten van het rekenmodel kunnen die dan wel gerichter worden uitgevoerd.

Het resultaat van de studie is mede te danken aan de bevoegdheid voor warm-bouwen van Miel Karthaus en Martijn de Gier van KBnG architecten | stedebouw | restauratie van wie de oorspronkelijke intuïtie afkomstig is.

2 Warm-bouwen

Warm-bouwen heeft twee doelstellingen: het vermijden van het risico op inwendige condensatie bij thermische isolatie aan de binnenzijde en beperken van het transmissieverlies. Deze studie heeft als doel om het effect van warm-bouwen te bepalen op het energieverbruik voor ruimteverwarming in een gebouw. Een dynamische simulatie van een concreet object, een vrijstaande woning, is uitgevoerd om de precieze werking van warm-bouwen te onderzoeken. Daarnaast is een fysische beschrijving van warm-bouwen opgezet.

2.1 Wat is warm-bouwen?

Warm-bouwen heeft hetzelfde effect als thermische isolatie: het transmissieverlies door de gebouwschil verminderd. Bij thermische isolatie gebeurt dat door de vergroting van de warmteweerstand. Bij warm-bouwen vermindert het transmissieverlies door de temperatuur van de gebouwschil te verhogen. Het temperatuurverschil tussen de verblijfsruimte(s) en de gebouwschil is daardoor kleiner en dus is ook de warmtestroom van de verblijfsruimte naar de gebouwschil kleiner. Het temperatuurverschil is immers de drijvende kracht achter de warmtestroom. De locatie of materiaallaag in de gebouwschil waar de temperatuur wordt verhoogd, wordt aangeduid als de **actieve laag** van warm-bouwen en speelt een belangrijke rol in zowel de verklaring als de resultaten van warm-bouwen.

Daar staat tegenover dat het opwarmen van de gebouwschil zelf ook energie vraagt. Per saldo kan toch een primaire energiebesparing voor ruimteverwarming worden behaald door:

- warmte voor warm-bouwen met een temperatuur die net beneden de binnentemperatuur ligt (19-21 °C);
- hernieuwbare energie voor de warmteopwekking voor warm-bouwen of desnoods fossiele energie met een zeer hoge energie-efficiëntie;
- een optimale verhouding in fysiek aanwezige warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag van warm-bouwen.

2.1.1 Hefboom warm-bouwen

Het effect van warm-bouwen kan worden vertaald naar een hefboom (F_{WB}) op de fysiek aanwezige warmteweerstand van de gebouwschil. De fysiek aanwezige warmteweerstand is inclusief de extra materiaallagen in de constructie die zijn aangebracht om warm-bouwen te laten werken. Bij een hefboom met de waarde 3 krijgt een *fysiek* aanwezige warmteweerstand van 1,5 m²K/W *schijnbaar* een

warmteweerstand van $3 \times 1,5 = 4,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ zodra warm-bouwen wordt geactiveerd. De hefboom ziet er in formulevorm als volgt uit:

$$F_{WB} = \frac{R_C^*}{R_C}$$

$$R_C = \frac{\Delta T}{q_{\text{Primair}}}$$

$$R_C^* = \frac{\Delta T}{q_{\text{Primair}}^*}$$

Met:

F_{WB}	Hefboom warm-bouwen
q_{Primair}	Warmtestroom door de gebouwschil <i>zonder</i> toepassing van warm-bouwen (uitgedrukt in eenheden primaire energie)
q_{Primair}^*	Som van de (kleinere) warmtestroom door de gebouwschil <i>met</i> toepassing van warm-bouwen en de warmte die nodig is om de actieve laag in de gebouwschil op de gewenste temperatuur te houden inclusief het elektriciteitsverbruik voor pompen, regeling, etc. (uitgedrukt in eenheden primaire energie)
R_C	Fysiek aanwezige warmteweerstand van de gebouwschil
R_C^*	Schijnbaar aanwezige warmteweerstand van de gebouwschil als gevolg van de toepassing van warm-bouwen bij verder dezelfde condities
ΔT	Temperatuurverschil over de gebouwschil

In Bijlage I wordt het principe van warm-bouwen nader toegelicht en geïllustreerd. In Bijlage II is de fysische modellering van warm-bouwen verder uitgewerkt.

2.1.2

Parameters van warm-bouwen

Anders dan bij de fysieke warmteweerstand die alleen afhangt van materiaal-eigenschappen en constant is, hangt de schijnbare warmteweerstand en daarmee de hefboom ook af van:

- de binnentemperatuur;
- de hernieuwbaarheid en/of de (fossiele) energie-efficiëntie van de benodigde warmte;
- de verhouding in warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag;
- de temperatuurval over de actieve laag van de aangevoerde warmte;
- de leidingweerstand van de actieve laag;
- de (primaire) energie-efficiëntie van de (bestaande) ruimteverwarming;

- de thermische massa van de gevel.

De optimale prestatie van warm-bouwen wordt alleen bereikt door de onderlinge afstemming van deze parameters.

2.1.2.1 Binnentemperatuur

Uit de definitie van de hefboom voor warm-bouwen volgt dat de ruimtetemperatuur sterk bepalend is. De warmtestroom van een omsloten ruimte naar de omhullende constructie is lineair met het temperatuurverschil over de constructie. Wanneer de ruimtetemperatuur daalt, dan vakt de temperatuurgradiënt in de constructie af, ook de temperatuurgradiënt tussen het binnenoppervlak van de omhullende constructie en de actieve laag van warm-bouwen in die constructie.

2.1.2.2 Werktemperatuur

Warm-bouwen werkt voor zover de gemiddelde temperatuur van de actieve laag hóger ligt dan zonder warm-bouwen. Alleen dan wordt, van binnenuit gezien, een schijnbare verkleining van het temperatuurverschil met buiten bereikt. Hoe hoger de gemiddelde temperatuur van de actieve laag, hoe groter het deel van het stookseizoen waarin warm-bouwen effect heeft. Daarbij wordt opgemerkt dat:

- hoe hoger de temperatuur in de gevel, hoe groter het warmteverlies van de warm-bouwen warmte (naar buiten);
- hoe hoger de temperatuur in de gevel, hoe minder efficiënt de hiervoor benodigde warmte kan worden opgewekt bij het gebruik van fossiele energie (via een warmtepomp);
- hoe hoger de temperatuur in de gevel, hoe meer stilstandsverlies ontstaat bij het gebruik van een warmtebuffer, indien hiervan sprake is.

Een (gemiddelde) temperatuur van de actieve laag die bóven de gemiddelde ruimtetemperatuur ligt, komt in feite neer op wandverwarming.

2.1.2.3 Verhouding in warmteweerstand aan weerszijde

De actieve laag van warm-bouwen kan aan de binnen- of buitenzijde van de gevel worden aangebracht. Voor een optimale prestatie blijkt een bepaalde verhouding in de warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag van warm-bouwen van belang. Dit kan worden beredeneerd door te kijken naar twee extreme situaties:

- Bij de toepassing aan de binnenzijde en zónder deze (extra) warmteweerstand werkt 'warm-bouwen' (eerder) als koeling vanwege de toegepaste temperaturen

(16-18 °C). De ruimteverwarming zal dit trachten te compenseren met extra energieverbruik tot gevolg.

- Bij de toepassing aan de buitenzijde en zónder deze (extra) warmteweerstand wordt vooral de buitenlucht verwarmd. Door de grote temperatuurverschillen tussen de actieve laag en de buitenlucht in het stookseizoen, is bovendien relatief veel vermogen nodig om de gevel op temperatuur te houden. Het vermogen kan alleen worden vergroot door verhoging van de aanvoertemperatuur en/of vergroting van het debiet. Beide opties leiden tot een verdere stijging van het energieverbruik.

Dit betekent dat aan de zijde waar de actieve laag van warm-bouwen wordt aangebracht, altijd ook nog een thermische isolatielaag moet worden toegevoegd aan dezelfde zijde als de actieve laag.

2.1.2.4 Temperatuurval over de actieve laag

Hoe kleiner de temperatuurval over de actieve laag, hoe hoger de gemiddelde temperatuur van de gebouwschil. De temperatuurval wordt bepaald door het debiet en door de lengte van de leiding. Meer debiet vergroot de gemiddelde temperatuur van de actieve laag maar vergroot ook de benodigde pompenergie die is verdisconteerd in de schijnbare warmteweerstand. Minder debiet is gunstig voor de benodigde pompenergie maar verlaagt de gemiddelde temperatuur van de actieve laag waardoor warm-bouwen een kleiner deel van het stookseizoen inzetbaar is.

2.1.2.5 Energie-efficiëntie van de ruimteverwarming

De in warm-bouwen geïnvesteerde energie om de actieve laag op een gewenste temperatuur te houden, moet worden terugverdiend door de energiebesparing op de ruimteverwarming. Naarmate de warmteopwekking voor ruimteverwarming efficiënter is, is dit lastiger.

2.1.3 Verschil tussen warm-bouwen en wandverwarming

Kenmerkend voor warm-bouwen is het gebruik van temperaturen net *onder* de ruimtetemperatuur. Om die reden is een (bescheiden) thermische isolatie nodig tussen de actieve laag van warm-bouwen in de uitwendige scheidingsconstructie en de ruimte. Wandverwarming gebruikt temperaturen die duidelijk *boven* de ruimtetemperatuur liggen. Anders kan immers geen warmte worden overgedragen aan de ruimte. Bij warm-bouwen is er daarom ook nog altijd sprake van een veelal bestaande centrale verwarming. Die (bestaande) centrale verwarming hoeft wel minder hard te werken doordat warm-bouwen het transmissieverlies vermindert.

2.1.4 Uitvoering

Hoewel warm-bouwen mogelijk is voor de gehele gebouwschil, zal dit om praktische redenen beperkt blijven tot de gevel. De actieve laag in de gevel wordt opgewarmd tot typisch 15-19 °C. Het gevolg is dat, van binnenuit gezien, een schijnbaar hogere *buitentemperatuur* ontstaat. Een dergelijke temperatuur ligt boven het dauwpunt van de gebruikelijke luchtcondities in gebouwen (in het stookseizoen). Een dampremmende laag is daardoor niet meer nodig. Alleen bij (langdurige) uitval van het systeem zou dit tot problemen kunnen leiden.

Het verwarmen van de gebouwschil geschiedt met watervoerende leidingen. De diameter en de afstand van de leidingen zijn dusdanig dat voldoende warmte kan worden aangevoerd om de actieve laag van warm-bouwen in de gevel gelijkmatig op temperatuur te houden. Een goed contact tussen de leidingen en de thermische massa verbetert de werking van warm-bouwen. Het toepassen van een leidingnet met kleine leidingdiameters heeft de voordelen van minder ruimtebeslag en minder pompenergie voor zover de diameter voldoende klein is om tot een laminaire stroming te leiden. De uitvoeringskosten zijn hoger dan bij gewone thermische isolatie.

De hoofdcomponenten van de installatietechniek bestaan uit:

- de actieve laag in de gebouwschil die wordt gevoed met voldoende warmte met voldoende temperatuur om de gewenste temperatuur van de actieve laag;
- een warmtebron voor de actieve laag en
- een apparaat of installatie waarmee de temperatuur uit de warmtebron eventueel kan worden verhoogd voor zover gewenst of nodig om warm-bouwen zinvol in te kunnen zetten.

2.1.5 Overig

Kwetsbare koudebruggen in de gevel worden door warm-bouwen met meer zekerheid aangepakt dan alleen met thermische isolatie en het dampdicht afwerken aan de *binnenzijde*. Warm-bouwen is, los van (primaire) energiebesparing, op zich al interessant wanneer de ernst van de koudebrugproblematiek groot is en/of alleen met veel extra moeite luchtdichting kan worden toegepast rondom koudebruggen om schade te voorkomen (bij isolatie aan de *binnenzijde*).

Warm-bouwen is interessant wanneer al een redelijke warmteweerstand aanwezig is in de gevel (waarop de hefboom werkt). De aanwezige thermische massa in de gevel helpt om het grillige aanbod van duurzame energie uit zon en wind uit te vlakken. Warm-bouwen kan zo bijdragen aan *demand-side management* en *peakshaving* van

hernieuwbare elektriciteit uit zonlicht. Om warm-bouwen toepasbaar te maken in de praktijk is het gewenst om de resultaten om te zetten naar ontwerp- en uitvoeringsrichtlijnen.

Warm-bouwen (in de gebouwschil) in combinatie met *collectieve* lage temperatuur verwarming (in de ruimtes) maakt het mogelijk om een grotere uitkoeling te bereiken in het bijbehorende *collectieve* lage temperatuur warmtenet. De retour van de lage temperatuur verwarming is dan de aanvoer van warm-bouwen, al dan niet met een regeling voor recirculatie om de juiste aanvoertemperatuur voor warm-bouwen te krijgen. De retour van warm-bouwen sluit weer aan op de retour van het lage temperatuur warmtenet. Door de grotere uitkoeling volstaan kleinere diameters voor het warmtenet om hetzelfde vermogen te kunnen leveren. Dit is vooral een financieel voordeel.

De voordelen van warm-bouwen ten opzichte van gewone thermische isolatie zijn:

- Minder isolatiedikte aan de binnenzijde bij een gelijke warmteweerstand en een gelijke energieprestatie, mits juist ontworpen.
- Vermindering van bouwfysisch risico in de constructie. Dit is met name bij gebouwen met kwetsbare materialen in de constructie interessant.
- Mogelijkheid van vrije koeling (van de gebouwschil) in de zomer zonder extra apparatuur of installatietechniek.
- Synergie met lage temperatuur warmtenetten door vergroting van de uitkoeling van het warmtenet indien toegepast in serie met de ruimteverwarming.

3 Modelbeschrijving

Het principe van warm-bouwen is verwerkt in een dynamisch rekenmodel van een vrijstaande woning met spouwloze gesloten geveldelen. Door een concreet object met warm-bouwen te kiezen is het mogelijk om [later] de resultaten van het dynamische rekenmodel te vergelijken met de werkelijkheid. Een dynamische gebouwsimulatie maakt het mogelijk om in de tijd de interactie tussen het buitenklimaat, de gebouwschil, de installaties voor ruimteverwarming c.q. ventilatie en het gebruik van het gebouw in beeld te brengen. De werking van de thermische massa van het gebouw alsmede de instellingen en de regelingen van de installaties zijn onderdeel van het rekenmodel.

3.1 Omgeving

3.1.1 Buitenklimaat

Voor het buitenklimaat is gerekend met het referentieklimaatjaar A2-20% volgens de norm NEN 5060, zowel voor temperaturen als voor straling.

3.1.2 Ondergrond

De bodem is de belangrijkste warmtebron voor warm-bouwen. Gebruik van aardwarmte is gebonden aan voorschriften. Onder 500 meter diepte komt ook de mijnbouwwet daar nog bij.

In de studie is uitgegaan van een ondergrond met een massa van 1950 kg/m^3 , een specifieke warmtecapaciteit van 1045 J/kgK en een warmtegeleiding van $2,0 \text{ W/mK}$. Voor een bodemlus (76 m diep) van een grondgekoppelde warmtepomp is een initiële, gemiddelde bodemtemperatuur van 11 °C aangehouden voor de onderste 75% van de bodemlus. Voor een diepe(re) bodemlus (450 m diep) is een initiële, gemiddelde bodemtemperatuur van 16 °C aangehouden voor de onderste 75% van de bodemlus. Het onderste, warmere deel van de bodemlus kent de meeste warmteoverdracht door het relatieve grote temperatuurverschil. Actieve en/of passieve regeneratie van de bodem heeft een significante invloed op het temperatuurverloop in de bodem door het jaar heen. Mogelijk dat een nieuwe evenwichtssituatie in de bodem pas optreedt na enkele jaren bedrijf van de bodemlus.

Voor de geothermische gradiënt in Nederland is gerekend met $0,0225 \text{ °K/m}$.¹ Op 450 meter diepte bereikt de bodem daardoor een gemiddelde temperatuur van $19,75 \text{ °C}$

¹ Meer met bodemenergie, *Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur* (rapport 8), 30 maart 2012.

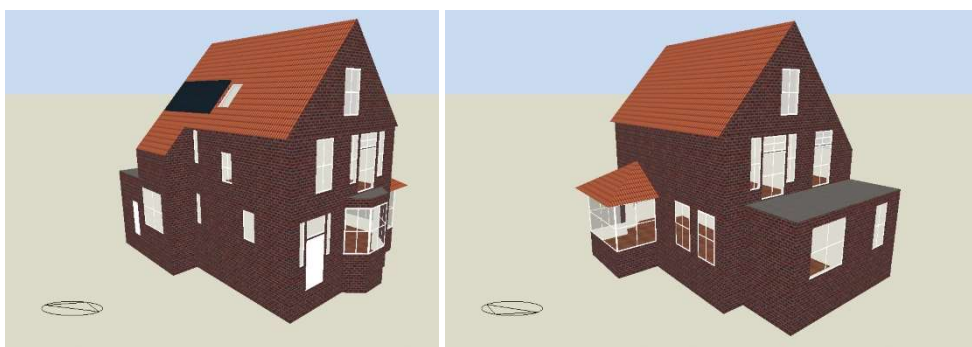
uitgaande van een gemiddelde temperatuur aan het maaiveld van 9,6 °C. In onderzoek naar geothermie komt voor Nederland een temperatuurgradiënt van 27,5 °K/Km voor de bovenste 10 Km naar voren.² Hierdoor stijgt de initiële, gemiddelde bodemtemperatuur van 16 °C naar 17,3 °C.

Door klimaatverandering loopt de temperatuur aan het maaiveld op en dus ook in de bodem. Hoe dieper, hoe langzamer dit gaat. Voor de perioden en diepten in deze studie is de opwarming van de bodem door klimaatverandering verwaarloosbaar.

3.2 Bouwkundig

3.2.1 Oriëntatie en gebouwworm

Het onderzochte gebouw betreft een vrijstaande woning van drie bouwlagen met spouwloze gesloten gevels en een zadeldak. Aan de achterzijde is een uitbouw met een plat dak. Aan de voor- en zijgevel (op het noorden) bevindt zich respectievelijk een erker en een serre. De voorgevel is gericht op het oosten (108°).

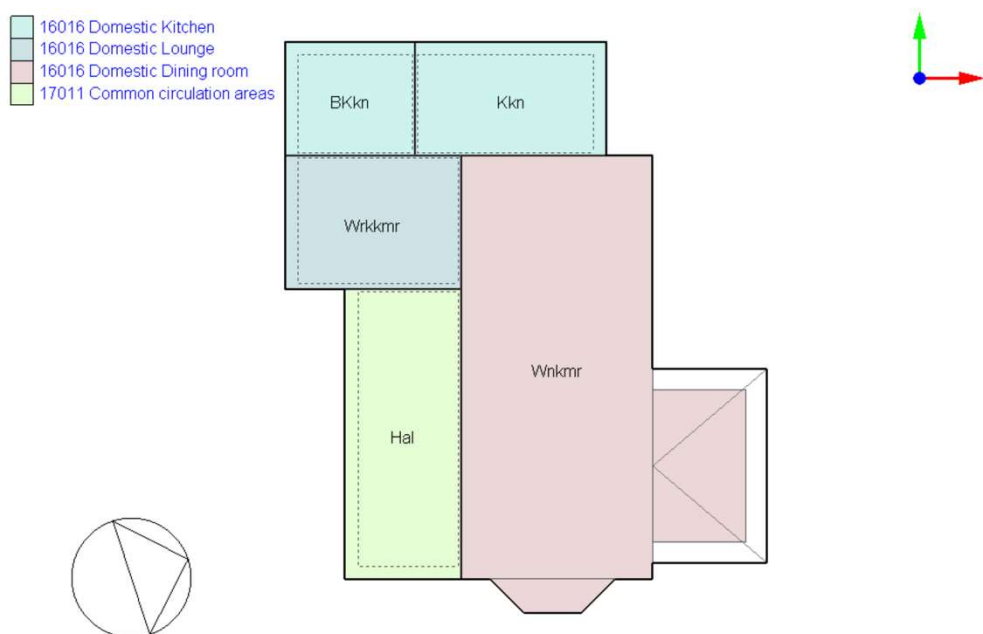


Figuur 3.1 Aanzicht van het model vanuit het zuidoosten (links) en noordwesten (rechts). Op het zuidelijk dak ligt een zonnecollector-systeem.

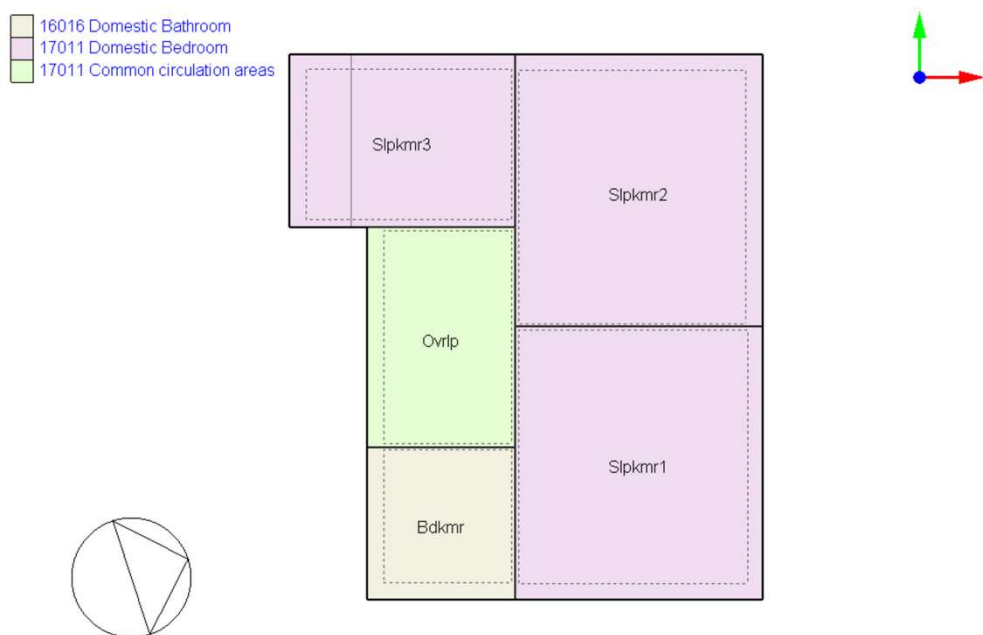
3.2.2 Plattegronden

De woning heeft elf vertrekken inclusief de zolderruimte. Alle vertrekken, uitgezonderd de zolderruimte die onder het schuine dak ligt, zijn voorzien van warm-bouwen. Zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3.

² Limberger, J., Thermo-mechanical characterization of the lithosphere: Implications for geothermal resources, 2018, proefschrift Universiteit Utrecht



Figuur 3.2 Plattegronden van het model voor de begane grond



Figuur 3.3 Plattegronden van het model voor de eerste verdieping

3.2.3 Dichte geveldelen

De dichte geveldelen bestaan uit steensmuren (zonder spouw) en worden aan de binnenzijde voorzien van thermische isolatie. De omvang en opbouw van de

thermische isolatie passend bij warm-bouwen is onderdeel van deze studie. Tabel 3.1 toont de kenmerken van de constructieopbouw voor de variant I.0.

Tabel 3.1 Constructieopbouw en kenmerken gevel met warm-bouwen (variant I.0)

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-iso.	40	0,93	0,043	45	1380
Gipsplaat	10	0,01	0,810	1680	840
Totaal	290	1,23			

Toelichting:

- a. De opbouw is van buiten naar binnen. De actieve laag (AL) van warm-bouwen is opgenomen in de pleisterlaag.
- b. Alleen het metselwerk is bestaand. De overige materiaallagen zijn gerelateerd aan warm-bouwen.
- c. R_c is de warmteweerstand (zonder warm-bouwen). λ_{reken} is de rekenwaarde voor de warmtegeleiding. ρ is de soortelijke massa. c is de specifieke warmtecapaciteit.

Tabel 3.2 Relevante oppervlakken in het rekenmodel [in m²].

	Begane grond	1 ^e Verdieping	2 ^e Verdieping	Totaal
Vloerverwarming	69	--	--	69
Warm-bouwen (gevel)	115	80	30	225
Totaal	184	80	30	294

Toelichting: --

3.2.4 Beglazing

De bestaande beglazing is enkel glas die aan de binnenzijde wordt voorzien van een voorzetbeglazing in de vorm van een (extra) kozijn met HR++-glas. Door de voorzetbeglazing is het mogelijk om de karakteristieke kozijnen met hier en daar een fijne roedeverdeling te handhaven. Door de voorzetbeglazing in combinatie met binnen-gevel-isolatie ligt de thermische gebouwschil meer in één vlak. Dit is bouwfysisch gunstig. De toepassing van drievoudige beglazing maakt het gebruik van beoogde lage temperatuur-radiatoren op de verdieping haalbaar.

3.3 Installatietechniek

3.3.1 Ruimteverwarming

3.3.1.1 Warmte-opwekking

In het rekenmodel is de ruimteverwarming volledig onafhankelijk van warm-bouwen zodat de energieverbruiken voor beiden eenvoudig kunnen worden gesplitst. Dit komt het bepalen van de resultaten voor warm-bouwen ten goede.

Het energetische rendement van een [bestaande] cv-installatie is van invloed op de prestatie van warm-bouwen. Warm-bouwen concurreert met de cv-installatie door dat beiden energie verbruiken om een bepaalde energetische prestatie te behalen. Hoe hoger het energetische rendement van de bestaande cv-installatie, hoe sterker de concurrentie is voor warm-bouwen. In het geval van een warmtepomp en vloerverwarming is de concurrentie voor warm-bouwen dus groot.

Voor de [bestaande] cv-installatie is in het rekenmodel vooralsnog een gasgestookte ketel aangehouden omdat dat in de praktijk in de meeste gevallen het geval zal zijn. Gezien het actuele beleidsvoornemen van de overheid om gas voor verwarming uit te faseren is echter de vraag of dit over 5 tot 10 jaar nog steeds het geval is. De warmteopwekking voor warm-bouwen kan geschieden op meerder manieren (zie paragraaf 3.3.2).

3.3.1.2 Warmteafgifte

In het rekenmodel is voor de woonkamer en voor de werkkamer warmteafgifte via vloerverwarming meegenomen. Voor de overige verblijfsruimtes op de begane grond en voor de verblijfsruimtes op de verdiepingen is gerekend met lage temperatuur radiatoren. De vloer heeft de volgende constructieopbouw en kenmerken.

Tabel 3.3 Constructieopbouw en kenmerken begane grond vloer

Materiaal	d mm	R_c m ² K/W	λ_{reken} W/mK	ρ kg/m ³	c J/kgK
Parket	22	0,16	0,140	520	2280
Cementdeklaag	35	0,04	0,810	1680	840
Zwaluwplaat (staal)	3	0,00	45	7690	420
Minerale wol	100	2,63	0,038	140	840
Luchtspouw	113	0,18		1	1200
Gipsplaat	25	0,10	0,250	600	1000
Totaal	298	3,11			

Toelichting:

- a. De opbouw is van boven naar beneden.
- b. De leidingen van de vloerverwarming zijn opgenomen onderin de cementdeklaag.
- c. R_c is de warmteweerstand. λ_{reken} is de rekenwaarde voor de warmtegeleiding. ρ is de soortelijke massa. c is de specifieke warmtecapaciteit.

3.3.1.3 Leidingsystemen

Tabel 3.4 toont de kenmerken, eigenschappen en afmetingen van de leidingen die expliciet worden meegenomen in het rekenmodel. De overige leidingen worden niet expliciet meegenomen in het rekenmodel.

Tabel 3.4 Kenmerken, eigenschappen en afmetingen van leidingsystemen

Kenmerk	Vloer-verwarm.	Warm-bouwen	Bodemlus	Diepe bodemlus
Buismateriaal (Polyethyleen)			PE100 (SDR 11)	PE100 (SDR 11)
Boorgat [mm]	--	--	135	170
Buisbuitendiameter [mm]	16,4	11,6	32	50
Buiswanddikte [mm]	2,7	1,3	3,0	4,6
H.o.h.-buisafstand [mm]	100	100	70	110
Luslengte [m]	90	60	2x76	1x450
Wandruwheid [mm]	0,005	0,005	0,010	0,010
Opslag drukverlies appendages	50%	50%	25%	25%
Warmtegeleiding [W/mK]	0,43	0,43	0,43	0,43
Typische stroomsnelheid [m/s]	0,2-0,3	0,15-0,2	0,3-0,4	0,2-0,3

Toelichting:

- a. Luslengte: (diepe) bodemlus betreft een boring met een U-vormig lus.
- b. Buiskeuze bodemlussen volgens *Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaars*, SenterNovem, 27 mei 2003

De stooklijn voor de aanvoertemperatuur voor de vloerverwarming verschilt voor de situatie met en zonder warm-bouwen omdat door de equivalente thermische isolatie van warm-bouwen de warmtebehoefte en het verwarmingsvermogen afnemen.

3.3.2 Warmtebronnen voor warm-bouwen

Om de gebouwschil op de gewenste temperatuur te houden is een warmtebron met een bepaalde temperatuur nodig. De warmtebron moet een grotendeels hernieuwbaar karakter hebben om een interessante energetische prestatie voor warm-bouwen te behalen. Zonnewarmte en bodemwarmte (zonder warmtepomp) zijn

volledig hernieuwbaar maar hebben respectievelijk als nadeel dat er in het stookseizoen onvoldoende van beschikbaar (zon) is of dat de temperatuur niet hoog genoeg is (in de bodem tot 500 m diep). Door inzet van een warmtepomp kan de temperatuur uit de bodem worden verhoogd. Dit vraagt extra energie in de vorm van elektriciteit die momenteel nog steeds grotendeels fossiel van aard is.

3.3.2.1 Hernieuwbare warmtebronnen

Zonne-energie en/of bodemwarmte kunnen afzonderlijk of in combinatie worden ingezet voor warm-bouwen en/of ruimteverwarming. Bij combinatie van hernieuwbare warmtebronnen heeft in het rekenmodel [directe] zonne-energie prioriteit boven warmte uit de bodem met behulp van een warmtepomp vanwege de hogere (primaire) energie-efficiëntie.

De bodem is een belangrijke warmtebron voor warm-bouwen. In Nederland is de bodemtemperatuur tot 100 meter diepte rond de 13 °C. Dit is onvoldoende om warm-bouwen zinvol in te zetten voor vermindering van de energievraag voor ruimteverwarming. Een zinvolle inzet van warm-bouwen voor vermindering van de energievraag vraagt een significant temperatuurverschil ter plekke van de *buitenzijde* van de thermische isolatie. Bij een steensmuur met 40 mm isolatie aan de binnenzijde wordt pas bij buitentemperaturen onder de 5,5 °C een temperatuurverschil van minimaal +2 °K bereikt in de actieve laag. Dit blijkt 1979 uur het geval in een gemiddeld jaar en komt overeen met 54% van het stookseizoen. En dan nog is de invloed van warm-bouwen beperkt door een geringe temperatuurverhoging in de actieve laag. Wanneer het significante temperatuurverschil in de actieve laag minimaal 5 °moet zijn, dan is de inzet van warm-bouwen met alleen bodemwarmte uit de bovenste 100 meter beperkt tot 932 uren per jaar.

De bovengrens van 5,5 °C voor de buitentemperatuur volgt uit de aanname voor de bodemtemperatuur van 13 °C. Hier moeten de volgende zaken nog vanaf: de invloed van de beoogde temperatuurval (4 °K) over de actieve laag die de *gemiddelde* temperatuur in de actieve laag bepaalt, het gewenste significante temperatuurverschil (2 °K) met de situatie zonder warm-bouwen, de daling van de bodemtemperatuur ter plekke van het boorgat (schatting: 1,5 °K) door de onttrekking van warmte en de invloed van de temperatuurgradiënt in de gevel tot aan de actieve laag. In een metselwerkgevel zonder warm-bouwen is, bij toepassing van 40 mm isolatie ($\lambda=0,04$ W/mK) aan de binnenzijde, de temperatuurgradiënt ongeveer 8 °K/m. Bij een steensmuur ligt de gemiddelde temperatuur ter plekke van de binnenzijde van het metselwerk dan bijna 2 °C hoger dan aan de buitenzijde.

Voor een zinvolle inzet van warm-bouwen voor vermindering van de energievraag gedurende het gehele stookseizoen is een significant hogere temperatuur nodig dan

dat de bodem (in Nederland) kan leveren tot 150 m diep. Ook voor het voorkomen van inwendige condensatie is alleen die bodemtemperatuur te laag. De inzet van een warmtepomp voor een hogere temperatuur ligt voor de hand. Zowel vanwege de hoge energie-efficiëntie als de mogelijkheid om de warmtepomp te combineren met een lage temperatuur ruimteverwarming. Een alternatief is geothermische warmte met een voldoende hoog temperatuurniveau (aan het maaiveld) van 17,5-20 °C of meer zekerheid hierover.

De inzet van warm-bouwen met uitsluitend bodemwarmte van ongeveer 13 °C kan wél zinvol zijn om pieken in de warmtevraag (bij lage buitentemperaturen) te verminderen. Op die manier kan warm-bouwen een bijdrage leveren aan de omschakeling in Nederland van gasgestookte ruimteverwarming naar ruimteverwarming met behulp van elektrische warmtepompen zonder dat verzwaring van het landelijke elektriciteitsnet nodig is.

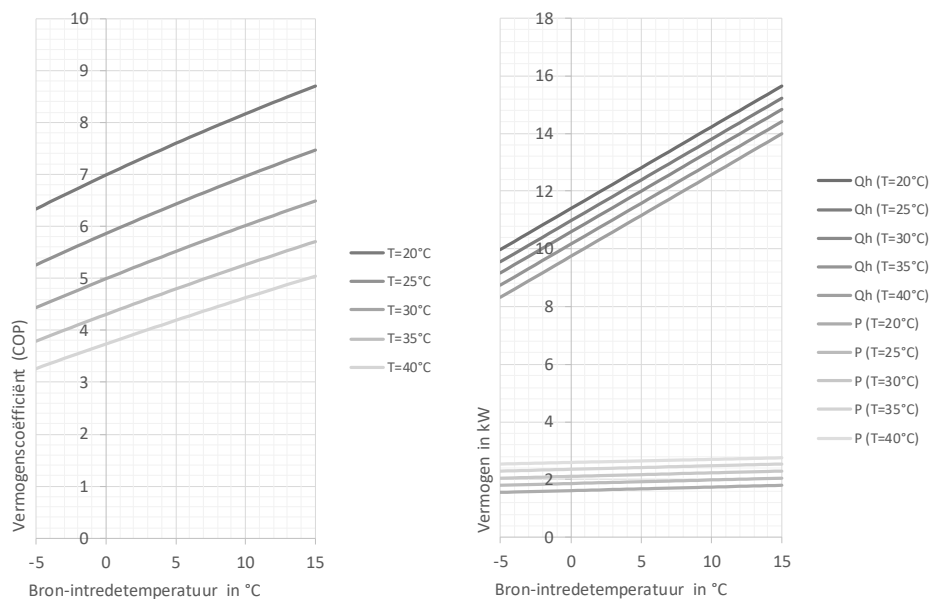
3.3.2.2 Warmtepomp

Een warmtepomp verhoogt of (verlaagt) de temperatuur van een (laagwaardige) warmtebron. Hoe kleiner de temperatuurverhoging (of verlaging), hoe energie-efficiënter de warmtepomp werkt. Voor gebouwen ligt het gewenste temperatuurniveau meestal op 30-45 °C. Althans voor ruimteverwarming. Voor warm tapwater kunnen temperaturen tot 65 °C nodig zijn. De verbetering van de energie-efficiëntie ten opzichte van gas is dan echter nihil. Voor warm-bouwen is een (aanvoer)-temperatuur van 18-21 °C voor een warmtepomp voldoende. Niet alle warmtepompen zijn geschikt om temperaturen van 20 °C te kunnen leveren. De Daikin Altherma type EGSQH-A9W is een warmtepomp die (ook) temperaturen van rond de 20 °C kan leveren. Het is een warmtepomp met een invertergestuurde capaciteitsregeling die gebruik maakt van de bodem als warmtebron. Het nominaal thermisch vermogen van de warmtepomp bedraagt 9 kW. Figuur 3.4 toont de prestaties in grafische vorm.

Steeds meer warmtepompen kunnen meerdere temperatuurniveaus leveren. Dergelijke warmtepompen zijn bij uitstek geschikt voor toepassing van warm-bouwen gecombineerd met lage temperatuur verwarming. De *seasonal performance factor* (SPF) van de warmtepomp is als volgt gedefinieerd:

- $SPF_{WP} = \text{jaarlijkse warmte warmtepomp voor warm-bouwen } (Q_{WB;WP}) / \text{jaarlijks benodigde elektriciteit voor de warmtepomp } (E_{WB;WP})$.

De warmtepomp levert de warmte voor warm-bouwen die niet direct kon worden geleverd door de bodem en/of de zon: $Q_{WB;WP} = Q_{WB} - Q_{WB;bodem} - Q_{WB;z.b.}$



Figuur 3.4 Prestaties van de warmtepomp Daikin Altherma (EGSQH-A9W) op basis van een regressie-analyse van fabrikantdata (bij 0,58 L/s aan de bronzijde en 0,48 L/s aan de verwarmingszijde).

3.3.2.3 Ondiepe geothermie

Het voordeel van warmte van een grotere diepte (400-450 m) met een hogere temperatuur is dat dan niet persé een warmtepomp nodig is voor warm-bouwen. Het voordeel van een diepere bodemlus ten opzichte van een warmtepomp schuilt ook in een technisch eenvoudiger systeem en een langere technische levensduur. Door de grotere lengte van de bodemlus bij een diepere boring, is de stroomsnelheid in de buis (nog meer) van belang om de benodigde pompenergie niet te hoog op te laten lopen. Pompenergie is een belangrijke factor bij de energieprestatie van warm-bouwen. Bij bodemlussen van 400-450 meter diep kunnen temperaturen van in ieder geval 15-17 °C omhoog worden gehaald en mogelijk meer. De toevoer van warmte in de bodem naar de bodemlus moet het tempo van de warmteonttrekking uit de bodem kunnen bijbenen om te voorkomen dat de temperatuur van de bodem rondom de bodemlus teveel daalt.

3.3.2.4 Temperatuur en regeling

De (gemiddelde) temperatuur van de actieve laag is een belangrijke parameter in de hefboom van warm-bouwen. Het gemiddelde temperatuurniveau wordt bepaald door de aanvoertemperatuur en de temperatuurval. Voor de hoogte van de aanvoertemperatuur zijn verschillende strategieën mogelijk:

1. Constante aanvoertemperatuur.

2. Weersafhankelijke aanvoertemperatuur.
Hoe kouder, hoe hoger de aanvoertemperatuur.
3. Inverse weersafhankelijke aanvoertemperatuur.
Hoe kouder, hoe *lager* de aanvoertemperatuur.
4. Binnentemperatuurafhankelijke aanvoertemperatuur.

Een constante aanvoertemperatuur is de meest eenvoudige regeling. Zeker bij significante thermische massa in de gebouwschil is de temperatuur van de actieve laag ook redelijk constant, ondanks een sterke fluctuatie van de buitentemperatuur. De kunst is hierbij om de juiste (constante) aanvoertemperatuur te kiezen voor een goede prestatie van warm-bouwen.

Een traditionele weersafhankelijke regeling waarbij het in te zetten verwarmingsvermogen toeneemt bij een afname van de buitentemperatuur stuit bij warm-bouwen snel op problemen doordat het warmteverlies (van de actieve laag naar buiten) sterk toeneemt en inherent daaraan ook de benodigde pompenergie om het warmteverlies te compenseren.

De gedachte achter de inverse weersafhankelijke regeling hangt samen met de relatie tussen de aanvoertemperatuur en de energie-efficiëntie van een warmtepomp alsmede de relatie tussen het debiet en de bijbehorende pompenergie. Om een bepaalde gemiddelde temperatuur te handhaven in de actieve laag is een hogere aanvoertemperatuur nodig en/of een kleinere temperatuurval. Het eerste verlaagt de energie-efficiëntie van de warmtepomp. Het tweede vraagt een hoger debiet. Het pompvermogen en daarmee ook het bijbehorende energieverbruik neemt toe met de derde macht van de debiettoename.

Een lagere gemiddelde temperatuur van de actieve laag om de energie-efficiëntie van de warmtepomp hoog te houden en de pompenergie te beperken, betekent echter ook een lagere hefboom van warm-bouwen en dus een hoger energieverbruik voor de conventionele ruimteverwarming (dat slechts lineair toeneemt met het temperatuurverschil over de gebouwschil). Optimalisatie is hierbij mogelijk. Het energieverbruik voor de pomp(en) kan worden beperkt door het instellen van een maximaal debiet. Dat betekent dat in koudere periodes de gemiddelde temperatuur van de actieve laag daalt (tot onder het *setpoint*).

Wellicht nog de meest veelbelovende strategie is de binnentemperatuurafhankelijke aanvoertemperatuur. Deze strategie komt voort uit het principe van warm-bouwen zelf. De warmtestroom van binnen naar buiten door de gevel wordt mede bepaald door het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Het verwarmen van de gebouwschil blokkeert deze warmtestroom in zekere mate. Wanneer het temperatuurverschil nihil is, dan stopt zelfs de warmtestroom geheel en is er

schijnbaar een oneindige (equivalente) warmteweerstand. Door er voor te zorgen dat de temperatuur van de gebouwschil vrijwel gelijk is aan de binnentemperatuur, wordt niet meer warmte toegevoerd dan strikt noodzakelijk voor een maximale hefboom van warm-bouwen. Een dergelijke strategie kan ook inspelen op verschillen in binnentemperatuur per verblijfsruimte. Ook hier is een limiet op het debiet nodig.

3.3.2.5 Zonneboiler

Een zonneboiler ondersteunt warm-bouwen door warmte met een [laagwaardige] temperatuur direct te leveren aan de actieve laag van warm-bouwen en indirect door regeneratie van de bodem. Voor warm-bouwen zijn temperaturen van circa 21-23 °C voldoende. De warmteverliezen van de collector naar de omgeving zijn daardoor minder dan bij toepassing voor warm tapwater. Het rendement van de zonneboiler is daardoor hoger. Buiten het stookseizoen is warm-bouwen niet actief. De zonneboiler kan dan worden ingezet voor warm tapwater (met hogere temperaturen).

In het rekenmodel is een vacuümbuis-collector meegenomen die een gelijkmatigere opbrengstverdeling over het jaar heeft dan een vlakke plaat collector. En bij temperaturen tot 90 °C is ook de jaaropbrengst groter. Gerekend is met de collector Vitosol 300-T model SP3 (2 m²) van Viesmann. Vier collectoren zijn gecombineerd tot één systeem. De zonnecollectoren zijn in serie geschakeld. Het maximale debiet bedraagt 0,185 L/s. Overtollige warmte wordt tijdelijk gebufferd in een opslagvat. Tabel 3.5 toont de kenmerken en eigenschappen van de zonnecollector.

Tabel 3.5 Kenmerken zonnecollector

Kenmerk		Waarde
Type		Vacuümbuis
# Collectoren		3
# Buizen (per collector)		20
Bruto oppervlak (per collector)		2,88 m ²
Apertuur oppervlak (per collector)		2,11 m ²
<i>Heat loss coefficients</i>	η_0	0,508 -
	K_1	-0,916 W/(m ² K)
	K_2	-0,003 W/(m ² K ²)
<i>Incident angle modifier coefficients</i>	b_0	0,519 -
	b_1	-0,743 -

Toelichting:

- De *heat loss coefficients* hebben betrekking op het bruto collectoroppervlak. De coëfficiënten K_1 en K_2 worden soms ook aangeduid als a_1 en a_2 .
- De data voor de *heat loss coefficients* en de *incident angle modifier* komen van de zonnecollector dataset van EnergyPlus.

3.3.2.6 Opslagvaten

In het rekenmodel zijn twee opslagvaten opgenomen: één opslagvat direct ten behoeve van warm-bouwen en één opslagvat voor regeneratie van de bodem. Het opslagvat voor warm-bouwen zelf heeft een geringe opslagcapaciteit. De gedachte is dat de beperkte hoeveelheid zonne-energie in het stookseizoen, dus buiten de zomer, vrijwel altijd direct kan worden benut voor warm-bouwen. Een groter vat leidt alleen maar tot hogere investeringskosten en meer stilstandsverlies.

Tabel 3.6 Kenmerken opslagvaten zonne-energie

Kenmerk	Warm-bouwen	Regeneratie
Inhoud [L]	50	300
Afmetingen D x H [mm]	409 x 583	656 x 1134
Isolatie dikte [mm]	30	30
Warmtegeleiding isolatie [W/mK]	0,036	0,036
Warmteverlies buiten bedrijf [W/K]	1,7	4,0
Warmteverlies in bedrijf [W/K]	2,2	4,5

Toelichting:

a. Het warmteverlies in bedrijf is hoger door het extra warmteverlies van appendages verbonden met het opslagvat. Buiten bedrijf koelen deze appendages weer snel af tot de omgevingstemperatuur.

3.4 Rekenmodel

De berekeningen zijn uitgevoerd met EnergyPlus, een gevalideerd rekenmodel volgens de BESTEST.³ Voor de modellering van warm-bouwen is gebruik gemaakt van een aantal specifieke objecten binnen EnergyPlus. In het bijzonder objecten waarmee (stralings)warmte kan worden afgegeven via een constructie (bijvoorbeeld een gevel of vloer), waarmee de warmteuitwisseling met de bodem kan worden bepaald en waarmee de temperatuurverdeling in een constructie kan worden gemodelleerd.

³ <https://energyplus.net/testing> (juli 2018)

4 Bevindingen

De kernvraag van het onderzoek is te bepalen hoe warm-bouwen werkt en welke condities een zinvolle toepassing opleveren voor warm-bouwen. In deze studie gaat het daarbij om de energetische prestatie (of zin) van warm-bouwen, in het bijzonder om de prestatie in relatie tot het primaire energieverbruik. Hoewel minstens net zo interessant wordt bij de bevindingen niet gekeken of warm-bouwen ook financieel interessant is. Dit hangt sterk af van de specifieke situatie en in het bijzonder wat het alternatief is voor warm-bouwen. In sommige gevallen is er zelfs geen alternatief voor de specifieke voordelen van warm-bouwen. Bijvoorbeeld bij monumentale gebouwen met kwetsbare onderdelen in de gevel zoals houten balkopleggingen.

Het rekenmodel waarin warm-bouwen is meegenomen (zie hoofdstuk 3) is doorgerekend voor verschillende varianten waarin steeds één parameter is gewijzigd om te achterhalen welke parameters de prestaties van warm-bouwen (significant) bepalen. De varianten zijn als volgt gegroepeerd.

- a. Constructie
De dikte en materiaaleigenschappen van de gevel. De positie van de actieve laag in de gevel.
- b. Aanvoertemperatuur
De aanvoertemperatuur naar de actieve laag.
- c. Debiet
Het debiet naar de actieve laag.
- d. Installatie-techniek
Inzet van de (diepe) bodem en/of zonnewarmte.

De invloed van warm-bouwen kan alleen worden vastgesteld door ook steeds de identieke situatie door te rekenen waarbij warm-bouwen niet actief is. De hefboom voor de specifieke situatie volgt uit het vergelijk tussen de situatie met en zonder warm-bouwen. Tussen beide situaties kan een verschil optreden in de (gemiddelde) binnentemperaturen (0,1-0,6 °C voor verwarmde ruimtes; 0,5-1,3 °C voor onverwarmde ruimtes) en daarmee een verschil in de warmteverliezen door transmissie en ventilatie van de afzonderlijke ruimtes. Het verschil is weliswaar niet groot maar desondanks toch via graaddagen gecorrigeerd om een nauwkeurige(re) hefboom voor warm-bouwen te kunnen bepalen (zie Bijlage II).

De resultaten voor de varianten tonen behalve de uiteindelijke hefboom van warm-bouwen, ook verschillende aspecten van de ruimteverwarming die zijn gerelateerd aan warm-bouwen. Dit geeft meer inzicht in het gedrag en het effect van warm-bouwen. Het gaat om de volgende aspecten die in beeld zijn gebracht:

- Warmtevraag voor ruimteverwarming; graaddagen bij gemiddelde binnentemperatuur
- Elektriciteitsvraag voor warmtepomp (WP) en circulatiepompen (Zb = zonneboiler, WB = warm-bouwen, Reg. = regeneratie-circuit, Vloer = vloerverwarming, Bron = bodenbron); vermogen en vollasturen warmtepomp
- *Seasonal Performance Factor* (SPF) van de warmtepomp en warm-bouwen
- Warmteproductie en jaarrendement zonneboiler
- Stookseizoengemiddelde binnentemperaturen
- Stookseizoengemiddelde temperaturen van de actieve laag
- Warmte-overgangsweerstanden van de warm-bouwen constructie
- Dynamische en statische hefboom warm-bouwen

Het elektriciteitsverbruik voor de regeling van de conventionele warmte-opwekker (gasgestookte ketel) verandert ook door warm-bouwen. Het effect daarvan is klein, niet nauwkeurig bepaald en voor alle varianten ongeveer gelijk. Dit aspect is daarom achterwege gelaten in de resultaten.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste resultaten besproken. Alle resultaten zijn opgenomen in Bijlage III.

Hefbomen

Voor alle doorgerekende varianten zijn vier hefboomen bepaald op gebouwniveau. Dit zijn naar geveloppervlak gewogen hefboomen van de hefboomen op ruimteniveau.

- $F_{WB;dyn;bruto}$; hefboom warm-bouwen op constructieniveau waarbij enkel de warmtetransmissie door de gevel wordt beschouwd in vergelijking zonder warm-bouwen
- $F_{WB;dyn;netto}$; hefboom warm-bouwen op systeemniveau waarbij de warmtetransmissie door de gevel wordt beschouwd in vergelijking zonder warm-bouwen en waarbij tevens de benodigde netto energie voor het op temperatuur brengen van de actieve laag wordt verdisconteerd
- $F_{WB;dyn;prim}$; hefboom warm-bouwen op systeemniveau waarbij de warmtetransmissie door de gevel wordt beschouwd in vergelijking zonder warm-bouwen, waarbij tevens de benodigde netto *primaire* energie voor het op temperatuur brengen van de actieve laag wordt verdisconteerd, mede via de primaire opwekkingsrendement van de brandstoffen.⁴

⁴ De volgende cijfers zijn aangehouden voor het primaire opwekkingsrendement: 40% voor elektriciteit en 95% voor aardgas. Deze nauwkeurigheid is voldoende om het effect ervan op warm-bouwen te illustreren.

- $F_{WB;stat;bruto}$: hefboom warm-bouwen op constructieniveau waarbij enkel de warmtetransmissie door de gevel wordt beschouwd in vergelijking zonder warm-bouwen en waarbij een correctie wordt meegenomen voor de (gebruikelijke) vaste waarden van de warmte-overgangsweerstanden van de constructie. Dit is handig voor statische rekenmodellen.

Een hefboom groter dan 1 duidt op een betere prestatie (qua ruimteverwarming) dan de *identieke* situatie zonder warm-bouwen. Bij de toevoer van warmte aan de gevel is de hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ altijd groter dan 1. Dit geldt eveneens voor de hefboom $F_{WB;dyn;netto}$ bij de onderzocht varianten. De hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ kan kleiner dan 1 zijn doordat daarin de primaire energie voor de benodigde warmte voor warm-bouwen en de distributie daarvan is verdisconteerd. Een hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ kleiner dan 1 ontstaat wanneer een warmtepomp teveel moet ondersteunen en/of de circulatiepomp te hard moet werken. Beide gebruiken elektriciteit. Dat heeft een slechter primair rendement dan aardgas.

De hefboom $F_{WB;dyn;netto}$ is van belang voor de gebruiker(s) omdat het energiesaldo (energiebesparing minus daarvoor benodigde investering in energie) aangeeft wat moet worden afgerekend met de energieleverancier. De hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ is van belang om de energetische prestatie van warm-bouwen te beoordelen op nationaal niveau omdat daarin de primaire energie van het energiesaldo is meegenomen. Tegenover de benodigde primaire energie voor warm-bouwen staat de verlaging van het primaire energieverbruik van de bestaande centrale verwarming. De netto energie is het verschil tussen de energiebehoefte voor warm-bouwen en de energiebesparing voor de bestaande centrale verwarming inclusief pompenergie.

In het geval de benodigde elektriciteit voor de (warmte)pomp(en) voor warm-bouwen volledig afkomstig is van hernieuwbare bronnen (zon, wind), is de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ gelijk aan de hefboom $F_{WB;dyn;netto}$.

Om de analyse behapbaar te maken is bij de bevindingen alleen gekeken naar de volgende vijf representatieve ruimtes: woonkamer, keuken, hal, badkamer en slaapkamer (W/K/H/B/S). De resultaten zijn het (gewogen) gemiddelde van deze ruimtes. De zolderruimte is in het rekenmodel niet uitgevoerd met warm-bouwen in de gevels. Zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3 voor de ligging van de afzonderlijke ruimtes.

4.1 Warmteoverdracht uitwendige scheidingsconstructie

De hefboom warm-bouwen wordt bepaald door de verhouding in de warmte-overdracht aan de binnenzijde van een uitwendige scheidingsconstructie voor de identieke situatie *met* en *zonder* warm-bouwen geactiveerd. De totale warmte-overdracht door convectie alsmede door straling, zowel langgolvig als kortgolvig, is

daartoe nauwkeurig bepaald. Voor de warmteoverdracht voor de specifieke situaties is in het algemeen het volgende op te merken over de warmteoverdracht.

4.1.1

Buitenzijde

De *berekende* (totale) warmteoverdracht aan de *buitenzijde* (α_e) van een uitwendige scheidingsconstructie *zonder* warm-bouwen bedraagt 9-11 W/m²K. Wat minder dan de helft is van de gebruikelijke vaste waarde voor de (totale) warmteoverdracht aan de buitenzijde van 25 W/m²K. Voor de verklaring van het verschil wordt meestal eerst gedacht aan een verschil in (gemiddelde) windsnelheid. Variatie in (realistische) windsnelheden verklaart echter slechts een klein deel van het gevonden verschil. Een belangrijke(re) verklaring van het verschil hangt samen met de warmteoverdracht door langgolvlige straling. De gebruikelijke waarde voor de warmteoverdracht (in statische rekenmodellen) stamt uit de tijd van een niet geïsoleerde gebouwschil met een relatief warme constructie en dus een relatief grote warmte-uitstraling naar de omgeving. Bij een geïsoleerde gebouwschil ligt de temperatuur van de constructie aan de *buitenzijde* van de thermische isolatie dicht bij de buitentemperatuur. Daardoor is de uitwisseling van langgolvlige straling met de omgeving kleiner en daarmee ook (dat deel van) de warmteoverdracht. In termen van warmteovergangsweerstand: de *berekende* warmteovergangsweerstand aan de buitenzijde *zonder* warm-bouwen bedraagt 0,09-0,11 m²K/W. De *gebruikelijke* (vaste) waarde voor de warmteovergangsweerstand aan de *buitenzijde* is 0,04 m²K/W. Zowel de berekende als de gebruikelijke waarde voor de warmteovergangsweerstand zijn klein in verhouding tot de totale warmteweerstand van een geïsoleerde constructie.

Mét warm-bouwen neemt de warmteoverdracht aan de *buitenzijde* (α_e) van een uitwendige scheidingsconstructie toe tot 10-14 W/m²K bij verder dezelfde situatie, waaronder de (gemiddelde) luchtsnelheid op de buitenzijde van de gebouwschil. De toename is het gevolg van een toename in warmteoverdracht door langgolvlige straling naar de omgeving. Warm-bouwen heeft immers tot gevolg dat de constructie aan de buitenzijde van de actieve laag warmer wordt.

4.1.2

Binnenzijde

De *berekende* (totale) warmteoverdracht aan de *binnenzijde* (α_e) van een uitwendige scheidingsconstructie bedraagt *zonder* warm-bouwen 5-7 W/m²K. Dit is iets minder dan de gebruikelijke vaste waarde voor de (totale) warmteoverdracht aan de binnenzijde van 7,7 W/m²K. Bij een geïsoleerde gebouwschil ligt de temperatuur van de constructie aan de *binnenzijde* van de thermische isolatie dicht bij de oppervlaktetemperatuur van binnenwanden van de betreffende ruimte die *geen* uitwendige scheidingsconstructie zijn. Daardoor is de uitwisseling van langgolvlige

straling met die binnenwanden hier ook (iets) kleiner. In termen van warmte-overgangswaarde: de *berekende* warmteovergangswaarde aan de binnenzijde *zonder* warm-bouwen bedraagt 0,14-0,21 m²K/W. De *gebruikelijke* (vaste) waarde voor de warmteovergangswaarde aan de buitenzijde is 0,13 m²K/W. Zowel de berekende als de gebruikelijke waarde voor de warmteovergangswaarde zijn klein in verhouding tot de totale warmteovergangswaarde van een geïsoleerde constructie.

Mét warm-bouwen neemt de warmteoverdracht aan de *buitenzijde* (α_e) van een uitwendige scheidingsconstructie af tot 1,3-4 W/m²K. Dit is het gevolg van een afname in warmteoverdracht door langgolvlige straling naar de omgeving. Warm-bouwen zorgt er immers ook voor dat de constructie aan de binnenzijde van de actieve laag warmer wordt, net als bij thermische isolatie.

4.2 Equivalente warmteovergangswaarde

De werking van warm-bouwen kan worden vergeleken met thermische isolatie. Ter illustratie hiervan is dit voor de variant I.0 cijfermatig in beeld gebracht. Het materiaal van de actieve laag (kalkpleister, dikte 10 mm) heeft een warmtegeleiding (λ) van 0,8 W/mK. Als gevolg van warm-bouwen –indien het effect ervan wordt geconcentreerd in de actieve laag– zou de schijnbare warmtegeleiding (λ^*) van deze laag afnemen naar 0,0082 W/mK voor de variant I.0. Indien de actieve laag wordt vervangen door een (fictief) equivalent materiaal met deze warmtegeleiding, dan ontstaat eveneens een warmteovergangswaarde van de constructie (R_c) van 2,44 m²K/W, gelijk aan de schijnbare warmteovergangswaarde (R_c^*) van de variant I.0. Zie ook Tabel 4.1 en Figuur I.6 in Bijlage I die grafisch het temperatuurverloop toont voor een constructie met en zonder warm-bouwen alsook met een (fictief) equivalent materiaal voor de actieve laag. De schijnbare warmtegeleiding (λ^*) van de actieve laag en daarmee de schijnbare warmteovergangswaarde van de constructie (R_c^*) hangt af van de parameters van warm-bouwen en verschilt per variant.

Tabel 4.1 Hefboom warm-bouwen voor constructie-varianten met verschillende constructie-types en isolatiematerialen

Variant	$F_{WB,dyn;bruto}$	$F_{WB,dyn;netto}$	$F_{WB,dyn;prim}$	$F_{WB,stat;bruto}$	R_c^* m ² K/W
I.0	1,98	1,03	-0,13	2,00	2,44
Equivalent	1,97	2,03	2,11	1,98	2,44

a. R_c^* is de equivalente of schijnbare warmteovergangswaarde van de constructie als gevolg van warm-bouwen.

b. De variant Equivalent geeft voor de variant I.0 de warmteovergangswaarde van de constructie waarbij het effect van warm-bouwen is omgezet naar een materiaal met een equivalente warmtegeleidings-coëfficiënt voor de actieve laag.

Het kleine verschil in de hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ voor de variant I.0 (met warm-bouwen) en de equivalente constructie is het gevolg van het dynamische gedrag van het rekenmodel, van cumulatieve afrondingsfouten in het rekenmodel en van subtiele effecten van de verschillen in temperatuur van de constructie aan weerszijde van de actieve laag. Zowel warm-bouwen als een equivalent materiaal voor de actieve laag leidt tot een hogere gemiddelde temperatuur in de actieve laag. In beide gevallen daalt daarom de warmteovergangsweerstand aan de buitenzijde. Ondanks dat bij een equivalent materiaal de temperatuur van de actieve laag minder daalt dan bij warm-bouwen, daalt de warmteovergangsweerstand juist iets meer.

Door warm-bouwen evenals door meer thermische isolatie neemt de pompenergie voor de centrale (vloer)verwarming af doordat minder ruimteverwarming nodig is. Dit tweede orde effect werkt door in de hefbomen waarin alle benodigde energie is meegenomen inclusief pompenergie. Bij de variant Equivalent is er alleen een extra besparing op pompenergie (en is er geen extra warmte nodig). Hierdoor zijn de hefbomen $F_{WB;dyn;netto}$ en $F_{WB;dyn;prim}$ zelfs groter dan $F_{WB;dyn;bruto}$.

Tabel 4.2 Warmteoverdracht en warmte-weerstand

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_c m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
Zonder warm-bouwen c.q. zonder equivalent materiaal actieve laag					
	0,11	1,24	0,14	10,6	0,0
Met warm-bouwen c.q. met equivalent materiaal actieve laag					
I.0	0,10	2,44	0,26	15,1	+4,4
Equivalent	0,08	2,44	0,26	12,2	+1,5

4.3

Varianten

Alle varianten zijn doorgerekend op basis van het installatieschema volgens Bijlage IV. Een belangrijk onderdeel daarvan is de bodembron. Om de inzet van de warmtepomp te beperken is ondiepe geothermie in de vorm van gesloten bodemlussen van 450 meter toegepast als warmtebron voor alle varianten. Hiermee kunnen temperaturen rond de 17 °C omhoog worden gehaald. Bij de installatietechniek-varianten is ook een meer normale bodemluslengte van 76 meter bekeken met temperaturen rond de 11 °C. Analoot aan de *seasonal performance factor* (SPF) voor de warmtepomp (zie 3.3.2.2) is de SPF voor warm-bouwen als volgt gedefinieerd:

- $SPF_{Totaal} = \text{jaarlijkse warmte voor warm-bouwen } (Q_{WB}) / \text{jaarlijks benodigde elektriciteit voor de warmtepomp en de overige aan warm-bouwen gerelateerde apparaten zoals circulatiepompen } (E_{WB})$.

4.3.1 Constructie-varianten

Twee series constructie-varianten zijn onderzocht. Bij de eerste serie varieert het type constructie (steens, spouw en anderhalf-steens) en het isolatiemateriaal (hout/cellulose, PIR). Bij de tweede serie varieert de isolatiedikte. De variaties leiden tot een verandering in de verhouding in warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag. Deze verhouding heeft invloed op de hefboom. De aanvoertemperatuur naar de actieve laag is afhankelijk van de buitentemperatuur en varieert steeds op dezelfde manier: van 18 °C in de tussenseizoenen tot 16 °C in de winter. Indien de bodem of de zon deze temperatuur niet kan leveren, dan springt de warmtepomp bij. De overige parameters zijn constant gehouden.

4.3.1.1 Variatie in constructietype en thermisch isolatiemateriaal

Tabel 4.3 beschrijft de constructieopbouw onderzochte varianten.

Tabel 4.3 Constructie-opbouw van varianten met constructietypes en isolatiematerialen

I.0	I.1	I.2	I.3	I.4	
steens muur	steens muur	steens muur	spouw muur	1½-steens- muur	
--	--	15 mm steenwol	--	--	
Actieve Laag	Actieve Laag	Actieve Laag	Actieve Laag	Actieve Laag	
40 mm hout/- cellulose	40 mm PIR	40 mm hout/- cellulose	40 mm hout/- cellulose	40 mm hout/- cellulose	
10 mm stuc	10 mm stuc	10 mm stuc	10 mm stuc	10 mm stuc	

Toelichting:

a. De varianten zijn doorgerekend met een aanvoertemperatuur 18-16 °C en een debiet van 0,70 L/s.

De hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ varieert sterk tussen de -0,13 en +1,12 bij deze constructie-varianten. De variatie is groot. Alleen voor variant I.2 en I.4 is de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ groter dan 1. Deze beide varianten hebben gemeen dat de verhouding in thermische isolatie aan weerszijde van de actieve laag meer in balans is: bij variant I.2 door een extra isolatielaag en bij variant I.4 door een dikkere gevel (1½-steens). Zie Tabel 4.4.

De verandering in hefboom tussen variant I.1 en I.4 is opvallend. Het enige verschil tussen beide varianten is de dikte van de muur. Anderzijds verschillen de bijbehorende energiebesparingen voor de centrale verwarming niet significant.

Tabel 4.4 Hefboom warm-bouwen voor constructie-varianten met constructietypes en isolatiematerialen

Variant	$F_{WB,dyn;bruto}$	$F_{WB,dyn;netto}$	$F_{WB,dyn;prim}$	$F_{WB;stat;bruto}$	R_C^* m ² K/W
I.0	1,98	1,03	-0,13	2,00	2,44
I.1	1,57	1,17	0,61	1,59	2,80
I.2	1,52	1,34	1,09	1,53	2,50
I.3	1,84	1,21	0,35	1,87	2,61
I.4	1,56	1,38	1,12	1,58	2,79

Toelichting:

a. R_C^* is de equivalente of schijnbare warmteweerstand van de constructie bij warm-bouwen.

Tabel 4.5 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *zonder* warm-bouwen voor constructie-varianten met constructietypes en isolatiematerialen

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C
I.0	0,11	1,24	0,14	10,6
I.1	0,09	1,79	0,19	9,9
I.2	0,09	1,64	0,17	12,7
I.3	0,10	1,42	0,15	11,7
I.4	0,09	1,79	0,19	13,2

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag.

Tabel 4.6 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *met* warm-bouwen voor constructie-varianten met constructietypes en isolatiematerialen

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C^* m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
I.0	0,10	2,44	0,26	15,1	+4,4
I.1	0,09	2,80	0,29	13,4	+3,5
I.2	0,09	2,50	0,26	15,1	+2,4
I.3	0,09	2,61	0,27	15,4	+3,7
I.4	0,08	2,79	0,29	15,6	+2,4

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag. ΔT_{AL} is de gemiddelde temperatuurstijging van de actieve laag t.o.v. dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

Behalve bij variant I.1 ligt bij de andere varianten de gemiddelde temperatuur van de actieve laag net boven de 15 °C. De temperatuur van de actieve laag wordt bepaald

door de via warm-bouwen toegevoerde warmte en de transmissiewarmte vanuit de aangrenzende ruimte. Bij variant I.1 is de warmteweerstand aan de binnenzijde (40 mm PIR) relatief groot waardoor weinig transmissiewarmte de actieve laag bereikt. Verder is het (ingestelde) maximale vermogen van warm-bouwen beperkt waardoor het *setpoint* voor warm-bouwen niet altijd wordt gehaald in deze situatie.

Ondanks dezelfde temperatuur van de actieve laag verschillen de hefboomen duidelijk, zeker de hefboom $F_{WB,dyn,prim}$. De hoeveelheid warmte voor warm-bouwen speelt daarbij een rol. Bij de varianten I.0, I.1 en I.3 met geringe thermische isolatie aan de buitenzijde van de actieve laag verdwijnt de aan de actieve laag toegevoerde warmte snel naar de omgeving. Daardoor is er meer warmte nodig om de actieve laag op de gewenste temperatuur te houden. Dat betekent meer inzet van de warmtepomp alsook de circulatiepompen en dus meer elektriciteitsverbruik gerelateerd aan warm-bouwen. Vanwege de zeer lage aanvoertemperaturen die nodig zijn is het rendement van de warmtepomp zelf groot, een SPF_{WP} net boven de 11. Gebruikelijke warmtepompconcepten in gebouwen in combinatie met vloerverwarming en de bodem als warmtebron komen niet verder dan een SPF_{WP} van 6,0. Op systeemniveau bekeken valt op dat een grote(re) bijdrage van de warmtepomp tot een lage(re) SPF_{Tot} leidt. De SPF_{Tot} wordt uitgedrukt in relatie tot de (totale) *warm-bouwen* warmte. Een circulatiepomp kan, mits de juiste temperatuur beschikbaar is, energie-efficiënter warmte leveren dan een warmtepomp die de temperatuur eerst nog moet verhogen. De jaarlijkse efficiëntie (SPF_{Tot}) van warm-bouwen varieert daardoor tussen de 8,9 en 15,8 voor deze constructievarianten.

Tabel 4.7 Warm-bouwen, warmtepomp en zonneboiler voor constructie-varianten met constructietypes en isolatiematerialen

Variant	Q_{WB} GJ	P_{WB} kW _{Th}	Voll _{WB} h	E_{WP} GJ	P_{WP} kW _e	Voll _{WP} h	SPF_{WP} -	SPF_{Tot} -	Q_{Zb} GJ	η_{Zb} %
I.0	69,0	11,6	1652	5,65	0,91	1725	11,5	8,9	10,8	26%
I.1	50,4	11,9	1177	1,42	0,91	432	11,7	15,8	10,9	26%
I.2	22,9	5,6	1137	0,16	0,43	105	11,1	12,3	10,3	25%
I.3	41,9	8,2	1418	2,50	0,67	1035	11,2	9,9	10,4	25%
I.4	20,5	4,9	1161	0,14	0,35	107	11,0	11,8	10,1	25%

Toelichting:

a. Voll = vollasturen. SPF = *seasonal performance factor*, WB = warm-bouwen, WP = warmtepomp, Zb = zonneboiler, η_{Zb} is het jaarrendement van de zonnecollector voor warm-bouwen.

Tabel 4.8 toont de (geïnvesteerde) warmte voor warm-bouwen en de absolute besparing in warmtebehoefte (finale energie) voor de bestaande centrale verwarming. De absolute besparing hangt af van het object en de mate (oppervlakte) waarin warm-bouwen is toegepast.

Tabel 4.8 Jaarlijkse energiebesparing centrale verwarming voor constructie-varianten met constructietypes en isolatiematerialen

Variant	Q_{WB} GJ	Q_H GJ	Q_H^* GJ	ΔQ_H GJ
I.0	69,0	60,7	50,3	10,4
I.1	50,4	45,7	40,6	5,0
I.2	22,9	47,2	41,9	5,4
I.3	41,9	49,9	41,1	8,8
I.4	20,5	45,7	40,4	5,3

Toelichting:

a. Q_H = warmtebehoefte centrale verwarming *zonder* warm-bouwen. Q_H^* = warmtebehoefte centrale verwarming *met* warm-bouwen.

Op basis van de resultaten is variant I.2 gekozen als uitgangspunt voor de studie naar de andere parameters. Tabel 4.9 toont, voor de volledigheid, de constructieopbouw van variant I.2 met de extra thermische isolatie aan de buitenzijde van de actieve laag. In het kader van deze studie gaat het uitsluitend om de thermische isolatie en wordt voorbijgegaan aan de (praktische) uitvoering van de constructieopbouw.

Tabel 4.9 Constructieopbouw en kenmerken gevel met warm-bouwen (variant I.2)

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
Steenwol	15	0,41	0,037	16	840
Pleisterlaag (AL)	10	0,01	0,800	1600	840
Hout/cellulose-iso.	40	0,93	0,043	45	1380
Gipsplaat	10	0,01	0,810	1680	840
Totaal	305	1,64			

Toelichting:

- De opbouw is van buiten naar binnen. De actieve laag (AL) van warm-bouwen is opgenomen in de pleisterlaag.
- Alleen het metselwerk is bestaand. De overige materiaallagen zijn gerelateerd aan warm-bouwen.
- R_C is de warmteweerstand (zonder warm-bouwen). λ_{reken} is de rekenwaarde voor de warmtegeleiding. ρ is de soortelijke massa. c is de specifieke warmtecapaciteit.

Hoewel variant I.4 een nog grotere hefboom kent, is deze niet gekozen als uitgangspunt voor de studie naar de andere parameters omdat 1½-steens constructies minder courant zijn in bestaande gebouwen.

4.3.1.2 Variatie in isolatiedikte

Tabel 4.10 beschrijft de constructie-opbouw van de varianten waarbij de isolatiedikte aan de binnenzijde van de actieve laag varieert (25, 40 en 55 mm hout/cellulose). Hierdoor varieert de verhouding in de warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag tussen 0,9 en 1,9 (zie Tabel 4.10).

Tabel 4.10 Constructie-opbouw van de varianten met verschillende diktes van de isolatielaag

	I.5	I.2	I.6		
	steens muur	steens muur	steens muur		
	15 mm steenwol	15 mm steenwol	15 mm steenwol		
	Actieve Laag	Actieve Laag	Actieve Laag		
	25 mm hout/- cellulose	40 mm hout/- cellulose	55 mm hout/- cellulose		
	10 mm stuc	10 mm stuc	10 mm stuc		
$R_{C;i AL}$	0,59	0,94	1,29		
$R_{C;e AL}$	0,69	0,69	0,69		
$R_{C;i AL}/R_{C;e AL}$	0,86	1,37	1,89		

Toelichting:

- De varianten zijn doorgerekend met een aanvoertemperatuur 16-18 °C en een debiet van 0,70 L/s.
- $R_{C;i|AL}$ en $R_{C;e|AL}$ (in m²K/W) zijn de warmteweerstanden van de materiaallagen aan respectievelijk de binnenzijde en de buitenzijde van de actieve laag. De warmteweerstand van de materiaallaag waarin de actieve laag zich bevindt, is buiten beschouwing gelaten ($R_{C;AL} = 0,0125$ m²K/W).

In alle drie de varianten is de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ groter dan 1,0. De equivalente warmteweerstand neemt toe naarmate meer isolatie wordt toegevoegd aan de binnenzijde van de actieve laag. Tegelijkertijd daalt de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$. De variant I.6 presteert op het niveau van primaire energie nog maar 5% beter ten opzichte van dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

Tabel 4.11 Hefboom warm-bouwen voor constructie-varianten met diktes van het isolatie-materiaal

Variant	$F_{WB;dyn;bruto}$	$F_{WB;dyn;netto}$	$F_{WB;dyn;prim}$	$F_{WB;stat;bruto}$	R_c^* m ² K/W
I.5	1,41	1,28	1,10	1,42	1,83
I.2	1,52	1,34	1,09	1,53	2,50
I.6	1,60	1,37	1,05	1,62	3,19

Toelichting:

a. R_C^* is de equivalente of schijnbare warmteweerstand van de constructie als gevolg van warm-bouwen.

De gemiddelde temperatuur van de actieve laag in stand houden is lastiger naarmate meer thermische isolatie is aangebracht aan de binnenzijde en minder transmissiewarmte de actieve laag bereikt vanuit de verwarmde ruimtes grenzend aan de binnenzijde. Warm-bouwen is wel in staat om dit redelijk te compenseren. Wanneer de isolatiedikte aan de binnenzijde toeneemt, neemt ook het temperatuurverschil zonder en met warm-bouwen toe. Met name doordat de temperatuur van de actieve laag sterk daalt bij toename van de thermische isolatie aan de binnenzijde daarvan. De warmteoverdrachtsweerstand aan de binnenzijde ($1/\alpha_i$) neemt toe wanneer de isolatiedikte toeneemt. Dit hangt direct samen met de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ en is nader toegelicht in paragraaf 4.1.2.

Tabel 4.12 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *zonder* warm-bouwen voor constructie-varianten met diktes van de isolatielaag

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C
I.5	0,11	1,30	0,14	13,7
I.2	0,09	1,64	0,17	12,7
I.6	0,09	1,99	0,21	12,0

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag.

Tabel 4.13 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *met* warm-bouwen voor constructie-varianten met diktes van van de isolatielaag

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C^* m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
I.5	0,09	1,83	0,19	15,5	+1,8
I.2	0,09	2,50	0,26	15,1	+2,4
I.6	0,08	3,19	0,33	14,9	+2,9

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag. ΔT_{AL} is de gemiddelde temperatuurstijging van de actieve laag t.o.v. dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

De toename in de isolatiedikte heeft eveneens een toename tot gevolg voor: de benodigde warmte (Q_{WB}), de bijdrage van de warmtepomp (E_{WP}) en de prestatie van het geheel (SPF_{Tot}).

Tabel 4.14 Warm-bouwen, warmtepomp en zonneboiler voor constructie-varianten met diktes van de isolatielaag

Variant	Q_{WB} GJ	P_{WB} kW _{Th}	Voll _{WB} h	E_{WP} GJ	P_{WP} kW _e	Voll _{WP} h	SPF_{WP} -	SPF_{Tot} -	Q_{Zb} GJ	η_{Zb} %
I.5	20,0	4,7	1184	0,15	0,41	103	11,1	10,5	10,2	25%
I.2	22,9	5,6	1137	0,16	0,43	105	11,1	12,3	10,3	25%
I.6	24,6	5,3	1291	0,17	0,44	106	11,2	13,4	10,5	25%

Toelichting:

a. Voll = vollasturen. SPF = *seasonal performance factor*, WB = warm-bouwen, WP = warmtepomp, Zb = zonneboiler, η_{Zb} is het jaarrendement van de zonnecollector voor warm-bouwen.

Tabel 4.15 toont de (geïnvesteerde) warmte voor warm-bouwen en de absolute besparing in warmtebehoefte (finale energie) voor de bestaande centrale verwarming. De absolute besparing hangt af van het object.

Tabel 4.15 Jaarlijkse energiebesparing centrale verwarming voor constructie-varianten met diktes van het isolatiemateriaal

Variant	Q_{WB} GJ	Q_H GJ	Q_H^* GJ	ΔQ_H GJ
I.5	20,0	51,9	46,3	5,6
I.2	22,9	47,2	41,9	5,4
I.6	24,6	44,0	39,2	4,8

Toelichting:

a. Q_H = warmtebehoefte centrale verwarming *zonder* warm-bouwen. Q_H^* = warmtebehoefte centrale verwarming *met* warm-bouwen.

4.3.2 Aanvoertemperatuur-varianten

De warmtestroom van binnen naar buiten blokkeert wanneer het temperatuurverschil tussen binnen en buiten verdwijnt. Daarvoor is een grotere bijdrage nodig van de warmtepomp en meer energieverbruik van de circulatie- en bronpomp. Een hogere aanvoertemperatuur betekent een lager rendement van de warmtepomp en/of een diepere bodembron. Tabel 4.16 vermeldt het ingestelde bereik van de aanvoertemperatuur van de warmtepomp voor de temperatuurvarianten. In het tussenseizoen kan bij voldoende zonaanbod de aanvoertemperatuur ook boven het ingestelde bereik uitkomen. De basis voor de varianten is de constructie met aan weerszijde van de actieve laag thermische isolatie. Bij variant III.3 en III.4 zijn de constructielagen met thermische isolatie verwisseld. Hierdoor wijzigt de verhouding in warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag van warm-bouwen. De verhouding ($R_{C;i|AL} / R_{C;e|AL}$) voor de varianten I.2 en II.1 t/m II.3 is 1,37. Voor de

variant II.4 is deze verhouding 0,35. Feitelijk is dit geen temperatuurvariant maar een constructievariant.

Tabel 4.16 Bereik van de aanvoertemperatuur voor warm-bouwen en beschrijving van de constructieopbouw voor de temperatuur-varianten

I.2	II.1	II.2	II.3	II.4	
18-16 °C	19-17 °C	20-18 °C	21-19 °C	21-19 °C	
Zie II.3	Zie II.3	Zie II.3	steens muur	steens muur	
			15 mm glaswol	40 mm hout/-cellulose	
			Actieve Laag	Actieve Laag	
			40 mm hout/-cellulose	15 mm glaswol	
			10 mm stuc	10 mm stuc	

Toelichting:

a. Alle varianten zijn doorerekend met een debiet van 0,70 L/s.

b. Het temperatuurbereik volgt een stooklijn voor buitentemperaturen 0...15 °C.

Een hogere aanvoertemperatuur leidt tot een sterke afname van de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ door een grotere bijdrage van de warmtepomp en meer energie voor de circulatie- en bronpomp. Een hoge aanvoertemperatuur geeft een hoge equivalente warmteweerstand (R_c^*), tot 7,0 m²K/W. Wanneer beide thermische isolatielagen worden verwisseld met de grootste warmteweerstand, nu aan buitenzijde van de actieve laag (variant II.4), dan komt de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ wel weer boven 1,0.

Tabel 4.17 Hefboom warm-bouwen voor aanvoertemperatuur-varianten

Variant	$F_{WB;dyn;bruto}$	$F_{WB;dyn;netto}$	$F_{WB;dyn;prim}$	$F_{WB;stat;bruto}$	R_c^* m ² K/W
I.2	1,52	1,34	1,09	1,53	2,50
II.1	1,52	1,34	1,08	1,54	2,51
II.2	3,08	1,77	-0,02	3,14	5,06
II.3	4,30	2,21	-0,66	4,41	7,06
II.4	3,82	2,68	1,12	3,91	6,29

Toelichting:

a. R_c^* is de equivalente of schijnbare warmteweerstand van de constructie als gevolg van warm-bouwen.

Opvallend is verder dat een verhoging van 18-16 °C naar 19-17 °C nagenoeg geen effect heeft op de hefboom. Blijkbaar is dit temperatuurbereik ook nog goed af te handelen met alleen warmte uit de bodem en van de zon.

Voor de temperatuur-varianten zouden de warmteweerstanden van de constructie (R_c) hetzelfde moeten zijn met en zonder warm-bouwen. De resultaten, afgerond op twee cijfers achter de komma, laten een klein verschil zien. Dit is het gevolg van cumulatieve afrondfouten van het rekenmodel bij de indirecte bepaling van de warmteweerstand. De warmteweerstand is indirect bepaald via de warmtestromen aan weerszijde van de materiaallagen. Het verschil in warmteovergangsweerstanden aan de binnenzijde ($1/\alpha_i$) is kleiner dan de tabel suggereert. De berekende waarde varieert tussen 0,17488 en 0,17508 m²K/W. De resultaten tonen ook dat als gevolg van de verwisseling van de thermische isolatie, met nu de grootste isolatie aan de buitenzijde, de gemiddelde temperatuur in de actieve laag sterk stijgt.

Met warm-bouwen stijgen de equivalente warmteweerstand en de (equivalente) warmteoverdrachtsweerstand aan de binnenzijde bij een verhoging van de aanvoertemperatuur. Beiden stijgen in gelijke mate. Met warm-bouwen en een bereik voor de aanvoertemperatuur van 21-19 °C loopt de (gemiddelde) temperatuur van de actieve laag op tot rond de 19 °C. Incidenteel kan de temperatuur in de actieve laag zelfs oplopen tot 22-23 °C bij voldoende zoninstraling. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur aan de binnenzijde is (vrijwel) gelijk aan die van de binnenwanden waardoor de stralingsuitwisseling nihil is. In het geval van de varianten II.3 en II.4 ligt de gemiddelde oppervlaktetemperatuur zelfs iets boven die van de inwendige scheidingsconstructies. Dit laat zich via warmtestromen vertalen in een hoge(re) (equivalente) warmteovergangsweerstand.

Tabel 4.18 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *zonder* warm-bouwen voor aanvoertemperatuur-varianten

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_c m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C
I.2	0,09	1,65	0,17	12,7
II.1	0,09	1,65	0,17	12,7
II.2	0,09	1,64	0,17	12,7
II.3	0,09	1,64	0,17	12,7
II.4	0,09	1,65	0,18	16,0

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag.

Tabel 4.19 Warmteoverdracht en warmte-weerstand met warm-bouwen voor aanvoertemperatuur-varianten

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_c^* m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
I.2	0,09	2,50	0,26	15,1	+2,4
II.1	0,08	2,51	0,26	15,1	+2,4
II.2	0,08	5,06	0,52	17,6	+4,9
II.3	0,08	7,06	0,72	18,4	+5,7
II.4	0,07	6,29	0,64	19,3	+3,2

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag. ΔT_{AL} is de gemiddelde temperatuurstijging van de actieve laag t.o.v. dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

Voor zover een hogere aanvoertemperatuur niet kan worden geleverd door de bodem of de zon, springt de warmtepomp bij. Waar de warmtebehoefte voor warm-bouwen tussen variant II.1 en II.3 toeneemt met een factor 2, neemt het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp toe met een factor 25. Bij variant II.4 is dit teruggebracht tot een factor 15. Door de hogere aanvoertemperatuur daalt de *seasonal performance factor* (SPF_{WP}) van de warmtepomp enigszins. Doordat ook het elektriciteitsverbruik voor circulatiepompen en de bronpomp exponentieel toeneemt bij een grotere warmtebehoefte, daalt de totale *seasonal performance factor* nog sneller. Ondanks de betere prestatie van warm-bouwen bij variant II.4 ontstaat toch een lagere SPF_{Tot} . De oorzaak is dat de warmtebehoefte en de bijdrage van de warmtepomp wel duidelijk afnemen maar de benodigde energie voor circulatie- en bronpompen nagenoeg niet.

Tabel 4.20 Warm-bouwen, warmtepomp en zonneboiler voor aanvoertemperatuur-varianten

Variant	Q_{WB} GJ	P_{WB} kW _{Th}	Voll _{WB} h	E_{WP} GJ	P_{WP} kW _e	Voll _{WP} h	SPF_{WP} -	SPF_{Tot} -	Q_{Zb} GJ	η_{Zb} %
I.2	22,9	5,6	1137	0,16	0,43	105	11,1	12,3	10,3	25%
II.1	23,2	5,3	1215	0,19	0,48	110	10,7	12,3	10,5	25%
II.2	45,4	7,4	1703	3,96	0,94	1170	10,2	8,1	10,5	26%
II.3	51,9	7,0	2059	4,80	0,97	1373	9,8	8,0	10,5	26%
II.4	31,1	4,3	2011	2,78	0,70	1104	9,6	7,2	10,1	24%

Toelichting:

a. Voll = vollasturen. SPF = *seasonal performance factor*, WB = warm-bouwen, WP = warmtepomp, Zb = zonneboiler, η_{Zb} is het jaarrendement van de zonnecollector voor warm-bouwen.

Tabel 4.21 toont de (geïnvesteerde) warmte voor warm-bouwen en de absolute besparing in warmtebehoefte (finale energie) voor de bestaande centrale

verwarming. De absolute besparing hangt af van het object en de mate waarin warm-bouwen is toegepast.

Tabel 4.21 Jaarlijkse energiebesparing centrale verwarming voor aanvoertemperatuur-varianten

Variant	Q_{WB} GJ	Q_H GJ	Q_H^* GJ	ΔQ_H GJ
I.2	22,9	47,2	41,9	5,4
II.1	23,2	47,2	41,9	5,4
II.2	45,4	47,2	35,0	12,3
II.3	51,9	47,2	33,0	14,2
II.4	31,1	47,3	32,5	14,7

Toelichting:

a. Q_H = warmtebehoefte centrale verwarming *zonder* warm-bouwen. Q_H^* = warmtebehoefte centrale verwarming *met* warm-bouwen.

4.3.3 Debiet-varianten

De aanvoer van warmte is mede bepalend voor de werking van warm-bouwen. Het transport van warmte geschiedt via watervoerende leidingen in de actieve laag. Het debiet door de watervoerende leidingen is bij voorkeur zo constant mogelijk. In de praktijk is er sprake van een regeling van het debiet die het transport van warmte naar behoefte kan regelen. Wanneer er geen behoefte is aan warmte, dan stopt het warmtetransport om onnodig energieverbruik voor circulatie- en bronpomp te voorkomen. De warmtebehoefte stopt zodra de retourtemperatuur te hoog oploopt. Hoe meer debiet, hoe meer pompenergie nodig is. Dit heeft direct invloed op de *seasonal performance factor* van warm-bouwen. Om die reden is onderzocht wat de invloed is van het instellen van een maximaal debiet. Tabel 4.22 vermeldt de onderzochte maximale debieten van de debiet-varianten.

Tabel 4.22 Waarden voor het maximale totaaldebiet warm-bouwen voor de debiet-varianten

III.3	I.2	III.1	III.2		
0,59 L/s	0,70 L/s	0,82 L/s	0,94 L/s		

Toelichting:

a. Alle varianten zijn doorgerekend met een aanvoertemperatuur van 18-16 °C.

Een toename van het maximale debiet voor warm-bouwen leidt eerst tot een verbetering van de energieprestatie van warm-bouwen en daarna tot een verslechtering. Althans in het hier gekozen bereik voor het maximale debiet. De

hefboom $F_{WB,dyn;prim}$ varieert sterk tussen 0,16 en 1,09. Rond de 0,7 L/s ligt het optimum. Althans voor deze constructie en dit temperatuurbereik.

Tabel 4.23 Hefboom warm-bouwen voor debiet-varianten

Variant	$F_{WB,dyn;bruto}$	$F_{WB,dyn;netto}$	$F_{WB,dyn;prim}$	$F_{WB;stat;bruto}$	R_c^* m ² K/W
III.3	1,76	1,34	0,77	1,78	2,90
I.2	1,52	1,34	1,09	1,53	2,50
III.1	1,51	1,27	0,94	1,52	2,48
III.2	2,10	1,29	0,16	2,14	3,46

Toelichting:

a. R_c^* is de equivalente of schijnbare warmteweerstand van de constructie als gevolg van warm-bouwen.

De constructie voor alle debiet-varianten is hetzelfde. Zonder warm-bouwen is de warmteweerstand dan ook overal hetzelfde. Met warm-bouwen neemt zowel bij het kleinste als het grootste maximale debiet de gemiddelde temperatuur van de actieve laag toe. Bij een klein debiet is inherent daaraan ook de warmte uit de bodem en de zon gering, gegeven de afmetingen van de bodemlus(sen) en de zonnecollector. En dus moet de warmtepomp meer bijdragen aan de warmtebehoefte van warm-bouwen. Bij een groot debiet is inherent de temperatuurval over de distributieleidingen van warm-bouwen klein waardoor de gemiddelde temperatuur van de actieve laag toeneemt. Een hogere gemiddelde temperatuur van de actieve laag blokkeert weliswaar beter de warmtestroom van binnen naar buiten maar geeft ook een groter warmteverlies. En dus moet de warmtepomp meer bijdragen aan de warmtebehoefte van warm-bouwen. Ondanks de hoge COP van een warmtepomp voor warm-bouwentemperaturen is de inzet van een warmtepomp al snel problematisch voor de *seasonal performance factor* van warm-bouwen (SPF_{Tot}). Bovendien vraagt meer debiet ook meer energie van de circulatie- en bronpompen. Weinig debiet heeft dan nog het voordeel dat de energie van de circulatie- en bronpompen ook gering is. Dit is cijfermatig geïllustreerd in Tabel 4.25 en Tabel 4.26.

Tabel 4.24 Warmteoverdracht en warmte-weerstand zonder warm-bouwen voor debiet-varianten

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_c m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C
I.2, III.1-3	0,09	1,64	0,17	12,7

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag.

Tabel 4.25 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *met* warm-bouwen voor debiet-varianten

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C^* m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
III.3	0,08	2,90	0,30	15,8	+3,1
I.2	0,09	2,50	0,26	15,1	+2,4
III.1	0,09	2,48	0,26	15,1	+2,4
III.2	0,08	3,46	0,36	16,5	+3,8

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag. ΔT_{AL} is de gemiddelde temperatuurstijging van de actieve laag t.o.v. dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

Tabel 4.26 Warm-bouwen, warmtepomp en zonneboiler voor debiet-varianten

Variant	Q_{WB} GJ	P_{WB} kW _{Th}	Voll _{WB} h	E_{WP} GJ	P_{WP} kW _e	Voll _{WP} h	SPF_{WP} -	SPF_{Tot} -	Q_{Zb} GJ	η_{Zb} %
III.3	28,7	5,8	1375	1,63	0,79	572	11,0	8,8	10,1	25%
I.2	22,9	5,6	1137	0,16	0,43	105	11,1	12,3	10,3	25%
III.1	22,7	6,1	1034	0,22	0,78	79	11,0	9,6	10,3	25%
III.2	34,8	6,2	1559	2,85	0,90	881	10,8	6,8	10,1	24%

Toelichting:

a. Voll = vollasturen. SPF = *seasonal performance factor*, WB = warm-bouwen, WP = warmtepomp, Zb = zonneboiler, η_{Zb} is het jaarrendement van de zonnecollector voor warm-bouwen.

Tabel 4.27 toont de (geïnvesteerde) warmte voor warm-bouwen en de absolute besparing in warmtebehoefte (finale energie) voor de bestaande centrale verwarming. De absolute besparing hangt af van het object en de mate waarin warm-bouwen is toegepast.

Tabel 4.27 Jaarlijkse energiebesparing centrale verwarming voor debiet-varianten

Variant	Q_{WB} GJ	Q_H GJ	Q_H^* GJ	ΔQ_H GJ
III.3	28,7	47,2	40,0	7,2
I.2	22,9	47,2	41,9	5,4
III.1	22,7	47,2	41,9	5,3
III.2	34,8	47,2	38,1	9,2

Toelichting:

a. Q_H = warmtebehoefte centrale verwarming *zonder* warm-bouwen. Q_H^* = warmtebehoefte centrale verwarming *met* warm-bouwen.

4.3.4 Installatietechniek-varianten

Behalve variabelen als de aanvoertemperatuur, het debiet en de constructieopbouw zelf, is ook onderzocht wat de invloed is van de afzonderlijke warmtebronnen zoals bijvoorbeeld een warmtepomp. Met name het achterwege kunnen laten van een warmtepomp zou ideaal zijn. Tabel 4.28 beschrijft de kenmerken van de installatietechniek-varianten.

Tabel 4.28 Kenmerken installatietechniek-varianten

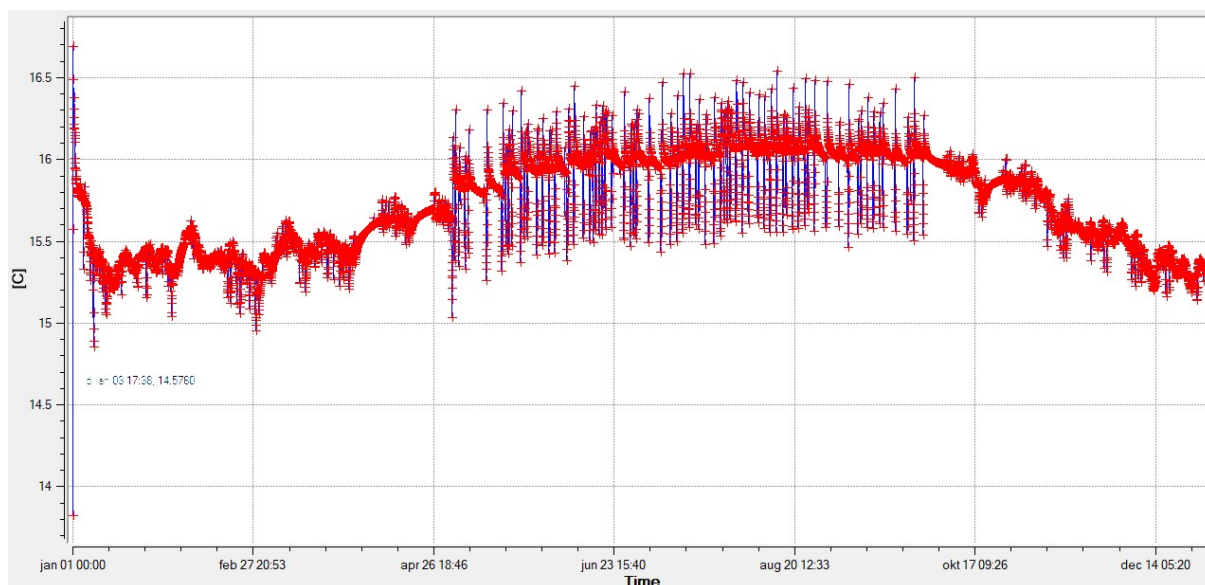
	IV.3	I.2	IV.1	IV.2	
Warmte-pomp	Ja	Ja	Ja	Nee	
Zonne-collector	Ja	Ja	Nee	Nee	
Bodembron	2 x 76 m 0,3 L/s	1 x 450 m 0,5 L/s	1 x 450 m 0,5 L/s	1 x 450 m 0,5 L/s	

Toelichting:

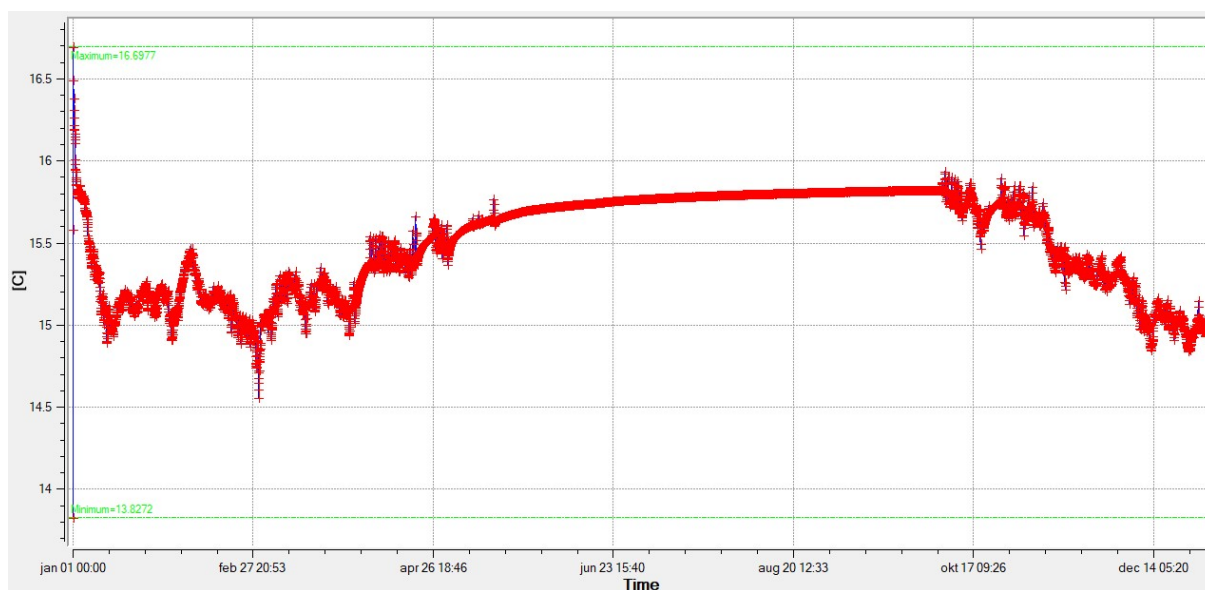
a. Alle varianten zijn doorgerekend met een aanvoertemperatuur van 18-16 °C en een debiet (voor warm-bouwen) van 0,70 L/s.

Bij een ondiepe bron (variant IV.3) leunt warm-bouwen noodgedwongen meer op de warmtepomp vanwege de lagere temperatuur die de ondiepe bron uit de bodem haalt. De grotere inzet van de warmtepomp bij een ondiepe bodembron moet worden bekocht met meer elektriciteitsverbruik waardoor de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ daalt van 1,09 (bij variant I.2) naar 0,58.

Zonder een zonnecollector (variant IV.1) neemt de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ nog sterker af van 1,09 (bij variant I.2) naar 0,35 ondanks de beschikking over een diepe bodembron. Dit is mede het gevolg van meer inzet van de warmtepomp. De directe zonnijdrage (in de tussenseizoenen) ligt in de orde grootte van 3-4 GJ. Minstens net zo belangrijk is de indirecte zonnijdrage die de bodemtemperatuur beter op peil houdt en in de zomer zorgt voor bodemregeneratie. Door de zonnijdrage ligt de gemiddelde bodemtemperatuur hoger (vergelijk Figuur 4.1 en Figuur 4.2) en voorkomt zo (meer) inzet van de warmtepomp. De energieprestatie van warm-bouwen gaat snel onderuit door de inzet van een warmtepomp. Buiten het stookseizoen herstelt de bodem zich sowieso, ook zonder bodemregeneratie. De onderstaande figuren met (gemiddelde) bodemtemperaturen gelden voor het eerste bedrijfsjaar.



Figuur 4.1 Gemiddelde boorgattemperatuur voor variant I.2 (diepe bodembron met bodemregeneratie) in het eerste bedrijfsjaar

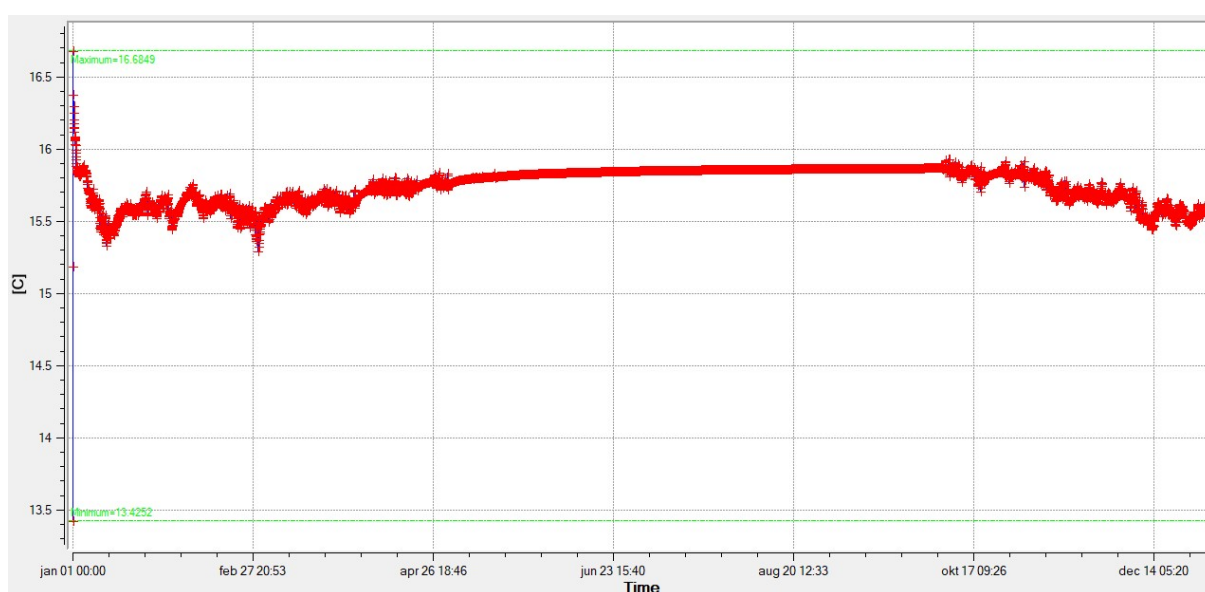


Figuur 4.2 Gemiddelde boorgattemperatuur voor variant IV.1 (diepe bodembron zonder bodemregeneratie) in het eerste bedrijfsjaar

Zonder zonnecollector en zonder warmtepomp is de hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ 1,30 (voor de specifieke situatie). Binnen de onderzochte varianten is dit de hoogste prestatie qua primaire energie: 30% beter dan voor dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

Daar staat tegenover dat de hefboom $F_{WB,dyn;bruto}$ voor de equivalente warmte-weerstand en de energiebesparing redelijk zijn maar niet spectaculair. Variant IV.2 is ook interessant uit het oogpunt van kosten. Minder installatietechniek betekent minder investering en minder onderhoud en beheer.

Zonder warmtepomp blijft de bodemtemperatuur beter op peil (zie Figuur 4.3). Simpelweg omdat er minder warmte wordt onttrokken dan met een warmtepomp. Naast de grotere hefboom $F_{WB,dyn;prim}$ is daardoor ook het gevolg een lagere absolute energiebesparing ΔQ_H voor centrale verwarming (zie Tabel 4.33). De bodemtemperatuur blijft lager dan met bodemregeneratie (zie Figuur 4.1).



Figuur 4.3 Gemiddelde boorgattemperatuur voor variant IV.2 (zonder warmtepomp en zonder bodemregeneratie) in het eerste bedrijfsjaar

Ook de regeling heeft invloed op de energieprestatie van warm-bouwen. Er is een duidelijk verschil in de hefboom $F_{WB,dyn;bruto}$ van de varianten I.2 en IV.3. Dus nog zonder de invloed van de benodigde (primaire) energie van warm-bouwen. Ondanks dat er in beide gevallen sprake is van een warmtepomp die de resterende warmte-behoefte aanvult met dezelfde *setpoints*. En ondanks dat, op het debiet van de bodembron na, de rest van de regeling van de beide varianten identiek is (zie Tabel 4.28). Vermoedelijk werkt de warmtepomp in het hogere deel van het temperatuurbereik waarin de regeling warmtetransport 'toelaat' dan vrije warmte uit de bodem. De warmtepomp wordt vaker ingezet bij een ondiepe dan bij een diepe bodembron.

Tabel 4.29 Hefboom warm-bouwen voor installatietechniek-varianten

Variant	$F_{WB;dyn;bruto}$	$F_{WB;dyn;netto}$	$F_{WB;dyn;prim}$	$F_{WB;stat;bruto}$	R_C^* m ² K/W
IV.3	2,01	1,41	0,58	2,04	3,31
I.2	1,52	1,34	1,09	1,53	2,50
IV.1	1,99	1,30	0,35	2,02	3,27
IV.2	1,69	1,52	1,30	1,71	2,78

Toelichting:

a. R_C^* is de equivalente of schijnbare warmteweerstand van de constructie als gevolg van warm-bouwen.

De constructie voor alle installatietechniek-varianten is hetzelfde. Zonder warm-bouwen is de warmteweerstand dan ook overal hetzelfde. Zie Tabel 4.30.

Tabel 4.30 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *zonder* warm-bouwen voor installatietechniek-varianten

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C
I.2, IV.1-3	0,09	1,64	0,17	12,7

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag.

Tabel 4.31 Warmteoverdracht en warmte-weerstand *met* warm-bouwen voor installatietechniek-varianten

Variant	$1/\alpha_e$ m ² K/W	R_C^* m ² K/W	$1/\alpha_i$ m ² K/W	T_{AL} °C	ΔT_{AL} °C
IV.3	0,08	3,31	0,34	16,3	+3,6
I.2	0,09	2,50	0,26	15,1	+2,4
IV.1	0,08	3,27	0,34	16,3	+3,6
IV.2	0,08	2,78	0,29	15,6	+2,9

Toelichting:

a. T_{AL} is de gemiddelde temperatuur van de actieve laag. ΔT_{AL} is de gemiddelde temperatuurstijging van de actieve laag t.o.v. dezelfde situatie zonder warm-bouwen.

Tabel 4.32 Warm-bouwen, warmtepomp en zonneboiler voor installatietechniek-varianten

Variant	Q_{WB} GJ	P_{WB} kW _{Th}	Voll _{WB} h	E_{WP} GJ	P_{WP} kW _e	Voll _{WP} h	SPF_{WP} -	SPF_{Tot} -	Zb GJ	η_{Zb} %
IV.3	33,4	6,2	1496	2,89	1,06	756	9,9	8,3	10,2	25%
I.2	22,9	5,6	1137	0,16	0,43	105	11,1	12,3	10,3	25%
IV.1	32,7	6,0	1513	2,93	0,52	1568	11,0	7,0	--	--
IV.2	26,9	5,4	1384	--	--	--	--	16,1	--	--

Toelichting:

a. Voll = vollasturen. SPF = *seasonal performance factor*, WB = warm-bouwen, WP = warmtepomp, Zb = zonneboiler, η_{Zb} is het jaarrendement van de zonnecollector voor warm-bouwen.

Tabel 4.33 toont de (geïnvesteerde) warmte voor warm-bouwen en de absolute besparing in warmtebehoefte (finale energie) voor de bestaande centrale verwarming. De absolute besparing hangt af van het object en de mate waarin warm-bouwen is toegepast.

Tabel 4.33 Jaarlijkse energiebesparing centrale verwarming voor installatietechniek-varianten

Variant	Q_{WB} GJ	Q_H GJ	Q_H^* GJ	ΔQ_H GJ
IV.3	33,4	47,2	38,5	8,7
I.2	22,9	47,2	41,9	5,4
IV.1	32,7	47,2	38,6	8,6
IV.2	26,9	47,2	40,3	6,9

Toelichting:

a. Q_H = warmtebehoefte centrale verwarming *zonder* warm-bouwen. Q_H^* = warmtebehoefte centrale verwarming *met* warm-bouwen.

4.4 Invloed binnentemperatuur

De (gemiddelde) ruimtetemperatuur verschilt per ruimte als gevolg van verschillen in interne warmtelasten, zontoetreding en *setpoints* voor de klimaatinstallaties. De hiervoor vermelde hefboomen warm-bouwen van de onderzochte varianten betreffen een gewogen gemiddelde hefboom. De onderstaande tabellen vermelden voor variant I.2, IV.2 en II.4 per ruimte de berekende gemiddelde binnentemperaturen en hefboom $F_{WB,dyn;bruto}$. Hoe lager de binnentemperatuur, hoe hoger de hefboom. *Ceteris paribus*.

Tabel 4.34 Binnentemperatuur en hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ per ruimte voor de representatieve ruimtes voor variant I.2

	Slaap-kamer1	Woon-kamer	Keuken	Hal	Badkamer
$T_{l,i}$	19,0	19,9	19,5	18,9	20,5
$F_{WB;dyn;bruto}$	1,70	1,40	1,66	1,59	1,48

Toelichting:

- De bijbehorende gewogen gemiddelde binnentemperatuur is 19,1 °C en de gewogen gemiddelde hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ is 1,52 op gebouwniveau. De weging is naar oppervlakte van de uitwendige scheidingsconstructies voorzien van warm-bouwen.
- De binnentemperatuur behoort bij de situatie met warm-bouwen.

Tabel 4.35 Binnentemperatuur en hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ per ruimte voor de representatieve ruimtes voor variant IV.2

	Slaap-kamer1	Woon-kamer	Keuken	Hal	Badkamer
$T_{l,i}$	19,0	20,0	19,5	19,0	20,6
$F_{WB;dyn;bruto}$	1,90	1,53	1,85	1,80	1,66

Toelichting:

- De bijbehorende gewogen gemiddelde binnentemperatuur is 19,3 °C en de gewogen gemiddelde hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ is 1,69 op gebouwniveau. De weging is naar oppervlakte van de uitwendige scheidingsconstructies voorzien van warm-bouwen.
- De binnentemperatuur behoort bij de situatie met warm-bouwen.

Wanneer de warm-bouwen temperatuur rond de gemiddelde binnentemperatuur schommelt ontstaan grote hefbomen voor ruimtes met een lage (gemiddelde) binnentemperatuur (slaapkamer1, hal). Dit is het geval bij variant II.4.

Tabel 4.36 Binnentemperatuur en hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ per ruimte voor de representatieve ruimtes voor variant II.4

	Slaap-kamer1	Woon-kamer	Keuken	Hal	Badkamer
$T_{l,i}$	19,2	20,2	19,8	19,6	20,9
$F_{WB;dyn;bruto}$	8,61	2,65	6,22	6,47	3,41

Toelichting:

- De bijbehorende gewogen gemiddelde binnentemperatuur is 19,6 °C en de gewogen gemiddelde hefboom $F_{WB;dyn;bruto}$ is 3,82 op gebouwniveau. De weging is naar oppervlakte van de uitwendige scheidingsconstructies voorzien van warm-bouwen.
- De binnentemperatuur behoort bij de situatie met warm-bouwen.

In theorie is het mogelijk om de temperatuur van warm-bouwen zo te regelen dat er geen temperatuurverschil is tussen de ruimte en de actieve laag van warm-bouwen. In dat geval is de schijnbare warmteweerstand van de uitwendige (dichte) scheidingsconstructie oneindig groot. Daarvoor geldt wel een (relatief) grote warmtebehoefte. Het hangt dan af van de hoeveelheid primaire energie die is gemoeid met de warmteopwekking daarvoor, of deze situatie energetisch beter presteert dan zonder warm-bouwen. Daarnaast blijft er altijd transmissieverlies via de transparante geveldelen die niet kunnen worden voorzien van de techniek van warm-bouwen.

5 Conclusies & aanbevelingen

5.1 Conclusies

De berekeningen en bevindingen leiden tot de volgende conclusies:

- Warm-bouwen is een techniek waarbij voor een uitwendige scheidingsconstructie een schijnbare warmteweerstand wordt behaald die groter is dan de fysiek aanwezige warmteweerstand door het toevoeren van laagwaardige warmte aan de uitwendige scheidingsconstructie.
- Kenmerkend voor warm-bouwen is laagwaardige warmte met een temperatuur *onder* de binnentemperatuur van de ruimte die grenst aan de uitwendige scheidingsconstructie met warm-bouwen.
- Met warm-bouwen is het eenvoudig mogelijk om in een uitwendige scheidingsconstructie gedurende het gehele jaar een temperatuur van minimaal circa 15 °C te behalen. Daarmee kan schade door inwendige condensatie worden voorkomen bij typisch gebruik van gebouwen zonder dat dampdichting nodig is.
- De prestatie van warm-bouwen kan worden uitgedrukt in een hefboom op de fysiek aanwezige warmteweerstand van een uitwendige scheidingsconstructie ($F_{WB;bruto}$). In de hefboom kan ook de (primaire) energie voor de benodigde warmte voor warm-bouwen en de bespaarde warmte voor de ruimteverwarming worden verdisconteerd ($F_{WB;netto}$, $F_{WB;prim}$).
- In de onderzochte situaties worden hefboomen tot 1,3 behaald inclusief verdiscontering van de primaire energie voor de benodigde warmte voor warm-bouwen en de bespaarde warmte voor de ruimteverwarming. Dat betekent dat daar met warm-bouwen tot netto 30% minder primaire energie wordt verbruikt voor de centrale ruimteverwarming in vergelijking met dezelfde situatie zonder warm-bouwen. Dit is bovendien met een eenvoudige uitvoering met alleen een bodembron (450 m) zonder warmtepomp en zonnecollector (voor warm-bouwen).
- De hefboom van warm-bouwen op de fysiek aanwezige warmte-weerstand van een uitwendige scheidingsconstructie wordt bepaald door meerdere factoren die onderling zijn gerelateerd waardoor vuistregels voor warm-bouwen lastig zijn. *Engineering* van warm-bouwen is (nog) onvermijdelijk voor het bepalen van een oplossing met een hefboom groter dan 1 op de besparing van het primaire energieverbruik van het betreffende object.

- Voor een netto besparing op (primaire) energie door warm-bouwen is toch [enige] thermische isolatie nodig. Voor dezelfde energiebesparing is wel minder thermische isolatie(dikte) nodig dan zonder warm-bouwen.
- Diepe(re) bodembronnen (450-500 m) zijn potentieel belangrijke warmte-bronnen voor warm-bouwen vanwege het temperatuurniveau op die dieptes. Over het temperatuurniveau van bodembronnen op deze dieptes is er echter nog onvoldoende nauwkeurigheid en/of zekerheid.
- Het sterke vermoeden is dat warm-bouwen alleen met een diepe(re) bodembron (450-500 m) in staat is om een positieve hefboom op besparing van primaire energie voor ruimteverwarming te bereiken.
- Warm-bouwen kan worden toegepast aan zowel de binnenzijde als de buitenzijde van een bestaande uitwendige scheidingsconstructie. De binnenzijde ligt wel meer voor de hand.
- In het bereik van 25-55 mm isolatiedikte (met $\lambda \approx 0,04$ W/mK) leidt een toename van de isolatiedikte enerzijds tot een toename van de hefbomen $F_{WB,dyn;bruto}$ en $F_{WB,dyn;netto}$ maar anderzijds tot een afname van de hefboom $F_{WB,dyn;prim}$ en de energiebesparing voor de centrale verwarming in vergelijking met dezelfde situatie zonder warm-bouwen.
- Warm-bouwen met temperaturen dicht tegen de binnentemperatuur van de aangrenzende ruimte maakt een (gewogen gemiddelde) hefboom $F_{WB,dyn;bruto}$ van rond de 4 mogelijk. Afhankelijk van met name de binnentemperatuur varieert de hefboom per ruimte $F_{WB,dyn;bruto;i}$ tussen de 2,5 en 8,5.
- Om een hefboom $F_{WB,dyn;prim}$ groter dan 1 te behalen is de constructie-opbouw, in het bijzonder de positie en aard van de thermische isolatie, kritischer naarmate de aanvoertemperatuur voor warm-bouwen dicht tegen de binnentemperatuur ligt. Bij een toename in de aanvoertemperatuur neemt ook de absolute energiebesparing voor de centrale verwarming toe en behoort tot de hoogste binnen dit onderzoek.
- In het bereik van 0,6-1,0 L/s voor warm-bouwen (met $T_{a;WB} \approx 18-16$ °C en voor het onderzochte object) ligt het optimale totale debiet rond de 0,7 L/s voor het onderzochte object. Zowel bij een kleiner als bij een groter debiet neemt de verlangde bijdrage van de warmtepomp toe. Warm-bouwen is gebaat bij lage stroomsnelheden en korte luslengtes voor warm-bouwen.

- De *berekende* warmteoverdracht door convectie en straling bij thermisch geïsoleerde verticale uitwendige scheidingsconstructies ligt significant lager dan de *gebruikelijke* vaste waarden van 25 en 7,7 W/m²K voor respectievelijk de buitenzijde en de binnenzijde van de constructie.

5.2 Aanbevelingen

De berekeningen en bevindingen leiden tot de volgende aanbevelingen:

- Bestudeer meer varianten om scherper de invloed van de vele parameters van warm-bouwen in beeld te brengen. Voor zover de complexiteit te groot blijkt om heldere en/of eenvoudige relaties te bepalen, produceer dan in ieder geval een catalogus van realistische hefboomen voor specifieke randvoorwaarden die in voldoende detail zijn vastgelegd.
- Bestudeer nader en optimaliseer de regeling van warm-bouwen. In het bijzonder waarbij de temperatuur van warm-bouwen voor een specifieke uitwendige scheidingsconstructie is afgestemd op c.q. samen wordt geregeld met de regeling met de binnentemperatuur van de aangrenzende ruimte.
- Monitor met warm-bouwen uitgevoerde bouwprojecten om de gevonden theoretische resultaten te verifiëren en om aandachtspunten voor de uitvoering in beeld te brengen.
- Vergroot de kennis over diepe(re) bodembronnen tot 500 m in relatie tot de techniek van warm-bouwen (bodemtemperatuur, uitvoering, kosten).
- Bepaal de constructieopbouw(en) die een hefboom $F_{WB;dyn;prim}$ ruim groter dan 1 opleveren bij alleen het gebruik van gesloten bodemlussen tot 500 m diep. Wat de beschikbare temperatuur op die diepte ook mag zijn.

BOUWDYNAMICA

Utrecht, 30 juli 2018

ir. A.G. (Antonin) van de Bree

Bijlage I

Temperatuurverloop in de gevel

Temperatuurverloop in de gevel

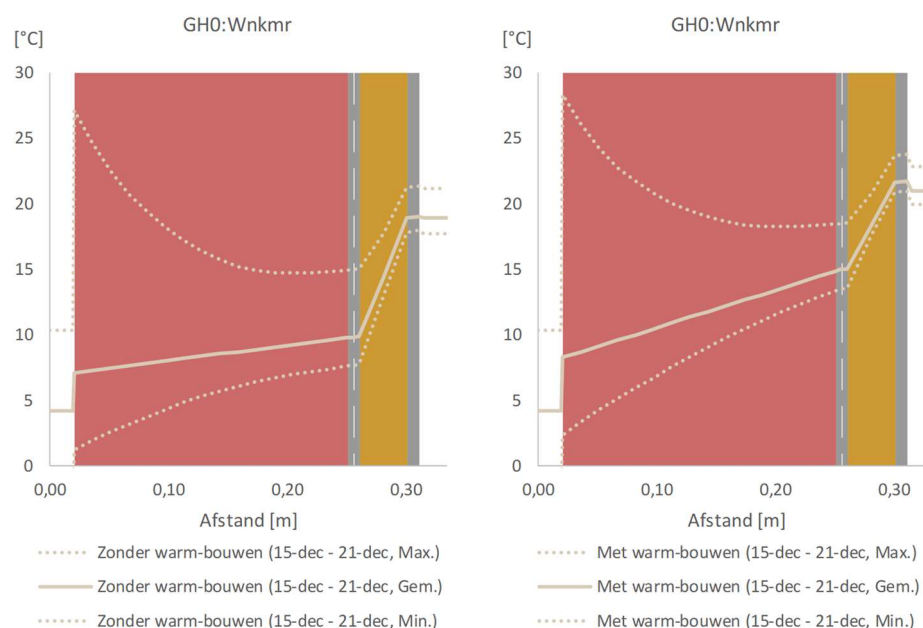
Voor warmtestromen in constructies rekent EnergyPlus met de zogeheten *state space method* waarin zowel de warmteweerstand als de warmtecapaciteit van de constructie zijn meegenomen. Via de *conduction transfer function* (CTF) en gegeven de fysische kenmerken van de materialen van de verschillende constructielagen, volgen de warmtestromen uit de temperaturen aan weerszijde van de constructie. Met de CTF is het mogelijk om de temperaturen aan het *oppervlak* van de constructie te bepalen. Met de CTF is het *niet* mogelijk om het temperatuurverloop *in* de constructie te bepalen. Er wordt (intern) wel gerekend met knooppunten op de grensvlakken van de verschillende materiaallagen in de constructie maar daarvan is geen *output* beschikbaar. Voor het gedrag van de constructie als geheel is dit geen probleem.

Voor inzicht in warm-bouwen is het van belang om ook het temperatuurverloop *in* de constructie zichtbaar te kunnen maken. EnergyPlus kan het temperatuurverloop *in* een constructie in beeld brengen met het *conduction finite difference solution algorithm* (CondFD). Waar bij de CTF (zie hiervoor) de knooppunten alleen liggen op de grensvlakken van de verschillende materiaallagen, liggen bij het CondFD-algoritme de knooppunten ook *binnen* de afzonderlijke materiaallagen.

Het temperatuurverloop *in* een constructie is in beeld gebracht voor een steensmuur met aan de binnenzijde een thermische isolatie van 40 mm hout/cellulose ($\lambda = 0,043 \text{ W/mK}$). Om een duidelijk verschil te krijgen voor de situatie zonder en met warm-bouwen is het (gemiddelde) temperatuurverloop in de constructie bepaald voor een winterweek (15-21 december) van het klimaatreferentiejaar A2-20% uit de NEN 5060.

Figuur I.1 toont het berekende temperatuurverloop in een zuid-georiënteerde steensmuur met binnenisolatie voor een situatie zonder en met warm-bouwen. De gemiddelde temperatuur ter plaatse van de actieve laag van warm-bouwen ligt ongeveer 5 °K hoger dan zonder warm-bouwen. De temperatuurgradiënt tussen de binnenzijde van de constructie en de actieve laag is daardoor geringer en dus is er minder warmtetransmissie van de ruimte naar de actieve laag. Minder warmtetransmissie betekent weer minder warmtebehoefte voor de ruimteverwarming.

Naast energiebesparing voor ruimteverwarming door beperking van het warmteverlies heeft warm-bouwen, net als andere thermische isolatie, ook de potentie om de ruimteverwarming energie-efficiënter te laten werken en/of over te schakelen naar een ander afgiftesysteem voor warmte doordat met warm-bouwen de aanvoertemperatuur kan worden verlaagd.



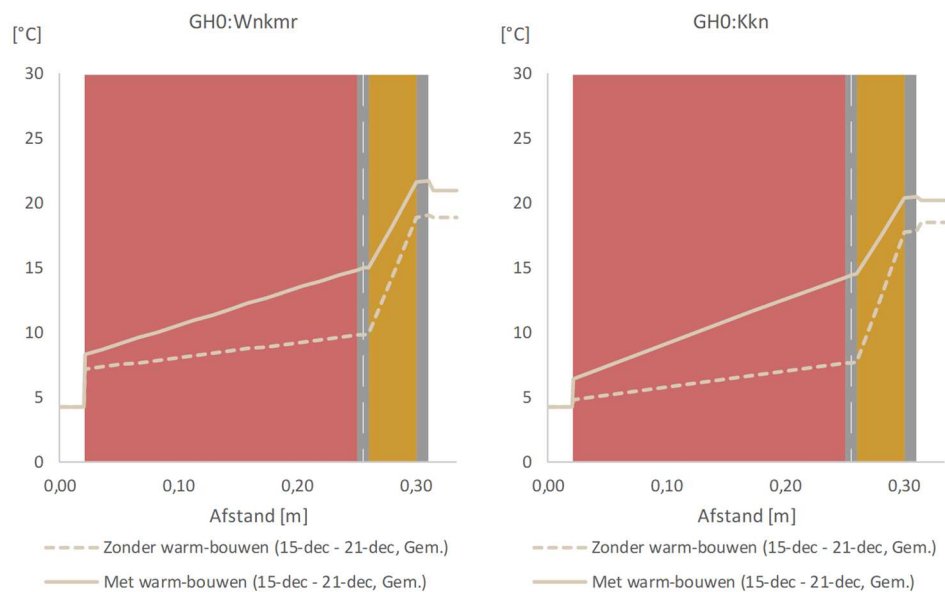
Figuur I.1

Het gemiddelde temperatuurverloop en het temperatuurbereik in een zuid-georiënteerde gevel (thermische isolatie aan de binnenzijde) van een woonkamer voor een winterweek. De buitenluchttemperatuur varieert tussen $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $+10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. De actieve laag van warm-bouwen bevindt zich ter plaatse van de verticale onderbroken lijn. Links is buiten, rechts is binnen.

In beide situaties ligt de gemiddelde oppervlaktetemperatuur aan de *buitenzijde* van de gevel hoger dan de gemiddelde buitenluchttemperatuur. Dit is vooral het gevolg van de zoninstraling op de gevel en de buffering daarvan in de thermische massa van de gevel. De warmtetransmissie vanuit de ruimte en/of de actieve laag naar buiten speelt hierbij ook een rol. Bij warm-bouwen is de temperatuursprong aan het geveloppervlak groter. De verklaring hiervoor is dat de warmtetransmissie naar buiten daar groter is door de grotere temperatuurgradiënt in de gevel (van de actieve laag naar buiten).

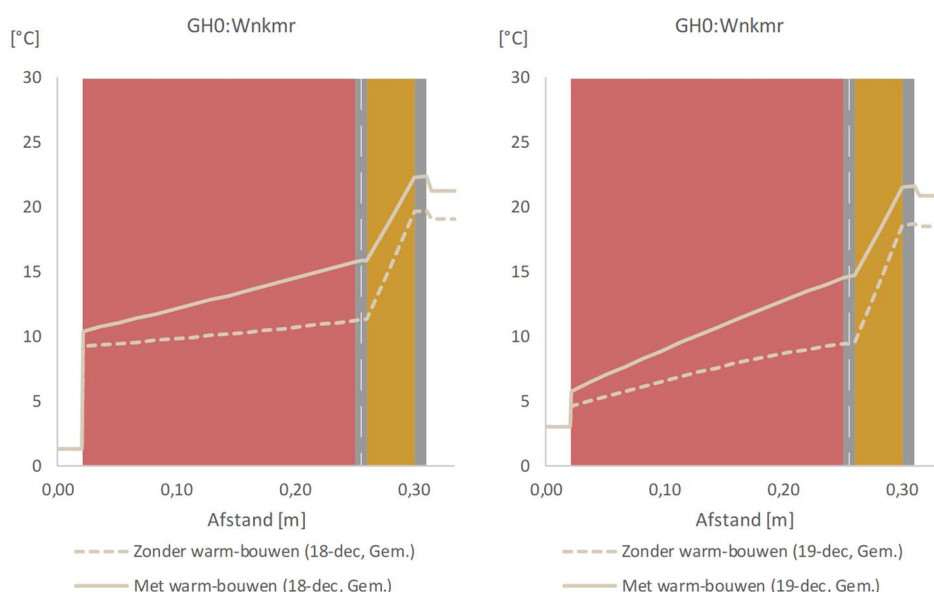
Ook aan de binnenzijde van de gevel is bij de zuid-georiënteerde gevel een (kleine) temperatuursprong te zien aan het oppervlak die wederom sterker is in de situatie met warm-bouwen. Opvallend is dat de gemiddelde oppervlaktetemperatuur en het temperatuurbereik aan de binnenzijde *hoger* ligt dan de binnenluchttemperatuur. Dit is het gevolg van inpandige en externe bronnen (zon via glas) van warmtestraling in de ruimte.

Bij ruimtes die geen of minder invloed van de zon ondervinden is de oppervlakte-temperatuur aan de binnenzijde van de constructie *lager* dan de binnenlucht-temperatuur. Dit is in overeenstemming met de theorie die uitsluitend kijkt naar de luchttemperatuur en niet tegelijkertijd ook naar de invloed van zoninstraling. Figuur I.2 toont het verschil tussen een zuid- en oost-georiënteerde gevel zonder en met warm-bouwen. Bij de situatie met warm-bouwen is de invloed van de zon bij een oost-georiënteerde gevel dusdanig dat de temperatuursprong aan de binnenzijde nog nihil is (in de beschouwde periode).



Figuur I.2 Het gemiddelde temperatuurverloop in een zuidgeoriënteerde gevel van de woonkamer (links) en een oostgeoriënteerde gevel van de keuken (rechts) voor een winterweek voor zowel de situatie zonder en met warm-bouwen. De actieve laag van warm-bouwen bevindt zich ter plaatse van de verticale onderbroken lijn.

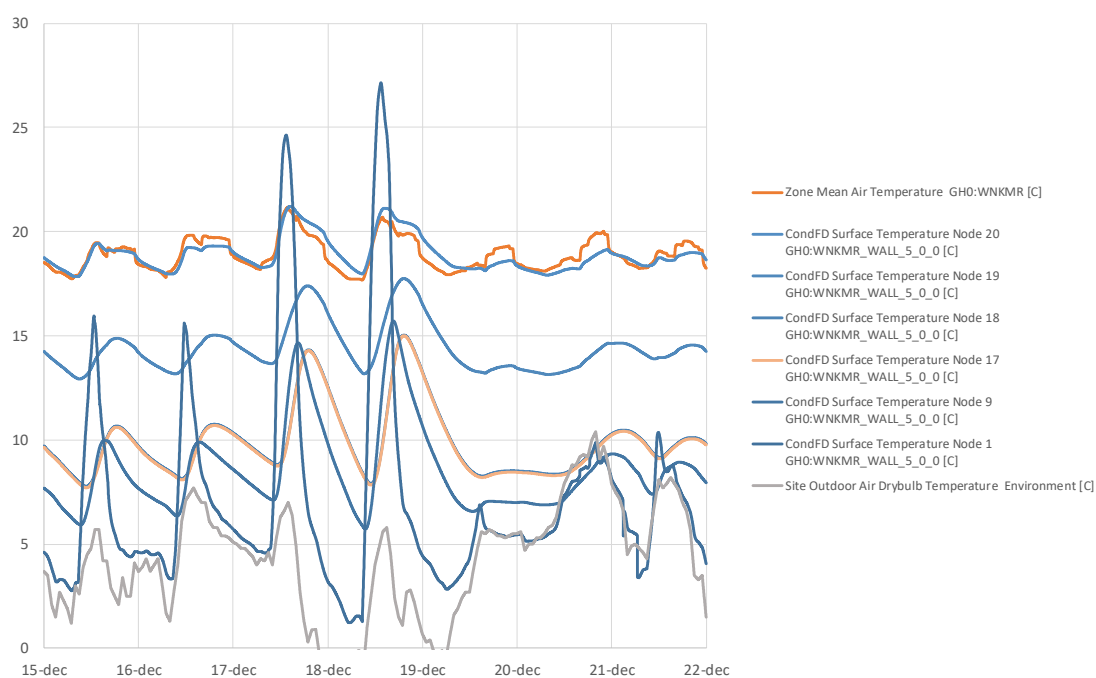
De invloed van de zoninstraling op het temperatuurverloop in de gevel is sterk, ook voor warm-bouwen. Gedurende de beschouwde winterweek zijn er dagen met veel zon (17/18-dec) en met weinig zon (19/20/21-dec). Figuur I.3 toont het gemiddelde temperatuurverloop in de gevel voor een dag met veel en weinig zon. De temperatuurgradiënt aan de binnenzijde van warm-bouwen verandert weinig en daardoor verandert dus ook de warmtebehoefte voor de ruimteverwarming weinig. De invloed van de zon is vooral aan de buitenzijde van de isolatielaag. Daar ontstaat bij veel zoninstraling een duidelijk kleinere temperatuurgradiënt. Dit is het geval voor zowel zonder als met warm-bouwen. Directe zoninstraling werkt in feite hetzelfde als het aanvoeren van warmte aan de actieve laag: het vermindert de warmte-transmissie van binnen naar buiten.



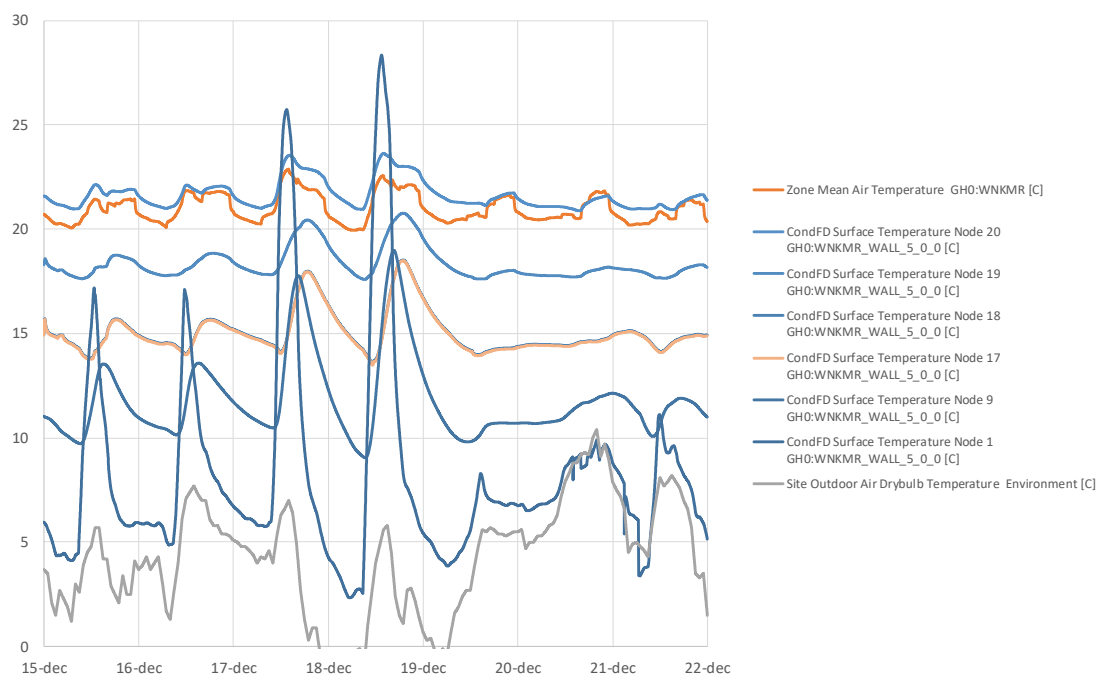
Figuur I.3

Het gemiddelde temperatuurverloop in een zuidgeoriënteerde gevel van de woonkamer gedurende een dag met veel zon (links) en een dag met weinig zon (rechts) in een winterweek voor zowel de situatie zonder en met warm-bouwen. De actieve laag van warm-bouwen bevindt zich ter plaatse van de verticale onderbroken lijn.

De temperatuur op een bepaalde diepte in de gevel is niet constant maar varieert in de tijd afhankelijk van de omstandigheden en de aangevoerde warmte in de gevel. Figuur I.4 en Figuur I.5 tonen het temperatuurverloop voor een winterweek voor de situatie zonder en met warm-bouwen. Als gevolg van warm-bouwen ontstaat ter plaatse van de actieve laag een temperatuursprong. Het temperatuurverloop op verschillende dieptes is aan elkaar gerelateerd. Dieper in de gevel is de fluctuatie in het temperatuurverloop vergelijkbaar maar kleiner en gelijkmatiger. Door de invloed van thermische massa verschuift het temperatuurverloop in de tijd. Dieper in de gevel treden pieken in het temperatuurverloop later op. De invloed van zoninstraling is eveneens herkenbaar. Rond de middag van de eerste vier, zonnige dagen van de beschouwde week zijn scherpe pieken te zien van de oppervlaktetemperatuur aan de buitenzijde van de gevel (knoop 1) die uitschieten boven de buitenluchttemperatuur.



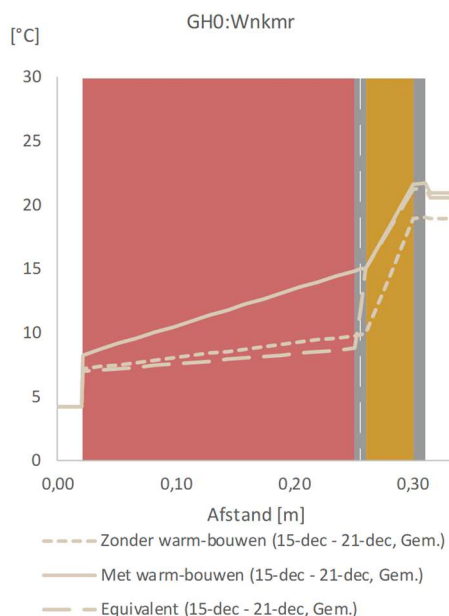
Figuur I.4 Het temperatuurverloop in °C op verschillende dieptes in een zuidgeoriënteerde gevel van de woonkamer in een winterweek voor de situatie zonder warm-bouwen. De actieve laag van warm-bouwen bevindt zich ter plaatse van knoop 17.



Figuur I.5 Het temperatuurverloop in °C op verschillende dieptes in een zuidgeoriënteerde gevel van de woonkamer in een winterweek voor de situatie met warm-bouwen. De actieve laag van warm-bouwen bevindt zich ter plaatse van knoop 17.

Equivalente warmteweerstand actieve laag

De hefboom van warm-bouwen heeft betrekking op de gevelconstructie als geheel. De kenmerken van de constructie zijn namelijk mede bepalend voor de hefboom. Door het effect van warm-bouwen te concentreren in de actieve laag zelf in de vorm van een equivalente warmteweerstand, ontstaat een goed beeld van de werking van warm-bouwen. De definitie van de equivalente warmteweerstand van de actieve laag is: de warmtestroom van de ruimte naar de gevel met equivalente warmteweerstand is hetzelfde als voor de situatie met warm-bouwen. De temperatuurgradiënt in de constructie aan de binnenzijde van de actieve laag bij de equivalente warmteweerstand moet dan gelijk zijn aan de temperatuurgradiënt in de constructie aan de *binnenzijde* van de actieve laag *met* de toepassing van warm-bouwen. Bovendien moet de temperatuurgradiënt in de constructie aan de *buitenzijde* van de actieve laag gelijk zijn aan de situatie *zonder* de toepassing van warm-bouwen. Figuur I.6 toont het temperatuurverloop voor de drie situaties: met en zonder warm-bouwen en een equivalent warmteweerstand (R_m) van $1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$ van de actieve laag. De actieve laag is een denkbeeldig vlak in de constructie met een dikte van nul waardoor de equivalente warmtegeleidingscoëfficiënt ($\lambda_{WB,eq}$) oneindig groot is. Bij een dikte van 10 mm voor de actieve laag, de dikte van de warmtevoerende leidingen, is de equivalente warmtegeleidingscoëfficiënt $0,0088 \text{ W/mK}$.



Figuur I.6 Het temperatuurverloop in °C op verschillende afstanden in een zuidgeoriënteerde gevel van de woonkamer in een winterweek voor de situaties zonder warm-bouwen, met warm-bouwen en met een equivalente warmteweerstand geconcentreerd in de actieve laag van warm-bouwen.

Regeling

Een gestage en continue aanvoer van [laagwaardige] warmte naar de gevel is het basisprincipe van warm-bouwen. Om dit te bereiken zonder (te)veel energieverbruik voor pompen of ongewenste effecten, is een regeling nodig. De volgende regeling is ingesteld voor de variant I.O.

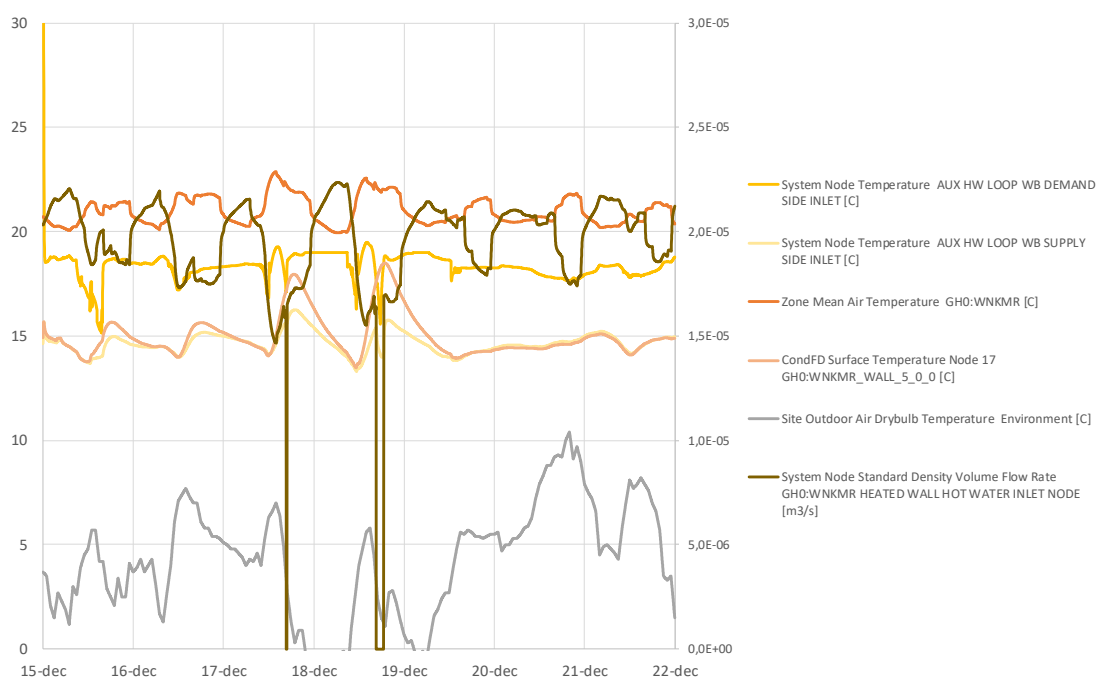
- Stooklijn zonnewarmte: +23 °C (0 °C)...+19 °C (15 °C)
- Stooklijn warmtepomp: +19 °C (0 °C)...+17 °C (15 °C)
- Beschikbaarheid: alleen tijdens het stookseizoen
- Inschakelen: buitentemperatuur < 14 °C
- Uitschakelen: retourtemperatuur > 20 °C
- Temperatuurval: 2...4 °K
- Enige afhankelijkheid van de binnentemperatuur: afname van de binnentemperatuur leidt tot een lichte toename van het debiet voor warm-bouwen om de warmtetransmissie door de gevel enigszins af te remmen.

Door de stooklijn voor zonnewarmte van de zonneboiler iets boven de stooklijn voor (minder energie-efficiënte) bodemwarmte via de warmtepomp te leggen, wordt de beschikbare zonnewarmte (in het stookseizoen) altijd maximaal benut. Zonnewarmte van 23 °C is eigenlijk iets te hoog voor warm-bouwen maar poogt de thermische massa van de gevel actief in te zetten voor een paar uren. Het uitschakelen van de distributiepomp bij een retourtemperatuur van meer dan 20 °C voorkomt dat de gevel teveel opwarmt door zonnewarmte waardoor de binnentemperatuur oploopt boven het daar ingestelde *setpoint*. Dit is vooral het gevolg van directe zoninstraling op de gevel. De zonnewarmte van de zonneboiler kan dan beter worden bewaard voor latere momenten. Nadat het debiet voor warm-bouwen stopt door een te hoge retourtemperatuur, wordt warm-bouwen opnieuw ingeschakeld zodra de buitenluchttemperatuur (weer) onder de 14 °C daalt. In het stookseizoen is dit meestal in de volgende avond of nacht. Door een niet te hoge buitenluchttemperatuur te kiezen voor het opnieuw inschakelen, wordt de thermische massa van de gevel benut –de gevel is relatief warm op het moment dat deze wordt uitgeschakeld door een te hoge retourtemperatuur– en wordt pendelgedrag voorkomen.

De regeling met de bandbreedte van de temperatuurval en de uitschakeling op basis van de retourtemperatuur gelden beiden alleen op systeemniveau. Het gaat daarbij om de gewogen gemiddelde temperaturen van warm-bouwen voor alle ruimtes die daarmee zijn uitgevoerd.

Figuur I.7 toont de gevolgen van de regeling voor een zuid-georiënteerde gevel van de woonkamer in een winterweek. De aanvoertemperatuur voor warm-bouwen ligt tegen de 19 °C conform de stooklijn. De temperatuur in de zonneboiler is eerst (nog)

onvoldoende om daar boven uit te komen maar levert mogelijk wel een bijdrage aan de benodigde warmte. Het restant van de benodigde warmte wordt geleverd door de warmtepomp. Op 17 en 18 december, twee zeer zonnige dagen, komt de aanvoertemperatuur rond de middag boven de 19 °C. Dit impliceert dat de warmte voor warm-bouwen volledig wordt geleverd door de zonneboiler. Het debiet van warm-bouwen vertoont een contra-beweging met de binnentemperatuur als gevolg van de ingestelde afhankelijkheid. De warmtetoevoer stopt zodra, door zoninstraling op de gevel, de temperatuur van de actieve laag groter is dan de aanvoertemperatuur.



Figuur I.7

Het temperatuurverloop in °C op verschillende dieptes in een zuidgeoriënteerde gevel van de woonkamer, de aanvoer- en retourtemperatuur naar de gevel in °C en het bijbehorende debiet in m³/s in een winterweek voor de situatie met warm-bouwen. De actieve laag van warm-bouwen bevindt zich ter plaatse van knoop 17.

Bijlage II

Fysische grondslag van warm-bouwen

Fysische grondslag van warm-bouwen

Het effect van warm-bouwen kan worden beschreven in de vorm van een hefboom F_{WB} op de fysiek aanwezige warmteweerstand R_C van de gebouwschil. Bij een *fysiek* aanwezige warmteweerstand van $1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ voor een bepaalde constructie levert een hefboom met bijvoorbeeld de waarde 2 een *schijnbare* warmteweerstand van $2 \times 1,5 = 3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$. De hefboom warm-bouwen is gebaseerd op het gegeven dat de warmtebehoefte voor ruimteverwarming gelijk is aan de warmteoverdracht van de ruimte naar de gebouwschil (en vandaar verder naar buiten).

Definitie van de hefboom warm-bouwen

De hefboom van warmbouwen F_{WB} voor een constructie C op een bepaald moment t is gedefinieerd als de verhouding tussen de warmteoverdracht per graad Kelvin van de ruimte naar de constructie *zonder* en *met* warm-bouwen. In formulevorm:

$$F_{WB;C;t} = \frac{\alpha_{i;C;t}}{\alpha_{i;C;t}^*}$$

Met:

$F_{WB;C;t}$	Hefboom warm-bouwen voor constructie C op moment t
$\alpha_{i;C;t}$	Warmteoverdracht per graad Kelvin van de binnenruimte naar de gebouwschil voor constructie C op moment t <i>zonder</i> warm-bouwen in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.
$\alpha_{i;C;t}^*$	Warmteoverdracht per graad Kelvin van de binnenruimte naar de gebouwschil voor constructie C op moment t <i>met</i> warm-bouwen in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.
C	Constructie (met specifieke kenmerken).
t	Tijd in s.

In tegenstelling tot de warmtegeleiding of warmteweerstand van materialen die het gevolg is van een (vaste) materiaaleigenschap, is de *schijnbare* warmtegeleiding of warmteweerstand van warm-bouwen een functie van een meerdere variabelen waaronder de temperatuur en het debiet van de aan de constructie toegevoerde warmte. Dit maakt het lastiger om er mee te rekenen en er mee te werken.

De warmteoverdracht per graad Kelvin van een ruimte naar een materiaal of constructie staat bekend als de warmteoverdrachtscoëfficiënt α . In de meeste rekenmodellen voor energie in gebouwen hebben de warmteoverdrachtscoëfficiënten van een constructie een vaste waarde. Voor de buitenzijde van een gevelconstructie wordt vaak $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$) aangehouden en voor de binnenzijde vaak

7,7 W/m²K ($R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$). Voor andere constructies gelden andere (vaste) waarden, mede afhankelijk van de richting van de warmtestroom. Het betreft jaargemiddelde waarden voor matig geïsoleerde (bouwkundige) constructies. De (totale) warmteoverdracht is de som van de warmteoverdracht door convectie α_c , door kortgolvlige straling $\alpha_{s;k}$ en door langgolvlige straling $\alpha_{s;l}$.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_{s;k} + \alpha_{s;l}$$

In werkelijkheid is de warmteoverdracht naar de gebouwschil *niet* constant maar varieert onder de invloed van de zon, de wind, de temperatuur, de warmte-weerstand van de gevel en de kenmerken van de ruimte. En aan de binnenzijde van een constructie kan kortgolvlige straling ook een rol spelen via de binnenkomende zonnestraling en de verlichting.

De invloed van straling kan worden verdisconteerd in een fictieve stralings-luchttemperatuur waarbij (de absorptie van) de straling is verdisconteerd in de buiten-temperatuur. De invloed van straling kan ook worden verdisconteerd door een fictieve gezamenlijk warmteoverdracht door convectie en straling bij de werkelijke luchttemperatuur. Voor de meeste rekenmodellen is dit praktischer omdat die werken met luchttemperatuur en niet met een (fictieve) stralings-luchttemperatuur. In dat geval is de warmteoverdrachtscoëfficiënt als volgt:

$$\alpha = \frac{q_c + q_{s;k} + q_{s;l}}{(T_l - T_s)}$$

Met:

α	Totale warmteoverdracht per graad Kelvin door convectie en straling van de ruimte naar de constructie in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.
q_c	Warmteoverdracht van de ruimte naar de constructie door convectie in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
$q_{s;k}$	Warmteoverdracht van de ruimte naar de constructie door kortgolvlige straling in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
$q_{s;l}$	Warmteoverdracht van de ruimte naar de constructie door langgolvlige straling in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
T_l	Luchttemperatuur in °C.
T_s	Oppervlaktetemperatuur van de constructie in °C.

Het nauwkeurig berekenen van de hefboom warm-bouwen vereist een nauwkeurige bepaling van de som van de warmteoverdracht door convectie, door kortgolvlige straling en door langgolvlige straling.

Voor de leesbaarheid worden hierna de indices voor de constructie (C) en de tijd (t) achterwege gelaten. De hefboom voor warm-bouwen is dan de gewogen gemiddelde hefboom over het stookseizoen c.q. de periode dat warm-bouwen actief is.

Hefboom warm-bouwen bij vaste waarden van warmteweerstand en -overdracht

Om bruikbaar te zijn in (gebruikelijke) rekenmodellen voor energieverbruik in gebouwen met een vaste waarde voor de warmteweerstand van een constructie kan de hefboom voor warm-bouwen als volgt worden geschreven:

$$F_{WB}(T_{a;wb}, \dot{Q}_{wb}, T_{l;i,...}) = \frac{R_C^*(T_{a;wb}, \dot{Q}_{wb}, T_{l;i,...})}{R_C}$$

Waarbij:

$$R_C = \frac{\Delta T_l}{q} - \left(\frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{\alpha_i} \right) = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_{AL}}{\lambda_{AL}} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}$$

en

$$\begin{aligned} R_C^*(T_{a;wb}, \dot{Q}_{wb}, T_{l;i,...}) &= \frac{\Delta T_l}{q^*(T_{a;wb}, \dot{Q}_{wb}, T_{l;i,...})} - \left(\frac{1}{\alpha_e^*} + \frac{1}{\alpha_i^*} \right) \\ &= \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_{AL}}{\lambda_{AL}^*(T_{a;wb}, \dot{Q}_{wb}, T_{l;i,...})} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \end{aligned}$$

Waarbij:

$$\frac{d_n}{\lambda_n} = 2 \cdot \frac{T_{n+1|n} - T_{n|n-1}}{q_{n+1|n} + q_{n|n-1}}$$

Met:

F_{WB}	Hefboom warm-bouwen
R_C	Warmteweerstand van de constructie <i>zonder</i> warm-bouwen in $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.
R_C^*	Warmteweerstand van de constructie <i>met</i> warm-bouwen, al dan niet met verdiscontering van het gerelateerde (primaire) energieverbruik voor (warmte)pompen, regeling, etc., in $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.
α_i, α_e	Warmteoverdrachtscoëfficiënten <i>zonder</i> warm -bouwen in $\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$.
α_i^*, α_e^*	Warmteoverdrachtscoëfficiënten <i>met</i> warm -bouwen in $\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$.
d_n	Dikte van constructielaag n in m.
λ_n	Warmtegeleiding van constructielaag n in $\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$.
$T_{n+1 n}$	Temperatuur grensvlak constructielaag $n+1$ en constructielaag n in $^\circ\text{C}$
$T_{n n-1}$	Temperatuur grensvlak constructielaag n en constructielaag $n-1$ in $^\circ\text{C}$.

$q_{n+1 n}$	Warmtestroom grensvlak constructielaag $n+1$ en constructielaag n in $^{\circ}\text{C}$
$q_{n n-1}$	Warmtestroom grensvlak constructielaag n en constructielaag $n-1$ in $^{\circ}\text{C}$.
ΔT_l	Luchttemperatuurverschil over de constructie in K.
AL	Actieve laag warm-bouwen.
$T_{a,wb}$	Aanvoertemperatuur warm-bouwen in $^{\circ}\text{C}$.
Q_{wb}	Debiet warm-bouwen in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
$T_{l,i}$	Luchttemperatuur van de binnenruimte grenzend aan constructie C in $^{\circ}\text{C}$.
...	Overige variabelen die de hefboom bepalen.

Het effect van warm-bouwen concentreert zich in de actieve laag AL van warm-bouwen. De schijnbare warmtegeleiding λ_{AL}^* van de actieve laag van warm bouwen kan worden gedestilleerd uit de volgende vergelijking. Daarbij is impliciet rekening gehouden met verandering van de warmteoverdrachtscoëfficiënten aan weerszijde van de constructie als gevolg van warm-bouwen.

$$R_C - \frac{d_{AL}}{\lambda_{AL}} = R_C^* - \frac{d_{AL}}{\lambda_{AL}^*}$$

Met:

R_C	Warmteweerstand van de constructie <i>zonder</i> warm-bouwen in $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.
R_C^*	Warmteweerstand van de constructie <i>met</i> warm-bouwen op constructieniveau in $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.
d_{AL}	Dikte van de actieve laag warm-bouwen in m.
λ_{AL}	Warmtegeleiding van de actieve laag warm-bouwen <i>zonder</i> warm-bouwen in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
λ_{AL}^*	Warmtegeleiding van de actieve laag warm-bouwen <i>met</i> warm-bouwen in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnen- en buitenzijde van het oppervlak van een constructie is niet constant. Warm-bouwen heeft invloed op de warmteoverdrachtscoëfficiënten aan weerszijde van een uitwendige scheidingsconstructie. Bij een vaste waarde voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt dit deel van warm-bouwen genegeerd. Hetzelfde geldt overigens voor thermische isolatie. Ook daarbij is de werkelijke warmteoverdracht niet gelijk aan de (huidige) gebruikelijke vaste waarde voor de warmteoverdracht. Bij warm-bouwen kan de warmteoverdracht echter toch verschillen van die van de equivalente warmteweerstand. Dit is het geval bij hogere aanvoertemperaturen naar de actieve laag. Zie 4.3.2.

Vereenvoudigde, statische rekenmodellen rekenen met constante warmteoverdrachtscoëfficiënten (die kunnen verschillen per situatie). Zowel goede

thermische isolatie als warm-bouwen hebben een beduidend kleinere warmte-overdrachtscoëfficiënt aan de binnenzijde ($\alpha_i = 1,3-4 \text{ W/m}^2\text{K}$) dan momenteel wordt aangenomen in statische rekenmodellen ($\alpha_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) voor horizontale warmtestromen van binnen naar buiten. Dan kan als volgt worden gecorrigeerd in de hefboom:

$$F_{WB;stat} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_{e,dyn}^*} - \frac{1}{\alpha_{e,stat}}\right) + R_C^* + \left(\frac{1}{\alpha_{i,dyn}^*} - \frac{1}{\alpha_{i,stat}}\right)}{\left(\frac{1}{\alpha_{e,dyn}} - \frac{1}{\alpha_{e,stat}}\right) + R_C + \left(\frac{1}{\alpha_{i,dyn}} - \frac{1}{\alpha_{i,stat}}\right)}$$

Met:

$F_{WB;stat}$ Hefboom warm-bouwen voor statische rekenmodellen

α Warmteoverdrachtscoëfficiënt in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$:

R_C Warmteweerstand van de constructie in $\text{m}^2\cdot\text{K W}^{-1}$

met indices:

i – binnenzijde; e – buitenzijde; dyn – tijd- en constructieafhankelijke waarde, $stat$ – vaste waarde; $*$ – met warm-bouwen (equivalent)

Het (subtiele) verschil van de dynamische ten opzichte van de statische warmte-overdrachtscoëfficiënt wordt hiermee verdisconteerd in de hefboom (die wordt toegepast op de warmteweerstand van de constructie *zonder* warm-bouwen) bij rekenmodellen met een vaste waarde voor de warmteovergangsweerstanden.

De correctie bestaat deels uit het effect van de equivalente thermische isolatie en deels uit een hogere gemiddelde oppervlaktetemperatuur aan de binnenzijde van de uitwendige scheidingsconstructie(s) dan die van de inwendige scheidingsconstructie(s). Indien dat laatste niet het geval is, dan worden warm-bouwen en equivalente thermische isolatie beiden in dezelfde mate benadeeld door (de aanname van) een vaste waarde voor de warmteoverdracht en is er uit oogpunt van een eerlijk vergelijk geen reden om deze correctie toe te passen.

Verdiscontering van energieverbruik voor (warmte)pompen in de hefboom

De hefboom F_{WB} beschrijft de verhouding in warmteoverdracht op constructieniveau afhankelijk van een aantal variabelen waaronder de temperatuur en het debiet van de aan de actieve laag toegevoerde warmte. De aard van de warmte die moet worden toegevoerd aan de actieve laag is hiervoor *niet* van belang. De aard van de warmte is *wel* van belang om te bepalen of per saldo een energiebesparing kan worden bereikt, in het bijzonder van eindige, fossiele energie. De hefboom is te splitsen in twee delen: i) de warmtestroom *zonder* warmbouwen en ii) de relatieve vermindering hierin *met* warm-bouwen. De hefboom *zonder* warm-bouwen is per

definitie gelijk aan 1. De rest is de bijdrage van of verandering door warm-bouwen ΔF_{WB} .

$$F_{WB} = 1 + \Delta F_{WB}$$

De bijdrage van warm-bouwen aan de vermindering van het warmteverlies voor de ruimtewarming vraagt een investering van energie in warm-bouwen Q_{WB} . In de hefboom warm-bouwen op systeemniveau wordt hiermee als volgt rekening gehouden:

$$F_{WB;syst} = 1 + \Delta F_{WB} \cdot \left(1 - \frac{\frac{Q_{WB}}{SPF_{WB}}}{Q_{H;RV} \cdot \frac{GD^*}{GD} - Q_{H;RV}^*} \right)$$

Met:

$F_{WB;syst}$	Hefboom warm-bouwen op systeemniveau.
ΔF_{WB}	Bijdrage van warm-bouwen aan de beperking van transmissieverlies (naast de energetische prestatie van de constructie zelf hierin).
Q_{WB}	Warmte voor warm-bouwen in J.
$Q_{H;RV}$	Warmte voor ruimteverwarming <i>zonder</i> warm-bouwen in J.
$Q_{H;RV}^*$	Warmte voor ruimteverwarming <i>met</i> warm-bouwen in J.
SPF_{Tot}	<i>Seasonal performance factor</i> warm-bouwen voor (circulatie)pompen en eventuele warmtepomp gerelateerd aan warm-bouwen.
GD	Graaddagen zonder warm-bouwen
GD^*	Graaddagen met warm-bouwen

De graaddagen corrigeren het onvermijdelijk verschil in binnentemperatuur tussen de berekening van de situatie zonder en met warm-bouwen.

Hierbij wordt dan nog geen rekening gehouden 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:

$$F_{WB;syst;P} = 1 + \Delta F_{WB} \cdot \left(1 - \frac{\frac{Q_{WB}}{SPF_{WB}}}{Q_{H;RV} \cdot \frac{GD^*}{GD} - Q_{H;RV}^*} \cdot \frac{PEF_{e,WB}}{PEF_{H;RV}} \right)$$

Met:

$F_{WB;syst;P}$	Hefboom warm-bouwen op systeemniveau en gecorrigeerd voor primaire energiefactoren.
ΔF_{WB}	Bijdrage van warm-bouwen aan de beperking van transmissieverlies (naast

	de energetische prestatie van de constructie zelf hierin).
Q_{WB}	Warmte voor warm-bouwen in J.
$Q_{H;RV}$	Warmte voor ruimteverwarming <i>zonder</i> warm-bouwen in J.
$Q_{H;RV}^*$	Warmte voor ruimteverwarming <i>met</i> warm-bouwen in J.
SPF_{Tot}	<i>Seasonal performance factor</i> warm-bouwen voor (circulatie)pompen en eventuele warmtepomp gerelateerd aan warm-bouwen.
$PEF_{e;WB}$	Primaire energiefactor van elektriciteit (of andere energiedrager(s)) voor (warmte)pomp(en) voor warm-bouwen.
$PEF_{H;RV}$	Primaire energiefactor van energiedrager(s) voor ruimteverwarming.
GD	Graaddagen zonder warm-bouwen
GD^*	Graaddagen met warm-bouwen

In tegenstelling tot de *fysieke* warmteweerstand –een vaste materiaaleigenschap– varieert de *schijnbare* warmteweerstand van warm-bouwen R_c^* in de tijd. Bij een fysieke warmteweerstand variëren het temperatuurverschil en de warmtestroom in de tijd maar steeds in dezelfde verhouding. Althans, wanneer de invloed van thermische massa buiten beschouwing wordt gelaten. Bij warm-bouwen is het in de praktijk lastig voor de installatietechniek om de warmtestroom in dezelfde verhouding te laten meelopen met het temperatuurverschil over de gevel(s).

De actieve laag van warm-bouwen kan aan de binnen- of buitenzijde van de gevel worden aangebracht. Voor een optimale prestatie blijkt een bepaalde verhouding in de warmteweerstand aan weerszijde van de actieve laag van warm-bouwen van belang. Dit kan worden beredeneerd door te kijken naar twee extreme situaties:

- Bij de toepassing van warm-bouwen aan de binnenzijde en zónder deze (extra) warmteweerstand aan de *binnenzijde* van de actieve laag werkt warm-bouwen (eerder) als koeling vanwege de toegepaste temperaturen (18-20 °C). Een ruimteverwarming met een (gebruikelijk) *setpoint* voor de ruimtetemperatuur groter dan 18-20 °C tracht dit te compenseren door meer warmte toe te voeren aan de ruimte, met extra energieverbruik tot gevolg.
- Bij de toepassing van warm-bouwen aan de buitenzijde en zónder deze (extra) warmteweerstand aan de *buitenzijde* van de actieve laag verdwijnt alle warmte vrijwel direct naar de omgeving. Om aan het buitenoppervlak van de gevel de verhoogde temperatuur van de actieve laag te handhaven, is veel vermogen nodig. Dat kan alleen door verhoging van de aanvoertemperatuur en/of vergroting van het debiet. Beide opties leiden tot een stijging van het energieverbruik voor een warmtepomp en/of circulatiepomp.

Aan de zijde van de uitwendige scheidingsconstructie met de actieve laag van warm-bouwen moet altijd ook nog thermische isolatie worden aangebracht.

Bijlage III

Resultatenoverzicht

Resultatenoverzicht

KOVG16016 Ontwikkeling warm-bouwen

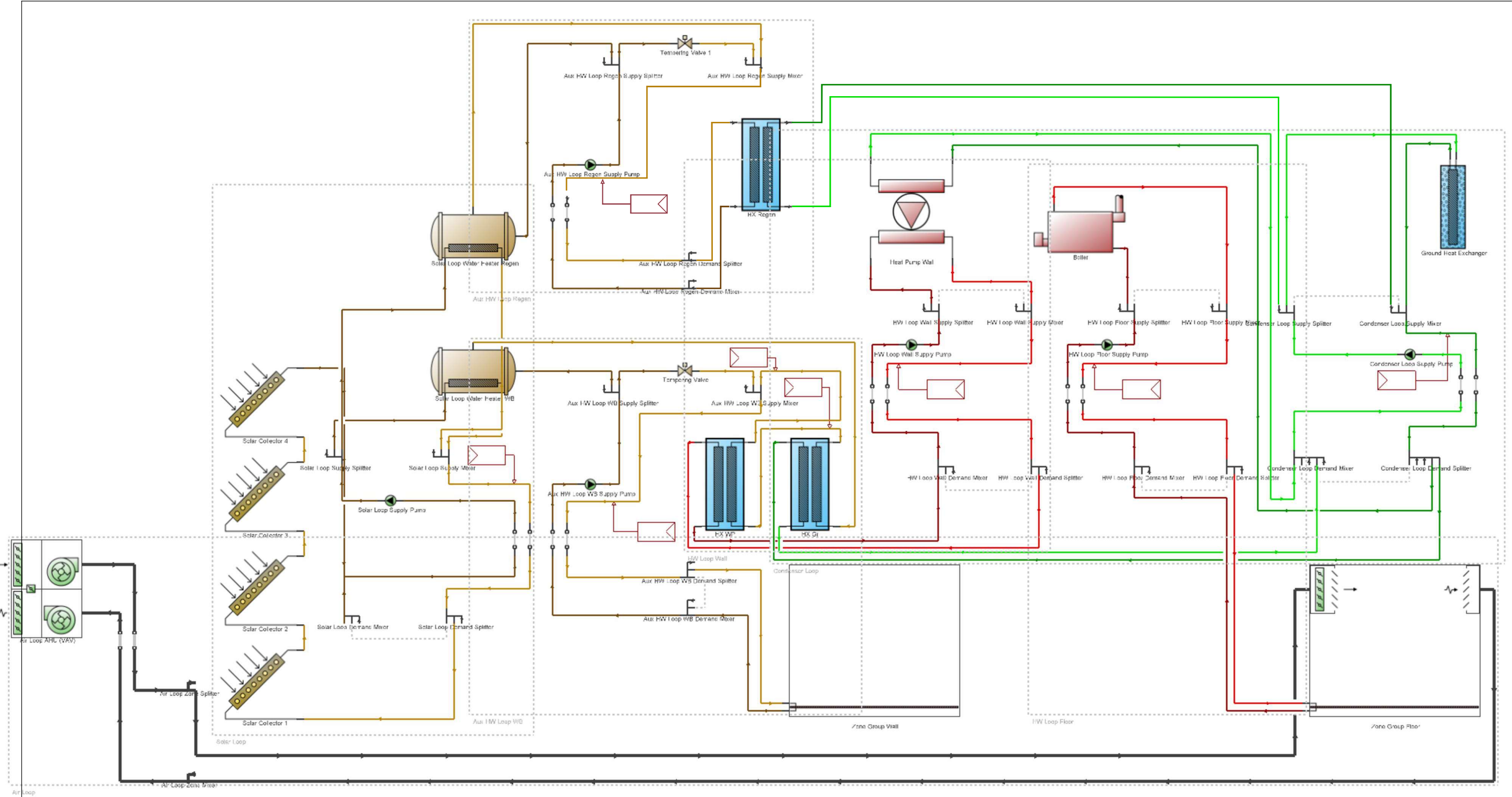
			Warmte					Electriciteit										Overig								
Variant	Omschrijving		Vloer-/radiatorverwarming					Warm-bouwen					Warmtepomp			Ketel	Pompen					SCOP (W.-b.)		Zonnecollector		
			Focus	Rest	Total	Focus	Focus*	Direct	Indirect	Total	Power	Hours	Total	Power	Hours		Zonnec.	WB	Regener.	Vloerv.	Bodem	Total	WP	Total	Total	
			[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GD]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[kW-th]	[h]	[GJ]	[kW-e]	[h]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[GJ]	[-]	[-]	[GJ]	[%]
Rev14	Steensmuur - AL - 40 mm Pavatex (Basisvariant)	Zonder WB	39,8	20,8	60,7	2625	41,3						0,00			0,03	0,02	0,00	0,00	0,94	0,00	0,97				
		Met WB	32,0	18,3	50,3	2721	32,0	4,2	64,7	69,0	11,6	1652	5,65	0,91	1725	0,02	0,04	0,49	0,01	0,64	0,92	2,10	11,5	8,9	10,8	26%
		Δ	7,9	2,5	10,4		9,3			-69,0			-5,65			0,00	-0,01	-0,49	-0,01	0,31	-0,92	-1,13				
Rev14_Eq	Steensmuur - AL (Equivalent) - 40 mm Pavatex	Zonder WB	39,3	21,4	60,7	2625	40,2						0,00			0,03	0,02	0,00	0,00	0,94	0,00	0,97				
		Equivalent	31,1	17,0	48,1	2686	31,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0	0,03	0,02	0,00	0,00	0,48	0,00	0,50	0,0	0,0	7,0	17%
		Δ	8,2	4,4	12,6		9,1			0,0			0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00	0,47				
Rev14_I_1	Steensmuur - AL - 40 mm PIR	Zonder WB	30,1	15,6	45,7	2711	30,6						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,43	0,00	0,45				
		Met WB	26,0	14,6	40,6	2761	26,0	33,9	16,6	50,4	11,9	1177	1,42	0,91	432	0,02	0,04	0,45	0,01	0,34	0,95	1,78	11,7	15,8	10,9	26%
		Δ	4,1	1,0	5,0		4,6			-50,4			-1,42			0,00	-0,02	-0,45	-0,01	0,09	-0,95	-1,33				
Rev14_I_2	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=18-16;	Zonder WB	31,1	16,2	47,2	2702	31,6						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Equivalent	26,9	14,9	41,9	2753	26,9	21,1	1,8	22,9	5,6	1137	0,16	0,43	105	0,02	0,03	0,44	0,01	0,37	0,84	1,70	11,1	12,3	10,3	25%
		Δ	4,1	1,2	5,4		4,7			-22,9			-0,16			0,00	-0,01	-0,44	-0,01	0,11	-0,84	-1,20				
Rev14_I_3	Spouwmuur - AL - 40 mm Pavatex	Zonder WB	31,1	18,8	49,9	2688	32,0						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,55	0,00	0,57				
		Met WB	26,5	14,6	41,1	2764	26,5	14,0	27,9	41,9	8,2	1418	2,50	0,67	1035	0,02	0,03	0,45	0,01	0,38	0,87	1,75	11,2	9,9	10,4	25%
		Δ	4,6	4,2	8,8		5,5			-41,9			-2,50			0,00	-0,01	-0,45	-0,01	0,17	-0,87	-1,17				
Rev14_I_4	1,5-Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex	Zonder WB	30,1	15,6	45,7	2711	30,7						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,43	0,00	0,45				
		Met WB	26,1	14,3	40,4	2762	26,1	19,0	1,5	20,5	4,9	1161	0,14	0,35	107	0,02	0,03	0,43	0,01	0,34	0,78	1,60	11,0	11,8	10,1	25%
		Δ	4,0	1,3	5,3		4,6			-20,5			-0,14			0,00	-0,01	-0,43	-0,01	0,10	-0,78	-1,15				
Rev14_I_5	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 25 mm Pavatex	Zonder WB	33,8	18,1	51,9	2678	34,4						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,62	0,00	0,64				
		Met WB	29,6	16,7	46,3	2729	29,6	18,3	1,7	20,0	4,7	1184	0,15	0,41	103	0,02	0,03	0,43	0,01	0,48	0,80	1,75	11,1	10,5	10,2	25%
		Δ	4,2	1,4	5,6		4,8			-20,0			-0,15			0,00	-0,01	-0,43	-0,01	0,14	-0,80	-1,11				
Rev14_I_6	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 55 mm Pavatex	Zonder WB	29,2	14,9	44,0	2721	29,7						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,39	0,00	0,41				
		Met WB	25,3	13,9	39,2	2769	25,3	22,7	1,9	24,6	5,3	1291	0,17	0,44	106	0,02	0,03	0,44	0,01	0,31	0,87	1,67	11,2	13,4	10,5	25%
		Δ	3,8	1,0	4,8		4,4			-24,6			-0,17			0,00	-0,01	-0,44	-0,01	0,08	-0,87	-1,26				
Rev14_II_1	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=19-17	Zonder WB	31,1	16,2	47,2	2702	31,6						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Met WB	26,9	15,0	41,9	2753	26,9	21,1	2,0	23,2	5,3	1215	0,19	0,48	110	0,02	0,04	0,44	0,01	0,37	0,85	1,70	10,7	12,3	10,5	25%
		Δ	4,1	1,2	5,4		4,7			-23,2			-0,19			0,00	-0,01	-0,44	-0,01	0,11	-0,85	-1,21				
Rev14_II_2	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=20-18	Zonder WB	31,7	15,5	47,2	2702	33,0						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Met WB	23,1	11,8	35,0	2810	23,1	5,1	40,3	45,4	7,4	1703	3,96	0,94	1170	0,02	0,03	0,45	0,01	0,28	0,89	1,67	10,2	8,1	10,5	26%
		Δ	8,6	3,7	12,3		9,8			-45,4			-3,96			0,01	-0,01	-0,45	-0,01	0,20	-0,89	-1,17				
Rev14_II_3	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=21-19	Zonder WB	31,9	15,3	47,2	2702	33,4						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Met WB	22,0	11,0	33,0	2829	22,0	4,8	47,1	51,9	7,0	2059	4,80	0,97	1373	0,02	0,03	0,45	0,01	0,25	0,91	1,65	9,8	8,0	10,5	26%
		Δ	9,9	4,3	14,2		11,4			-51,9			-4,80			0,01	-0,01	-0,45	-0,01	0,22	-0,91	-1,16				
Rev14_II_4	Steensmuur - 40 mm Pavatex - AL - 15 mm glaswol; Ta=21-19	Zonder WB	31,9	15,3	47,3	2702	33,4						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Met WB	22,0	10,5	32,5	2827	22,0	4,4	26,7	31,1	4,3	2011	2,78	0,70	1104	0,02	0,03	0,43	0,01	0,24	0,82	1,54	9,6	7,2	10,1	24%
		Δ	9,9	4,8	14,7		11,4			-31,1			-2,78			0,01	-0,01	-0,43	-0,01	0,23	-0,82	-1,04				
Rev14_III_1	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Q=0,82 L/s	Zonder WB	31,1	16,2	47,2	2702	31,6						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Met WB	26,9	15,0	41,9	2753	26,9	20,3	2,4	22,7	6,1	1034	0,22	0,78	79	0,02	0,03	0,66	0,02	0,37	1,06	2,13	11,0	9,6	10,3	25%
		Δ	4,1	1,2	5,3		4,7			-22,7			-0,22			0,00	-0,01	-0,66	-0,02	0,10	-1,06	-1,64				
Rev14_III_2	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Q=0,94 L/s	Zonder WB	31,4	15,9	47,2	2702	32,3						0,00			0,02	0,02	0,00	0,00	0,47	0,00	0,49				
		Met WB	24,8	13,2	38,1	2782	24,8	4,0	30,7	34,8	6,2	1559	2,85	0,90	881	0,02	0,03	0,97	0,02	0,31	0,93	2,27	10,8	6,8	10,1	24%
		Δ	6,5	2,7	9,2		7,5			-34,8			-2,85			0,00	-0,01	-0,97	-0,02	0,16	-0,93	-1,77				
Rev14_III_3	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Q=0,59 L/s	Zonder WB	31,2	16,0	47,2	27																				

KOVG16016 Ontwikkeling warm-bouwen

Variant	Omschrijving		Binnentemperatuur						Temperatuur (actieve laag)				Warmteweerstand				Dynamisch						Statisch
			Slpkmr1	Wnkmr	Kkn	Hal	Bdkmr	Gebouw	N	O	S	W	1/α _e	R _C	1/α _i		Slpkmr1	Wnkmr	Kkn	Hal	Bdkmr	Total	Total
			[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[m²K/W]	[m²K/W]	[m²K/W]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Rev14	Steensmuur - AL - 40 mm Pavatex (Basisvariant)	Zonder WB	18,4	19,4	19,0	17,9	19,9	18,8	10,0	11,0	11,5	10,2	0,11	1,24	0,14	f-WB-bruto	2,24	1,73	2,18	2,04	1,87	1,98	2,00
		Met WB	18,7	19,7	19,3	18,9	20,6	19,1	14,8	15,2	15,5	14,9	0,10	2,44	0,26	f-WB-netto	0,64	1,44	0,53	1,00	0,49	1,09	
		Δ	0,3	0,3	0,2	1,0	0,6	0,3	4,8	4,2	4,0	4,7				f-WB-prim	-1,56	1,03	-1,73	1,00	-1,40	-0,13	
Rev14_Eq	Steensmuur - AL (Equivalent) - 40 mm Pavatex	Zonder WB	18,4	19,4	19,0	17,9	19,9	18,8	10,0	11,0	11,5	10,2	0,11	1,24	0,14	f-WB-bruto	1,91	2,00	1,99	1,86	2,06	1,97	1,98
		Equivalent	18,6	19,6	19,2	18,7	20,0	19,0	11,6	12,4	12,8	11,8	0,08	2,44	0,26	f-WB-netto	1,91	2,00	1,99	1,00	2,06	2,03	
		Δ	0,2	0,2	0,2	0,8	0,0	0,2	1,6	1,5	1,3	1,6				f-WB-prim	1,91	2,00	1,99	1,00	2,06	2,11	
Rev14_I_1	Steensmuur - AL - 40 mm PIR	Zonder WB	18,8	19,8	19,4	18,4	20,2	19,2	9,2	10,2	11,0	9,5	0,09	1,79	0,19	f-WB-bruto	1,69	1,46	1,67	1,56	1,52	1,57	1,59
		Met WB	19,0	20,0	19,5	18,9	20,5	19,3	13,0	13,5	14,0	13,2	0,09	2,80	0,29	f-WB-netto	0,91	1,32	0,91	1,00	0,76	1,17	
		Δ	0,2	0,2	0,1	0,5	0,3	0,1	3,8	3,3	3,0	3,7				f-WB-prim	-0,17	1,13	-0,13	1,00	-0,30	0,61	
Rev14_I_2	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=18-16;	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,65	0,17	f-WB-bruto	1,70	1,40	1,66	1,59	1,48	1,52	1,53
		Equivalent	19,0	19,9	19,5	18,9	20,5	19,3	14,9	15,2	15,5	15,0	0,09	2,50	0,26	f-WB-netto	1,33	1,34	1,30	1,00	1,16	1,34	
		Δ	0,2	0,1	0,1	0,5	0,3	0,2	2,7	2,3	2,2	2,6				f-WB-prim	0,82	1,26	0,81	1,00	0,73	1,09	
Rev14_I_3	Spouwmuur - AL - 40 mm Pavatex	Zonder WB	18,7	19,7	19,3	18,2	20,2	19,1	11,2	12,0	12,4	11,4	0,10	1,42	0,15	f-WB-bruto	2,09	1,66	2,02	1,93	1,76	1,84	1,87
		Met WB	19,0	20,0	19,5	18,9	20,7	19,3	15,2	15,5	15,8	15,3	0,09	2,61	0,27	f-WB-netto	1,00	1,44	0,95	1,00	0,40	1,21	
		Δ	0,2	0,2	0,2	0,8	0,5	0,3	4,0	3,5	3,4	3,9				f-WB-prim	-0,49	1,15	-0,53	1,00	-1,46	0,35	
Rev14_I_4	1,5-Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex	Zonder WB	18,8	19,8	19,4	18,4	20,2	19,2	12,8	13,5	13,7	12,9	0,09	1,79	0,19	f-WB-bruto	1,77	1,43	1,72	1,64	1,53	1,56	1,58
		Met WB	19,0	20,0	19,5	19,0	20,6	19,3	15,4	15,7	15,9	15,5	0,08	2,79	0,29	f-WB-netto	1,38	1,37	1,34	1,00	1,19	1,38	
		Δ	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	0,2	2,6	2,2	2,2	2,5				f-WB-prim	0,84	1,29	0,82	1,00	0,73	1,12	
Rev14_I_5	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 25 mm Pavatex	Zonder WB	18,7	19,7	19,2	18,0	20,2	19,0	13,4	14,0	14,0	13,5	0,11	1,30	0,14	f-WB-bruto	1,59	1,27	1,54	1,54	1,36	1,41	1,42
		Met WB	18,9	19,9	19,4	18,6	20,5	19,2	15,3	15,6	15,8	15,4	0,09	1,83	0,19	f-WB-netto	1,33	1,24	1,29	1,00	1,16	1,28	
		Δ	0,2	0,1	0,1	0,6	0,3	0,2	1,9	1,6	1,8	1,9				f-WB-prim	0,97	1,19	0,95	1,00	0,88	1,10	
Rev14_I_6	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 55 mm Pavatex	Zonder WB	18,9	19,8	19,4	18,5	20,2	19,2	11,4	12,3	12,7	11,6	0,09	1,99	0,21	f-WB-bruto	1,78	1,48	1,75	1,63	1,57	1,60	1,62
		Met WB	19,0	20,0	19,5	19,0	20,6	19,4	14,6	14,9	15,2	14,7	0,08	3,19	0,33	f-WB-netto	1,28	1,41	1,27	1,00	1,11	1,37	
		Δ	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	0,1	3,2	2,7	2,6	3,1				f-WB-prim	0,60	1,30	0,61	1,00	0,49	1,05	
Rev14_II_1	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=19-17	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,65	0,17	f-WB-bruto	1,71	1,40	1,67	1,59	1,48	1,52	1,54
		Met WB	19,0	19,9	19,5	18,9	20,5	19,3	14,9	15,2	15,5	15,0	0,08	2,51	0,26	f-WB-netto	1,32	1,34	1,30	1,00	1,16	1,34	
		Δ	0,2	0,1	0,1	0,5	0,3	0,2	2,7	2,3	2,3	2,6				f-WB-prim	0,79	1,26	0,79	1,00	0,71	1,08	
Rev14_II_2	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=20-18	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,64	0,17	f-WB-bruto	4,04	2,58	3,76	3,53	2,93	3,08	3,14
		Met WB	19,2	20,1	19,7	19,4	20,8	19,5	17,5	17,7	17,9	17,5	0,08	5,06	0,52	f-WB-netto	1,21	2,15	0,79	1,00	0,98	1,77	
		Δ	0,4	0,3	0,4	1,1	0,6	0,4	5,3	4,7	4,6	5,1				f-WB-prim	-2,69	1,57	-3,30	1,00	-1,72	-0,02	
Rev14_II_3	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Ta=21-19	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,64	0,17	f-WB-bruto	6,53	3,40	5,80	5,32	4,01	4,30	4,41
		Met WB	19,2	20,2	19,8	19,6	20,9	19,6	18,2	18,4	18,5	18,3	0,08	7,06	0,72	f-WB-netto	1,31	2,74	0,47	1,00	0,99	2,21	
		Δ	0,4	0,4	0,5	1,2	0,7	0,5	6,0	5,4	5,3	5,9				f-WB-prim	-5,87	1,85	-6,87	1,00	-3,16	-0,66	
Rev14_II_4	Steensmuur - 40 mm Pavatex - AL - 15 mm glaswol; Ta=21-19	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	15,9	16,3	15,9	15,9	0,09	1,65	0,18	f-WB-bruto	8,61	2,65	6,22	6,47	3,41	3,82	3,91
		Met WB	19,2	20,2	19,8	19,6	20,9	19,6	19,2	19,3	19,4	19,2	0,07	6,29	0,64	f-WB-netto	3,97	2,39	2,47	1,00	1,90	2,68	
		Δ	0,5	0,4	0,5	1,3	0,7	0,5	3,3	3,0	3,4	3,3				f-WB-prim	-2,42	2,03	-2,70	1,00	-0,17	1,12	
Rev14_III_1	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Q=0,82 L/s	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,65	0,17	f-WB-bruto	1,69	1,38	1,65	1,58	1,47	1,51	1,52
		Met WB	19,0	19,9	19,5	18,9	20,5	19,3	14,8	15,2	15,4	14,9	0,09	2,48	0,26	f-WB-netto	1,18	1,31	1,17	1,00	1,04	1,27	
		Δ	0,2	0,1	0,1	0,5	0,3	0,2	2,6	2,2	2,2	2,6				f-WB-prim	0,49	1,21	0,50	1,00	0,45	0,94	
Rev14_III_2	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Q=0,94 L/s	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,64	0,17	f-WB-bruto	2,49	1,85	2,41	2,28	2,05	2,10	2,14
		Met WB	19,0	20,0	19,6	19,1	20,7	19,4	16,3	16,6	16,8	16,4	0,08	3,46	0,36	f-WB-netto	0,86	1,59	0,70	1,00	0,72	1,29	
		Δ	0,3	0,2	0,3	0,8	0,5	0,3	4,1	3,6	3,5	4,0				f-WB-prim	-1,38	1,22	-1,64	1,00	-1,11	0,16	
Rev14_III_3	Steensmuur - 15 mm glaswol - AL - 40 mm Pavatex; Q=0,59 L/s	Zonder WB	18,8	19,8	19,3	18,3	20,2	19,1	12,2	13,0	13,2	12,4	0,09	1,64	0,17	f-WB-bruto	2,01	1,59	1,95	1,87	1,70	1,76	1,78
		Met WB	19,0	20,0	19,5	19,0	20,6	19,4	15,6	15,9	16,1	15,7	0,08	2,90	0,30	f-WB-netto	1,17	1,46	1,11	1,00	1,02	1,34	
		Δ	0,2	0,2	0,2	0,7	0,4	0,2															

Bijlage IV

Installatieschema



Ontwikkeling warm-bouwen

Principeschema warm-bouwen met ondersteuning door zonnecollector en warmtepomp

BOUWDYNAMICA



Veilingstraat 147
3521 BE Utrecht
06-1670 4029
info@bouwdynamica.nl

Get.	Datum 02-02-2018
Status	

Schaal	Projectnr.	Fase	Tekeningnr.
-	16016	VO	-