

Effecten van Gesloten Bodemenergiesystemen

Werkpakket 3

Energiebalans en Rendement

© 2013 Groenholland BV

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van Groenholland BV.

Voor rapportages betreffende in opdracht uitgevoerde werkzaamheden wordt voor de rechten en plichten van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden van Groenholland BV, zoals vermeld op de achterzijde van het voorblad van de offerte.

Projectnummer: GHNL EFF 13650
Uitgebracht aan: -
Opdrachtnummer: -
Datum: 16/09/2013

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING.....	1
1.1	Werpakket 3 – Energiebalans en rendement.....	2
1.2	Achtergrond.....	2
1.2.1	Interactie tussen bodemenergiesystemen, energiebalans en rendement.....	3
1.2.2	Regelgeving.....	4
1.3	Referentiesystemen.....	4
2	REKENMETHODE.....	6
2.1	Definitie rendement en berekeningswijze	6
2.2	Berekenen besparingen.....	8
2.3	Opwekrendement en emissiefactoren.....	8
3	Resultaten	10
3.1	Effecten op bodemtemperatuur	10
4	CONCLUSIES.....	21
4.1	Wat is het cumulatieve effect van vele kleine gesloten systemen op de bodemtemperatuur?	21
4.2	Bij hoeveel procent energiebalans werkt het systeem naar behoren?	21
4.3	Welke invloed hebben de energiebalans en rendementsverliezen op de CO2 uitstoot?	21
4.4	Wat is de natuurlijke regeneratie van de bodem?.....	22
4.5	Wat zijn de meerkosten om een energiebalans te realiseren?	22

1 INLEIDING

Bodemenergiesystemen worden toegepast bij het verwarmen en koelen van gebouwen, waarbij ze de bodem als bron of buffer van warmte en koude gebruiken. Een goed functionerend bodemenergiesysteem bespaart een significante hoeveelheid energie en levert daarmee een wezenlijke bijdrage aan het verminderen van primair energieverbruik en emissie van broeikasgas (CO₂).

Bodemenergiesystemen kunnen worden ingedeeld in systemen die grondwater actief verpompen (open systemen, WKO systemen) en systemen die de bodem gebruiken door middel van een gesloten bodemwarmtewisselaarsysteem (gesloten systemen, BWV systemen). Bij gesloten bodemenergiesystemen wordt warmte in de bodem getransporteerd door geleiding als gevolg van temperatuurverschillen. Diepte geothermie, waarbij warmte op grote diepte wordt gewonnen voor directe verwarming of elektriciteitsproductie, vallen niet onder het begrip bodemenergiesysteem.

Een gesloten bodemenergiesysteem bestaat uit één of meerdere warmtewisselaars die in de bodem zijn aangebracht, meestal in een verticale boring. De warmtewisselaar is een kunststof leiding waardoor een vloeistof naar beneden en weer naar boven stroomt. Wanneer de vloeistof die door de warmtewisselaar stroomt kouder is dan de omringende bodem dan wordt warmte uit de bodem opgenomen (verwarmingsbedrijf), wanneer de vloeistof warmer is dan de bodem dan wordt warmte afgestaan (koelbedrijf). De temperaturen waarbij het gesloten bodemenergiesysteem functioneert liggen tussen de ± -3 °C en $+30$ °C (AMvB Bodemenergie). In verwarmingsbedrijf wordt een warmtepomp ingezet om de temperatuur geschikt te maken voor verwarming. In koelbedrijf kan direct gekoeld worden met het water uit het bodemenergiesysteem (passieve koeling) maar indien nodig ook met tussenkomst van de warmtepomp (mechanische koeling).

De ontwikkeling én de toepassing van gesloten (bodemenergie)systemen heeft de afgelopen 20 jaar een grote vlucht genomen. Naar schatting zijn anno 2011 zo'n 40.000 bodemwarmtewisselaars¹ in Nederland in de bodem aangebracht. Het succes van gesloten systemen kan verklaard worden door de behaalde energiebesparing, lange levensduur, en de technisch robuustheid.

De bodem wordt gezien als een belangrijke hulpbron, onder andere voor de drinkwatervoorziening maar ook als bron van koude². Bij het gebruik van de bodem voor bodemenergiesystemen zijn in het verleden verschillende vragen en mogelijke milieueffecten geïdentificeerd³.

Het onderzoek "Effecten van gesloten bodemenergiesystemen" heeft als doel de belangrijkste vragen technisch te onderzoeken. De doelstelling van het onderzoek is het inzichtelijk maken van de effecten van grootschalige toepassing van gesloten systemen. In een workshop gehouden bij IF Technology (14 november 2011) zijn vragen geselecteerd die op korte termijn

¹ Het CBS becijferde het aantal gesloten lussen op 31 december 2007 op 22.682 (Bron: Duurzame Energie in Nederland, 2007). Op basis van een jaarlijkse groei van circa 5.000 lussen in de periode 2005 - 2007 bedraagt het aantal lussen op dit moment bijna 40.000. Een lus bestaat uit één boring; een bouwwerk kan meerdere lussen bevatten.

² Technische Commissie Bodem, Advies duurzaam gebruik bodem voor WKO. A050 (2009).

³ MER studie Nesseland, Milieu-effecten van grootschalige toepassing van warmtepompen (Ingenieursbureau Rotterdam, 1997); 'Beleidsaanbevelingen voor de duurzame toepassing van bodemenergie' (Projectgroep 'Bodem als energiebron en -buffer' (BEB), 2003)

beantwoord moeten worden vanwege de inwerkingtreding van de AMvB Bodemenergie in 2013.

Deze vragen zijn verdeeld in de volgende werkpakketten:

1. Positieve effecten
2. Gebruik medium in bodemlussen
3. Energiebalans en rendement
4. Interferentie open en gesloten systemen
5. Buiten gebruikstelling
6. Effecten doorboren kleilagen

1.1 Werpakket 3 – Energiebalans en rendement

In werkpakket 3 wordt ingegaan op de effecten van energiebalans. De energiebalans is gedefinieerd als: de verhouding tussen warmtevraag en koudevraag⁴. Bij gesloten bodemenergiesystemen is er vaak sprake van een onbalans in energievraag, met name in de woningbouw worden gesloten bodemenergiesystemen toegepast voor verwarming en is de koelvraag beperkt. De bodem koelt dan op termijn af. De kernvraag gesteld in het onderzoeksvoorstel is:

Hoe beïnvloedt een grootschalige toepassing van gesloten systemen de opwarming en afkoeling van de bodem en het rendement? Waarbij grootschalig ook gelezen kan worden als 'meerdere kleine systemen bij elkaar'.

Bij dit onderwerp zijn de volgende subvragen geformuleerd:

1. *Wat is het cumulatieve effect van vele kleine gesloten systemen op de bodemtemperatuur?*
2. *Bij hoeveel procent energiebalans werkt het systeem naar behoren?*
3. *Welke invloed hebben de energiebalans en rendementsverliezen op de CO₂ uitstoot?*
4. *Wat is de natuurlijke regeneratie van de bodem?*
5. *Wat zijn de meerkosten om een energiebalans te realiseren?*

Het doel van het beantwoorden van deze subvragen is handvaten aan te reiken voor het beoordelen van toekomstige vergunningaanvragen door het bevoegd gezag.

1.2 Achtergrond

Een gesloten bodemenergiesysteem bestaat uit tenminste één, maar vaak meerdere, bodemwarmtewisselaars die in boorgaten worden ingebouwd. De diepte varieert over het algemeen van 50 – 150 meter. Het warmtetransport bij deze systemen is door warmtegeleiding (warmtestroom door temperatuurverschillen), waarbij warmte van hoge naar lage temperatuur stroomt. Bij verwarmingsbedrijf stroomt warmte naar de bodemwarmtewisselaar toe en bij koelbedrijf er vanaf. Omdat de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem relatief laag is, is de warmtestroom in de bodem normaal gesproken kleiner dan de snelheid waarmee de warmte door het bodemenergiesysteem wordt onttrokken of wordt opgeslagen. Hierdoor verandert de

⁴ Dit is de energiebalans aan de gebouwszijde, niet aan de bodemzijde. De energiebalans aan de gebouwszijde is als uitgangspunt gekozen omdat de energiebalans aan de bodemzijde niet constant is maar afhangt van het rendement en daarmee van hoe het bodemenergiesysteem functioneert.

temperatuur in de bodem rondom de bodemwarmtewisselaars. Afhankelijk van de energiebalans zal de temperatuur op de lange termijn (bijvoorbeeld 25 - 50 jaar) afnemen, toenemen of – gemiddeld – gelijk blijven.

Naast de temperatuurontwikkeling in het bodemenergiesysteem op de lange termijn is er ook sprake van een temperatuureffect op korte termijn, tijdens het verwarmings- of koelseizoen. Gedurende de periode dat warmte aan de bodem onttrokken wordt zal de bodem lokaal rond de bodemwarmtewisselaars afkoelen. Bij koelbedrijf zal de bodem lokaal juist opwarmen. Het feit dat de temperatuur die uit het gesloten bodemenergiesysteem komt niet constant is, maar afhangt van het gebruik, maakt het ontwerp van deze systemen complexer en kan de hoeveelheid leverbare warmte of koude beperken.

Het gesloten bodemenergiesysteem koppelt de bodem aan het gebouw. De temperatuur die de bodem levert wordt daarbij omgezet in een voor het gebouw nuttige temperatuur door een warmtepomp. De warmtepomp (een compressiemachine, vergelijkbaar met een koelkast) verhoogt de temperatuur aan de verdamperkant tot een hogere temperatuur aan de condensorzijde. Een van de meest bepalende factoren voor het rendement van de warmtepomp is het temperatuurverschil tussen verdamper en condensor. In de winter wordt de verdamper aan de bodem gekoppeld en de condensor aan het gebouw (waar warmte wordt geleverd). In de zomer kan de werking van de warmtepomp worden omgekeerd, de verdamper onttrekt dan warmte aan het gebouw (anders gezegd: levert koude) en de condensorwarmte wordt in de bodem opgeslagen.

Daarnaast kan ook koude uit het bodemcircuit direct gebruikt worden voor het leveren van koeling. Deze passieve koeling, waar het rendement alleen afhangt van de noodzakelijke circulatiepompenergie, is mogelijk tot een temperatuur uit het bodemcircuit van ± 18 °C.

1.2.1 Interactie tussen bodemenergiesystemen, energiebalans en rendement

Bij het ontwerp van gesloten bodemenergiesystemen wordt een bepaalde minimum en maximum temperatuur van het circuliatiemedium als randvoorwaarde genomen. De AMvB Bodemenergie stelt hier grenzen aan: De laagste aanvoertemperatuur van het circuliatiemedium mag niet lager worden dan -3 °C en niet hoger dan 30 °C. De ontwerper berekent, op basis van het energievraagpatroon en andere gegevens waaronder de gekozen temperatuurgrenzen, de omvang (aantal, diepte, tussenafstand e.d.) van het bodemenergiesysteem. Bij grotere projecten zullen de (deel)-projecten vaak onafhankelijk van elkaar ontworpen zijn en wordt geen rekening met de omliggende systemen gehouden.

Bij kleine systemen (één of enkele bodemwarmtewisselaars) zal het totale geactiveerde (of benutte) bodemvolume in de tijd toenemen en is er veel uitwisseling met de wijde omgeving mogelijk. Bij systemen met meerdere bodemwarmtewisselaars zullen de bodemwarmtewisselaars elkaar gaan beïnvloeden, omdat de thermische invloedsgebieden overlappen. Alhoewel de temperatuurverandering op grotere afstand van een bodemwarmtewisselaar klein is, is het totale effect van vele individuele systemen in een gebied groot, omdat alle individuele effecten opgeteld moeten worden. Hierdoor verandert de temperatuur in het geactiveerde bodemvolume sterk. Aangezien het rendement en daarmee de energiebesparingen en CO₂-emissies van de temperatuur afhankelijk zijn kan dit grote consequenties voor de werking van het systeem hebben. Wanneer de temperaturen in de individuele systemen teveel beïnvloed worden zal het systeem zelfs niet meer kunnen functioneren.

In dit werkpakket wordt het functioneren van verschillende referentiesystemen onderzocht, met name voor wat betreft effecten van energiebalans. Tevens wordt de hersteltijd van de bodemtemperatuur als functie van omvang van het systeem en energiebalans onderzocht. Indien de hoeveelheid warmte die aan de bodem teruggelieferd moet worden groter is dan de koelbehoefte van het gebouw is een extra opweksysteem nodig. In deze studie wordt globaal bepaald wat de extra investeringskosten van een opweksysteem zijn.

Het rendement in deze studie is gedefinieerd conform de AMvB Bodemenergie (zie ook werkpakket 0, referentietypen). Dit is de SPF (Seizoens Prestatie Factor, de verhouding tussen nuttig geleverde energie en verbruikte hulpenergie) waarbij de energie van de warmtepompcompressor en de circulatiepomp van het bodemcircuit worden meegeteld (SPF_{v2}, SPF_{k0} en SPF_{k2}). Bij passief koelbedrijf is alleen de energie van de circulatiepomp van belang. Een uitgebreide beschrijving van de gevolgde methode is in werkpakket 0 (referentietypen) gegeven.

1.2.2 Regelgeving

De vraagstelling in werkpakket 3 houdt verband met twee belangrijke aspecten van de AMvB Bodemenergie:

- a) De eis met betrekking tot energiebalans. De AMvB Bodemenergie beoogt met name opwarming van de bodem te voorkomen, een afkoeling wordt niet als negatief effect aangemerkt (zolang er in de bodem geen temperaturen onder de 0 °C optreden).
- b) De voorwaarde met betrekking tot het voorkomen van negatieve interferentie: systemen mogen elkaar niet zodanig beïnvloeden dat het doelmatig functioneren van het bodemenergiesysteem in het geding is. De energiebalans van het bodemenergiesysteem bepaalt mede het thermische interferentiegebied.

Naast de formele regels zoals gesteld in de AMvB Bodemenergie is het belangrijk inzicht te krijgen in hoe het rendement van warmtepompen in combinatie met bodemwarmtewisselaarsystemen, in verschillende realistische situaties, afhangt van energiebalans en van de schaal van toepassing (totaal aantal systemen op een bepaalde locatie). Voor de AMvB Bodemenergie is een vereenvoudigde methode ontwikkeld om vast te stellen of er sprake kan zijn van negatieve interferentie tussen systemen (Groenholland 2011⁵). Deze methode is echter niet bedoeld om nauwkeurig de effecten op het rendement te bepalen.

1.3 Referentiesystemen

Om het effect van energiebalans te kunnen bepalen moet eerst worden bepaald wat de energievraag is, wat het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem moet zijn en met welk rendement (Seizoens Prestatie Factor) dit systeem gaat functioneren. In werkpakket 0 (Referentietypen) zijn deze berekeningen uitgevoerd voor verschillende gebruikstypen. De resultaten zijn in tabel 1 samengevat.

Voor de referentietypen woningbouw (1 t/m 5) is de totale verwarmingsvraag gesplitst in een energievraag voor ruimteverwarming en tapwaterbereiding. Omdat de temperatuur voor deze functies verschilt (35 °C voor ruimteverwarming en 55 °C voor tapwaterbereiding) heeft dit een belangrijk effect op het rendement. Voor de referentietypen utiliteit is de tapwatervraag verwaarloosd.

Voor de studie naar de effecten van energiebalans zijn de totale hoeveelheden aan de bodem teruggeleverde warmte (koelvraag gebouwszijde) arbitrair gevarieerd. Voor de referentiescenario's met passieve koeling is in de berekeningen wel de temperatuurgrens van 18 °C, waarboven geen koeling meer aan het gebouw geleverd kan worden, gehandhaafd. Dat houdt in dat de werkelijke hoeveelheid gerealiseerde warmte-teruglevering kleiner kan zijn. Voor de scenario's 6 en 7 (utiliteit) wordt in de rekenmethode automatisch tussen passieve en mechanische koelvraag geschakeld, de van te voren gekozen koelvraag (warmte-teruglevering aan de bodem) wordt dan altijd gerealiseerd.

⁵ Bron: Ministerie van I&M, 2011. Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen. Rapport GHNL 011103.

De koelvraag is voor alle referentietypen berekend met alleen passieve koeling. Het rendement is dan hoog, maar de totale hoeveelheid koelenergie die geleverd kan worden is mogelijk beperkt door de maximale brontemperatuur waarbij passieve koeling geleverd kan worden. Voor de utiliteit zijn in scenario 6b en 7b ook berekeningen met mechanische koeling uitgevoerd. Dan wordt wel de totale koelvraag geleverd, maar is het rendement lager omdat de warmtepomp actief ingezet wordt.

Met deze referentiesystemen zijn verschillende berekening uitgevoerd:

- Elk referentiesysteem is doorgerekend met verschillende verhoudingen in de energiebalans. Hierbij is de koelvraag steeds gewijzigd: 0% van de warmtevraag, 30%, 60%, 90%, 120% en 150%. Hoewel een overschot aan warmte bodemzijdig niet is toegestaan, kan dit tijdelijk (volgens de AMvB Bodemenergie moet tenminste eens per vijf jaar een volledige energiebalans gerealiseerd worden) wel voorkomen. Om de effecten op de globale temperatuur in het door de bodemwarmtewisselaars geactiveerde bodemvolume waar de te bepalen zijn de berekeningen met warmteoverschot uitgevoerd.
- Met het referentiesysteem 2 (klein woningbouwproject) is berekend wat de noodzakelijke energiebalans is om het rendement en temperatuurlimiet te behalen bij opschalen van het systeem. Het referentiesysteem is daarbij opgeschaald van 10 woningen naar 1280 woningen. De omvang van het bodemwarmtewisselaarsysteem per woning is daarbij niet aangepast. Deze berekeningen simuleren daarmee het opschalen van een project zonder het oorspronkelijke ontwerp aan te passen.

Tabel 1. Basisontwerp bodemwarmtewisselaarsystemen. Warmte (V) en koude (K) vraag, aantal individuele bodemwarmtewisselaar (n), diepte van de bodemwarmtewisselaars (H), totale lengte systeem (TL), SPF – inclusief pompenergie - bij verwarmings en koelbedrijf. Voor overige randvoorwaarden wordt verwezen naar werkpakket 0.

No	Omschrijving	V	K	n	H	TL	V	K
		MWh	MWh				SPF	SPF
1a	Enkele woning	10	0	2	108	216	3,87	-
1b	Enkele woning	10	3	2	103	206	3,89	139,9
2	Klein woningbouwproject	50	15	9	110	990	3,55	112,2
3	Gemiddeld wb project	500	150	121	122	14762	3,79	152,2
4	Groot wb project	1000	300	255	123	31365	3,84	178,9
5	Zeer groot wb project	2000	1200	625	115	71875	3,94	272,2
6a	Kleine utiliteit PK	100	30	16	123	1968	4,33	161,9
6b	Kleine utiliteit	100	84	12	130,7	1568,9	4,64	5,71
7a	Grote utiliteit PK	300	90	56	143,4	8030,4	4,44	197,4
7b	Grote utiliteit	300	237	36	133,5	4806	4,70	5,62

2 REKENMETHODE

De basismethode voor de effectenberekening nodig voor deelvragen 1, 2 en 3 is gebaseerd op het programma DST (Duct Ground Heat Storage Model⁶). Met dit model zijn de effecten op het rendement, temperatuur van de vloeistof in de bodemwarmtewisselaar en effect op de gemiddelde bodemtemperatuur in het bodemwarmtewisselaarsysteem (geactiveerde bodemvolume) berekend.

Voor elk scenario zijn de effecten met DST berekend waarbij de hoeveelheid koeling of regeneratie (warmtetoevoer naar de bodem) is gevarieerd: in het geheel geen warmtetoevoer naar de bodem, 30%, 60%, 90%, 120% en 150% van de warmtevraag als koelvraag aan het systeem opleggen. Het betreft steeds de balans in warmte- en koelvraag aan de afgiftezijde. De netto energiebalans aan de bodem is afhankelijk van het rendement gedurende verwarmings- en koelvraag, en daarmee van de temperatuur. Deze varieert tijdens de berekeningen en kan niet vast worden ingesteld.

Voor de scenario's 1 t/m 5 kan alleen passieve koeling geleverd worden. In de praktijk betekent dit dat niet in alle gevallen de totale koelvraag geleverd wordt en de effectieve energiebalans kleiner is dan de opgegeven energiebalans. Dit is het geval in de berekeningen waar de warmtetoevoer naar de bodem groter is dan de warmteonttrekking. In scenario 6 en scenario 7 wordt mechanische koeling toegepast, hier wordt de opgegeven energievraag altijd gerealiseerd.

Een tweede effectberekening is uitgevoerd door een scenario (scenario 3) op te schalen. In dit scenario bestond het bodemwarmtewisselaarsysteem oorspronkelijk uit 10 warmtewisselaars. De omvang van dit systeem is opgeschaald door dit aantal (en de bijbehorende warmtevraag) telkens te verdubbelen tot een totale omvang van 1280 individuele bodemwarmtewisselaars. De totale warmtevraag neemt daarbij toe van 50 MWh tot 6400 MWh. Vervolgens zijn steeds het rendement en de minimumtemperatuur in het systeem berekend. Hieruit is dan berekend hoeveel regeneratie nodig is om de temperatuur in het bodemwarmtewisselaarsysteem weer op het niveau van het gestelde temperatuurcriterium te brengen.

2.1 Definitie rendement en berekeningswijze

Bij het bepalen van het rendement spelen er twee hoofdvragen:

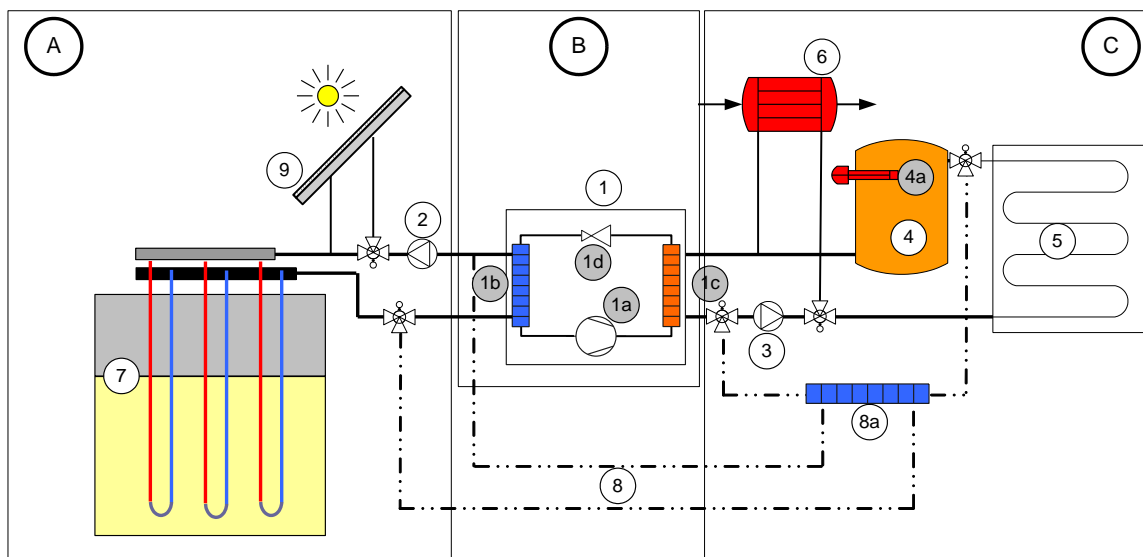
- 1) Waar leggen we de systeemgrens
- 2) Hoe berekenen we het rendement

In de studie "Bepalen van het energetische rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem"⁷ is een overzicht gegeven van de diverse mogelijke systeemgrenzen die aangehouden kunnen worden voor het rendement. Daarin is vooral wezenlijk welke energieverbruikers (compressor van de warmtepomp, circulatiepomp) worden meegewogen. Uiteindelijk is het rendement van het bodemenergiesysteem gedefinieerd op basis van de compressorenergie en energie van de bronpomp (figuur 1, onderdelen 1a [compressor] en 2 [bronpomp]).

⁶ Hellström, G. 1989. Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, University of Lund (Sweden).

⁷ Ministerie van I&M, 2012 Bepalen van het energetisch rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem. Rapport GHNL 012002.

Figuur 1. Schematische weergave bodemenergiesysteem (A), warmtepompssysteem (B) en afgiftesysteem (C). Hierin kunnen de volgende componenten worden herkend: warmtepomp (1) met compressor (1a), verdamper (1b), condensor (1c) en expansieventiel (1d); bronpomp (2); afgiftepomp (3); buffervat (4) met mogelijk bijverwarming (4a); afgiftesysteem (5); tapwatervoorziening (6); bodemwarmtewisselaar (7); passieve koelvoorziening (8) met mogelijk extra warmtewisselaar (8a) en mogelijk zonthermische panelen (9).



De volgende SPF-en worden gehanteerd:

$$SPF_{V2} = \frac{Q_W + Q_T}{E_c + E_{bp}}$$

$$SPF_{K0} = \frac{Q_{PK}}{E_{bp} + E_{gb}}$$

$$SPF_{K2} = \frac{Q_K}{E_c + E_{bp}}$$

SPF_{V2}	:	SPF verwarmingsbedrijf, inclusief pompenergie
SPF_{K0}	:	SPF passief koelbedrijf, inclusief pompenergie
SPF_{K2}	:	SPF mechanisch koelbedrijf, inclusief pompenergie
Q_W	:	Geleverde warmte, ruimteverwarming (MWh)
Q_T	:	Geleverde warmte, tapwater (MWh)
Q_{PK}	:	Geleverde koude passieve koeling (MWh)
Q_K	:	Geleverde koude mechanische koeling (MWh)
E_c	:	Energieverbruik compressor (MWh)
E_{bp}	:	Energieverbruik bronpomp (MWh)
E_{gb}	:	Energieverbruik gebouw pomp (indien van toepassing) (MWh)

In werkpakket 0 (referentietypen) wordt in meer detail toegelicht hoe in het rekenprogramma het rendement als functie van de temperatuur in het bodemenergiesysteem wordt bepaald.

Vervolgens wordt met het rendement de besparing op primaire energie en CO2 emissie bepaald. Deze zijn in meer detail beschreven in werkpakket 1 (positieve effecten).

De volgende grootheden worden bepaald:

1. Hulpenergie, de hoeveelheid hulpenergie die nodig is om een eenheid warmte of koude te leveren. Deze hangt af van de SPF (bepaald in werkpakket 0) van het systeem:

$$MWh_{hulpenergie} = \frac{MWh_{thermisch}}{SPF}$$

2. Hoeveelheid primaire energie, de hoeveelheid energie die nodig is om de totale hoeveelheid hulpenergie op te wekken. Deze hangt af van het totale (gemiddelde) nationale opwekrendement van elektrische energie (η_{el}), inclusief transportverliezen:

$$PE = \frac{MWh_{hulpenergie}}{\eta_{el}}$$

3. CO₂ emissie, deze hangt af van de totale hoeveelheid primaire energie en de hoeveelheid CO₂ emissie per geproduceerde eenheid energie:

$$CO_2 = f_{CO_2} * PE$$

2.2 Berekenen besparingen

Een besparing is een verschil tussen twee systemen, de besparing wordt dan ook uitgedrukt ten opzichte van een conventioneel systeem. Voor de conventionele systemen worden dezelfde berekeningen uitgevoerd waarbij een vast rendement wordt gekozen. Voor het conventionele systeem is voor verwarming uitgegaan van een gasgestookte ketel met een rendement (SPF) van 0,90. Voor koeling is uitgegaan van een conventionele luchtgekoelde airconditioninginstallatie met een SPF van 4,0. Deze rendementen zijn afkomstig uit de Uniforme Maatlat⁸.

2.3 Opwekrendement en emissiefactoren

Voor het bepalen van de hoeveelheid verbruikte primaire energie en emissies voor het bodemenergiesysteem zijn de opwekrendementen en emissiefactoren van groot belang. De discussie over deze factoren is nog in volle gang (Uniforme Maatlat). Een van de discussiepunten betreft bijvoorbeeld het feit dat de CO₂ emissie per m³ aardgas niet constant is⁹. De emissiefactoren voor elektriciteit hangen verder sterk af van welke opwekkers in welke verhoudingen gebruikt worden (aardgas, kolen, nucleair, wind, etc). Windenergie verbruikt geen fossiele brandstof en produceert nagenoeg geen CO₂, terwijl een gasgestookte centrale minder emissies produceert dan een kolengestookte centrale. Daarbij kan de verhouding van de verschillende energieopwekkers van jaar tot jaar verschillen.

Voor de berekeningen worden daarom alternatieve scenario's gebruikt, gebaseerd op de emissiegetallen uit de Uniforme Maatlat (versie 3.3). Het eerste scenario (scenario 2013) is gebaseerd op een rendement van 39% op bovenwaarde¹⁰ (35,17 MJ/m³), ofwel 43% op onderwaarde (31,65 MJ/m³). Alhoewel de CO₂ emissie bij verbranding van aardgas ook

⁸ Uniforme maatlat voor de warmtevoorziening in de woning- en utiliteitbouw. Versie 3.3. Expertisecentrum Warmte, Agentschap NL.

⁹ Vaststellingsmethodieken voor CO₂-emissiefactoren van aardgas in Nederland. TNO rapport 2006-A-R0079/B.

¹⁰ De bovenwaarde (bruto stookwaarde) is de hoeveelheid energie die vrijkomt bij verbranding, inclusief de condensatiewarmte. De onderwaarde (netto stookwaarde) is de hoeveelheid energie zonder condensatiewarmte.

varieert, nemen we als uitgangspunt dat bij verbranding van 1 m³ aardgas-equivalenten 1,81 kg/kWh_{th} CO₂ vrijkomt (met de onderwaarde van 31,65 MJ/m³ is de CO₂ emissie 56 kg/GJ).

Bij een opwekkrendement van 43% op onderwaarde is de CO₂ factor voor elektriciteitslevering volgens de Uniforme Maatlat 0,565 kg/kWh_e.

Het tweede scenario is het “scenario 2020”. Hierbij is aangenomen dat het opwekkrendement van de nationale energievoorziening toeneemt, o.a. door een groter aandeel duurzaam opgewekte energie zoals wind of zon. Daarbij wordt aangetekend dat de import van groen gas de emissiefactor voor gas kan beïnvloeden, maar dat de hoeveelheid geïmporteerd groen gas in 2020 nog te verwaarlozen is (Uniforme Maatlat).

De gebruikte factoren worden in tabel 2 samengevat.

Tabel 2. Samenvatting diverse omrekenfactoren. Opwekkingsrendement (η_{el}) voor stroom bij eindgebruiker (inclusief transportverliezen) en CO₂ emissiefactor (f_{co2}) voor gas en elektra. Tussen haakjes de CO₂ emissiefactor in de centrale.

Parameter	Scenario 2013	Scenario 2020
Opwekkingsrendement elektriciteit (op onderwaarde), η_{el}	43%	60%
CO ₂ emissiefactor gas (f_{co2} , op bovenwaarde), kg/kWh _{th}	0,181	0,181
CO ₂ emissie elektriciteit (f_{co2}), kg/kWh	0,565 (0,243)	0,430 (0,258)

3 Resultaten

3.1 Effecten op bodemtemperatuur

In het algemeen zal de bodemtemperatuur in het opslag volume (bodemwarmtewisselaar) sterker veranderen bij een toename van het aantal systemen. Om de effecten van systeemtype en systeemomvang in kaart te brengen zijn voor elk referentiescenario berekeningen uitgevoerd waarbij de energiebalans (percentage regeneratie of koeling) is gevarieerd. Voor de scenario's die de woningbouw betreffen is de mogelijke maximale warmte-teruglevering naar de bodem beperkt door de temperatuurgrens voor passieve koeling, het kan zo zijn dat de opgelegde koelvraag daarom niet volledig gehaald wordt. Voor de scenario's uit de utiliteit wordt geschakeld tussen passief en actief koelbedrijf, afhankelijk van de temperatuur in het bodemenergiesysteem.

De figuren van de gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume voor de diverse scenario's worden in bijlage I gegeven. Een samenvatting wordt gegeven in tabel 3 en 4. In tabel 3 wordt de grootste temperatuurverlaging in de maand met laagste temperatuur in het bodemenergiesysteem weergegeven. Tabel 4 geeft de grootste temperatuurstijging van de gemiddelde bodemtemperatuur in de maand met hoogste. De getallen geven het verschil met de ongestoorde oorspronkelijke bodemtemperatuur van 10,5 °C.

Tabel 3. Temperatuurverlaging in de koudste maand (laagste temperatuur bodemenergiesysteem ten opzichte van ongestoorde bodemtemperatuur) van de gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume over simulatieperiode van 25 jaar, bij verschillende energiebalans (koellast als percentage van verwarmingslast).

No	Omschrijving	0%	30%	60%	90%	120%	150%
1	Enkele woning	-1,4	-1,1	-0,7	-0,5	-0,5	-0,5
2	Klein woningbouwproject	-3,8	-2,5	-1,3	-0,6	-0,6	-0,6
3	Gemiddeld wb project	-8,9	-5,7	-2,5	-0,5	-0,5	-0,5
4	Groot wb project	-11,1	-7,0	-2,9	-0,5	-0,5	-0,5
5	Zeer groot wb project	-10,2	-6,5	-2,8	-0,4	-0,4	-0,4
6	Kleine utiliteit	-5,9	-4,0	-1,4	-0,7	-0,7	-0,7
7	Grote utiliteit	-11,8	-7,7	-2,3	-1,1	-1,1	-1,1

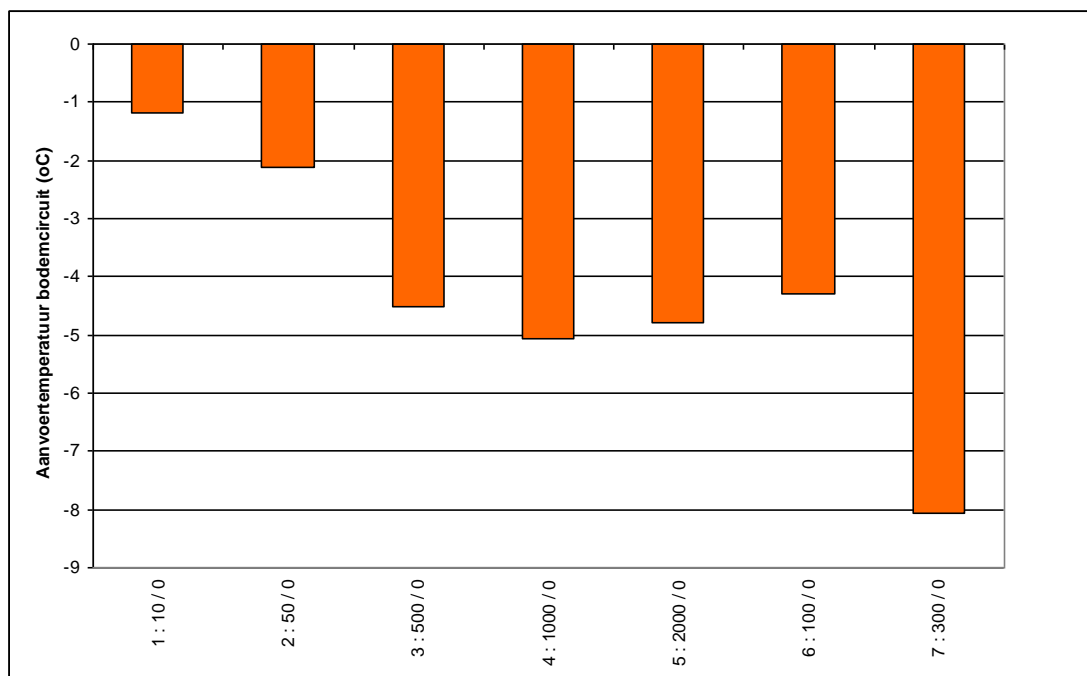
Tabel 4. Temperatuurverhoging in de warmste maand (hoogste temperatuur bodemenergiesysteem ten opzichte van ongestoorde bodemtemperatuur) van de gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume over simulatieperiode van 25 jaar, bij verschillende energiebalans (koellast als percentage van verwarmingslast).

No	Omschrijving	0%	30%	60%	90%	120%	150%
1	Enkele woning	0,0	0,1	0,5	1,1	1,6	1,7
2	Klein woningbouwproject	0,0	0,0	0,5	1,6	2,2	2,5
3	Gemiddeld wb project	0,0	0,0	0,2	1,8	3,8	4,1
4	Groot wb project	0,0	0,0	0,2	0,9	4,2	4,6
5	Zeer groot wb project	0,0	0,0	0,1	1,8	4,5	4,8
6	Kleine utiliteit	0,0	0,0	0,7	3,0	5,9	8,8
7	Grote utiliteit	0,0	0,0	0,9	5,7	11,5	17,4

In alle gevallen is duidelijk dat de gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume sterk beïnvloed wordt door de energiebalans. Bij een energiebalans aan de afgiftezijde tussen de 60% en 90% verandert de gemiddelde temperatuur in het totale geactiveerde bodemvolume nauwelijks. Bij een energiebalans van minder dan 60% neemt de gemiddelde temperatuur af, bij een energiebalans van meer dan 90% neemt de gemiddelde temperatuur toe, met name in scenario 6 en scenario 7 omdat in die scenario's de volledige opgegeven koelvraag gerealiseerd wordt. In de andere scenario's is de hoeveelheid gerealiseerde koeling beperkt door de mediumtemperatuur beperking van 18 °C.

Een andere vraag is of de wettelijk toegestane aanvoertemperatuur naar de bodem wordt onder- of overschreden. Voor verwarmingsbedrijf is dit de laagste temperatuur (rekening houdend met de temperatuur gedurende pieklastbedrijf) in de scenario's met alleen verwarmingsvraag (minder dan 30% energiebalans). Op basis van de opgestelde ontwerpen, waarbij de aannames over pieklastduur en temperatuurverschil bodemzijde, is de minimum aanvoertemperatuur van het circuliatiemedium naar de bodem berekend (figuur 2). Voor de relatief kleine systemen (scenario 1, 2) is de uitwisseling met de omgeving zo groot dat de minimumtemperatuur zeer waarschijnlijk niet onderschreden worden. Voor de overige scenario's geldt dat de minimum aanvoertemperatuur waarschijnlijk wel onderschreden wordt, met name voor het scenario met de grootste warmtevraag (scenario 7). Om de onderschrijding in scenario 7 te voorkomen is ongeveer 60% energiebalans nodig. Bij alle andere scenario's voldoet 30%. Op basis van de berekende temperaturen in figuur 2 zal in de bodem geen bevriezing optreden. In scenario 3 t/m 6 is de laagste mediumtemperatuur weliswaar lager dan wettelijk toegestaan, maar dit treedt alleen aan het einde van de winter op gedurende korte tijd (maximaal enkele uren). Alleen in scenario 7 zijn de berekende temperaturen zoveel lager dat bevriezing rond de bodemwarmtewisselaar op kan treden¹¹.

Figuur 2 Minimum aanvoertemperatuur bodemcircuit voor alle scenario's (bij alleen verwarmingsvraag, geen koelvraag).



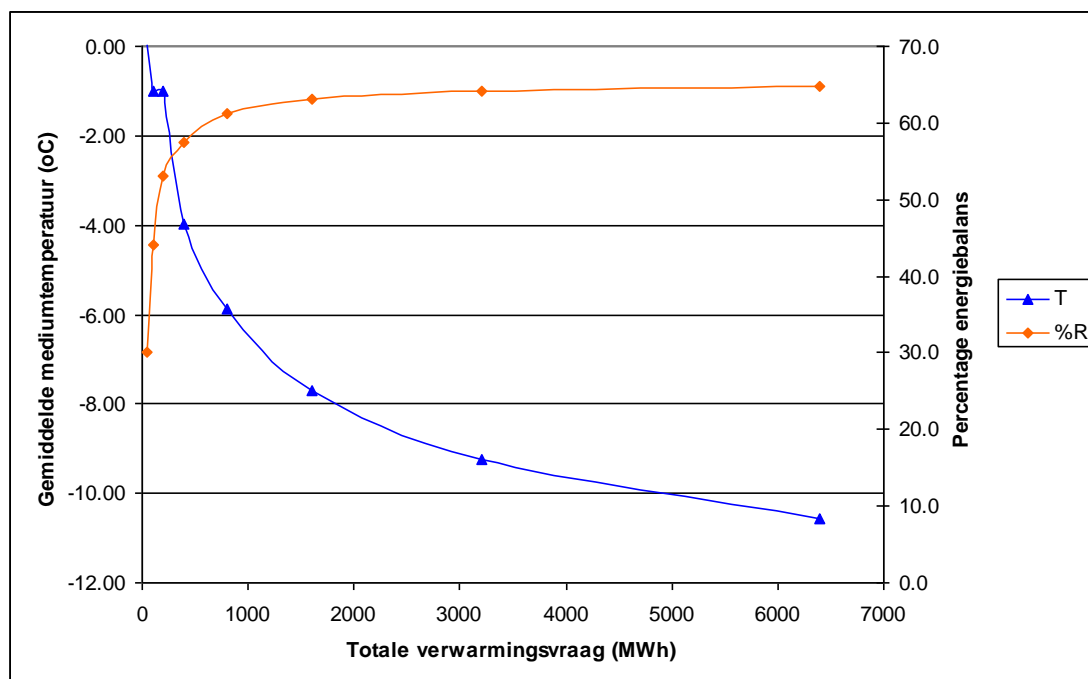
¹¹ Bij bevriezing van water komt veel energie vrij, de berekende mediumtemperaturen zijn dan feitelijk niet meer geldig omdat het rekenmodel niet met de bevriezing (fase-overgang) van water in de bodem rekening houdt.

Voor wat betreft de overschrijding van de maximale aanvoertemperatuur, deze wordt in de scenario's met passieve koeling niet overschreden omdat de mediumtemperatuur bij passieve koeling tot 18°C beperkt is, dit is ook duidelijk in de grafieken in bijlage I te zien. In de scenario's met mechanische koeling wordt de maximale aanvoertemperatuur wel overschreden in de scenario's met meer dan 100% koellast (> 30 °C bij 120% energiebalans). Indien de koellast minder is dan 100% van de verwarmingslast wordt de maximum aanvoertemperatuur niet overschreden.

3.2 Percentage noodzakelijke energiebalans

In paragraaf 3.1 is gekeken naar een ontwerp van een enkel systeem, waarbij wel verschillende energiescenario's beschouwd zijn. In de praktijk zal het ook voorkomen dat een project opgeschaald wordt waarbij de individuele bodemenergiesystemen niet in samenhang worden ontworpen. Met als uitgangspunt energiescenario 2 (± 10 woningen) is een bodemenergiesysteem doorgerekend met steeds een verdubbeling van de totale warmtevraag, daarbij is dan eerst uitgerekend hoe de temperatuur van het circulatiemedium verandert indien de energiebalans niet wordt aangepast. Vervolgens is uitgerekend hoeveel energiebalans noodzakelijk is om de oorspronkelijke ontwerptemperatuur te behouden ($0\text{ °C} < \text{gemiddelde mediumtemperatuur} < 27,5\text{ °C}$). De resultaten zijn weergegeven in figuur 3.

Figuur 3. Effect van schaalvergroting op mediumtemperatuur en noodzakelijke energiebalans. De gemiddelde mediumtemperatuur bij opschalen zonder aanpassing van het ontwerp wordt door de blauwe curve (T) gegeven. De oranje curve (%R) geeft aan welke mate van energiebalans nodig is om aan de oorspronkelijke ontwerputgangspunten te blijven voldoen.



Uit dit figuur blijkt dat de temperatuurdaling door toenemende onderlinge beïnvloeding snel toeneemt. Bij een projectomvang van 40 – 80 woningen (4 – 8 blokken van 10 woningen) zal de temperatuur al significant dalen. Bij projecten met omvang van 200 – 300 woningen of groter zal 60 – 65% energiebalans aan de vraagzijde nodig zijn om de temperatuur in het bodemenergiesysteem niet negatief te beïnvloeden.

In deze berekeningen is geen rekening gehouden met mogelijk grotere afstanden tussen de deelprojecten (huizenblokken).

3.3 Invloed energiebalans op rendement en CO₂ uitstoot

De energiebalans beïnvloedt de temperatuur in het bodemenergiesysteem en daarmee het behaalde rendement voor warmte- en koudelevering van de warmtepomp in combinatie met het gesloten bodemenergiesysteem voor zowel voor verwarmings- als voor koelbedrijf. Echter, voor het koelbedrijf in deze scenario's zal ook het aantal draaiuren moeten worden aangepast om de totale energiehoeveelheid aan regeneratie-energie te kunnen leveren en opslaan. Omdat, met de moderne energiezuinige pompen, het effect op het verbruik van primaire energie relatief klein is maakt dit voor het effect op de SPF of emissie niet veel uit. De effecten worden eerst bepaald voor het "scenario 2013".

Globaal neemt de SPF in verwarmingsbedrijf (figuur 4) in alle scenario's toe bij een toename van de energiebalans, hetgeen logisch is wanneer de temperatuur in het bodemenergiesysteem toeneemt. Het effect is relatief beperkt in de scenario's met kleine projectomvang (scenario 1 & 2). Gemiddeld neemt het rendement toe van 3,7 (geen regeneratie) tot 5,0 bij 150% regeneratie. In het middengebied (30 – 90%) bedraagt de gemiddelde SPF 4,0 – 4,5.

In de scenario's met passieve koeling (figuur 5) neemt de toename van SPF af bij hogere percentages opgelegde energiebalans omdat deze door de temperatuur limiet (18 °C) niet gerealiseerd kan worden. Omdat in het model de pomp wel in bedrijf blijft neemt de totale hoeveelheid verbruikte pompenergie niet af. De hoeveelheid geleverde koude neemt wel af omdat de aanvoertemperatuur uit de bodem te hoog wordt.

Bij de interpretatie van de rendementen voor met name passief koelbedrijf moeten we daarnaast rekening houden met de vraag of het gebouw in staat is deze hoeveelheden koelvraag te realiseren. Dit is afhankelijk van het gebouwzijdige afgiftesysteem. In het algemeen zal een passief koelsysteem in de woningbouw (meestal vloerverwarmings/koelingsysteem) niet zo een grote capaciteit hebben. De warmtelevering naar de bodem moet dan worden gerealiseerd via andere voorzieningen (zoals thermische zonnecollectoren, zonneboiler). Voor de invloed op emissies is dit effect niet meegewogen aangezien de capaciteit van het afgiftesysteem niet in het model is opgenomen. In de scenario's met passieve koeling is wel duidelijk dat de curves vrij vlak verlopen, dit effect is dan ook vrij klein.

Bij de scenario's met de mogelijkheid voor actieve koeling neemt het rendement bij een vergroting van de koelvraag af, van 106 (wanneer nog een groot aandeel passieve koeling mogelijk is, bij 30% energiebalans) tot 4,41 bij 150% energiebalans.

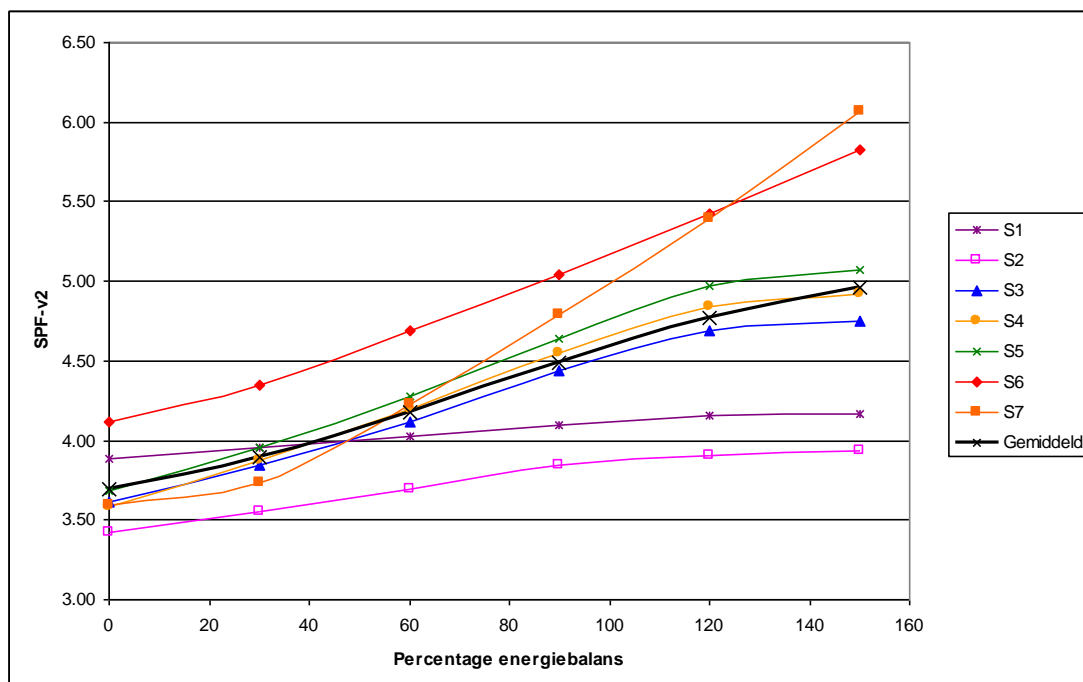
Figuur 6 geeft het effect op de CO₂ uitstoot in verwarmingsbedrijf weer, als kg CO₂ vermeden per MWh geleverde warmte. Met uitzondering van scenario 1 is voor de ontwerpen het uitgangspunt een energiebalans van 30% geweest. Voor alle scenario's stijgt de hoeveelheid vermeden CO₂ emissie, omdat bij verwarmingsbedrijf door gunstigere bedrijfscondities voor de warmtepomp de rendementen stijgen. De toename is van gemiddeld 55 kg CO₂ / MWh tot 85 kg/MWh.

Figuur 7 geeft het effect op de CO₂ uitstoot in koelbedrijf weer, als kg CO₂ vermeden per MWh koudevraag. Alhoewel het rendement bij hogere percentages warmtelevering naar de bodem lager worden door de beperking aan passief koelpotentieel, is het rendement nog steeds zo hoog dat de besparingen op CO₂ emissies in vergelijking met conventionele koeltechniek zeer hoog zijn. Uitgedrukt in kg/MWh vermeden CO₂ emissie is de reductie bij de scenario's met passieve koeling ± 140 kg/MWh. Bij de scenario's met mechanisch koelbedrijf wordt de SPF lager als gevolg van de beperking in het aandeel passieve koeling. Dit is ook duidelijk in de CO₂ reductie die daalt naar 30 – 40 kg/MWh bij een energiebalans van maximaal 60% en verder daalt bij een grotere hoeveelheid warmteterugvoer, tot ± 15 - 20 kg/MWh.

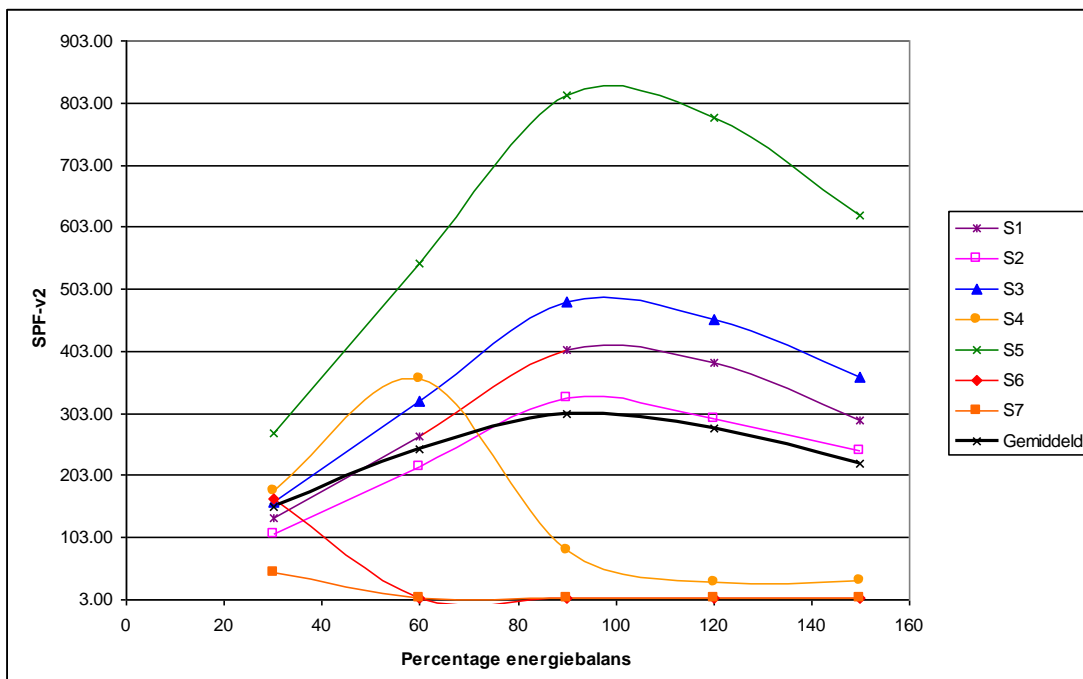
In het energiescenario "2020" neemt het opwekrendement toe maar de emissiefactor ook. Netto komt dit neer op een afname van ongeveer 23% van de emissie voor stroom uit het stopcontact. Voor verwarmingsbedrijf houdt dit in dat de gemiddelde besparing toeneemt tot 85 kg/MWh

(0% energiebalans) tot 112 kg/MWh (150% energiebalans). Voor koelbedrijf nemen de gerealiseerde besparingen af, omdat de toename van het elektrische opwekkendement ook voor de conventionele koeltechniek positief is. De afname is van 136 kg/MWh naar 104 kg/MWh (30% energiebalans) tot van 104 kg/MWh naar 80 kg/MWh bij een energiebalans van 150% koelvraag.

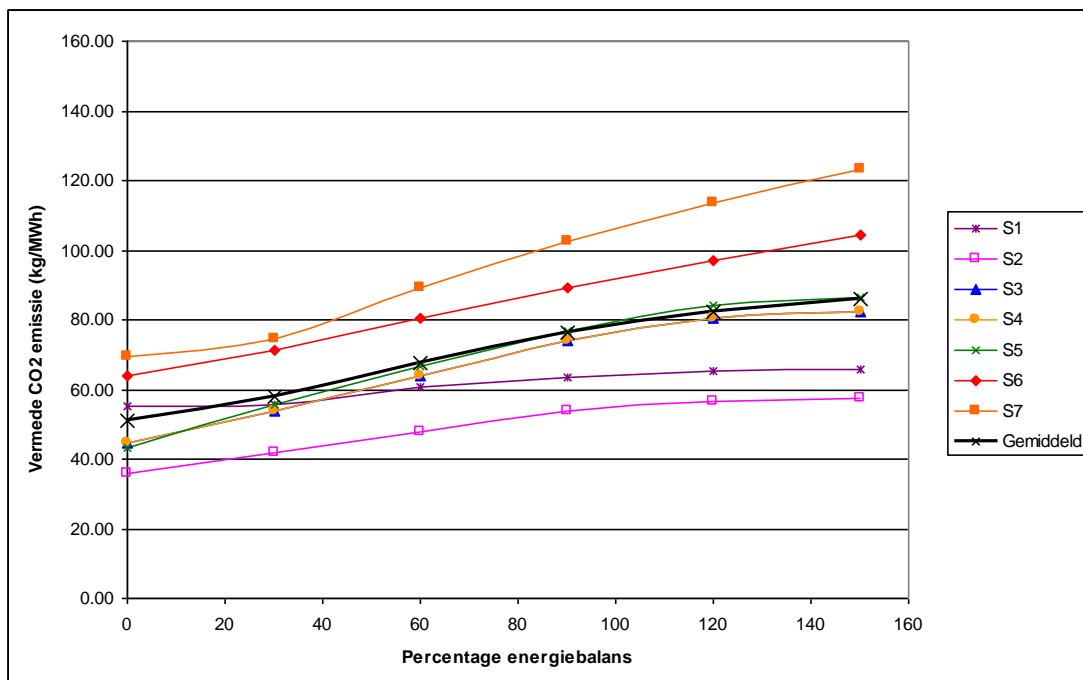
Figuur 4. Effect van energiebalans op SPF verwarmingsbedrijf.



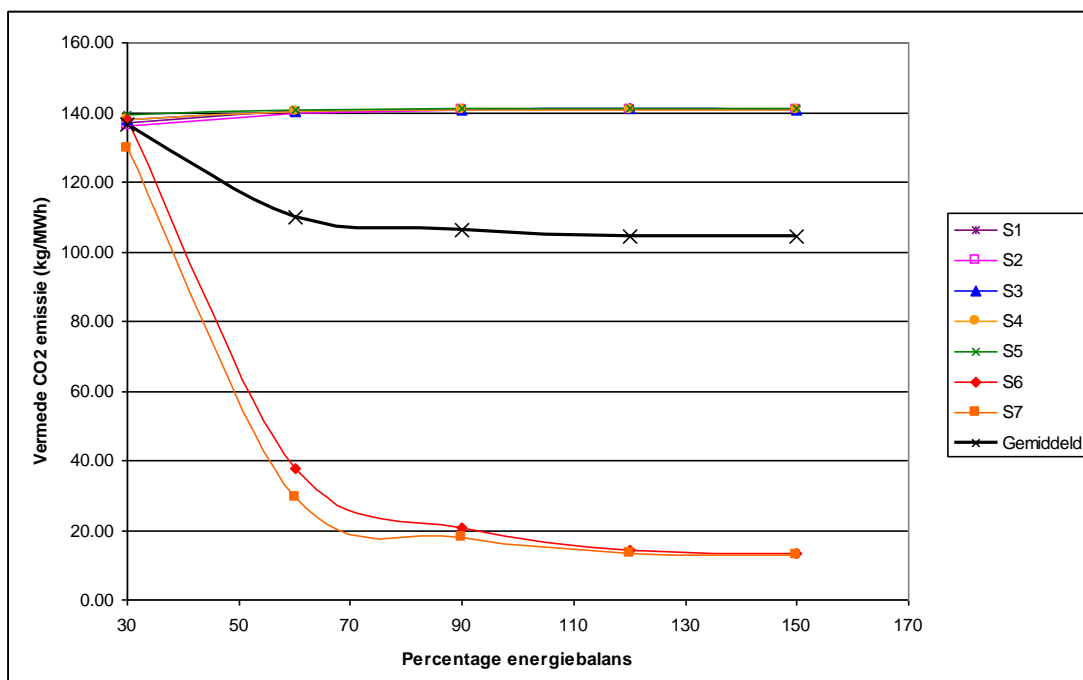
Figuur 5. Effect van energiebalans op SPF koelbedrijf.



Figuur 6. Effect van energiebalans op CO₂ emissie, besparing in kg CO₂ per MWh verwarming.



Figuur 7. Effect van energiebalans op CO₂ emissie, kg CO₂ per MWh koeling.

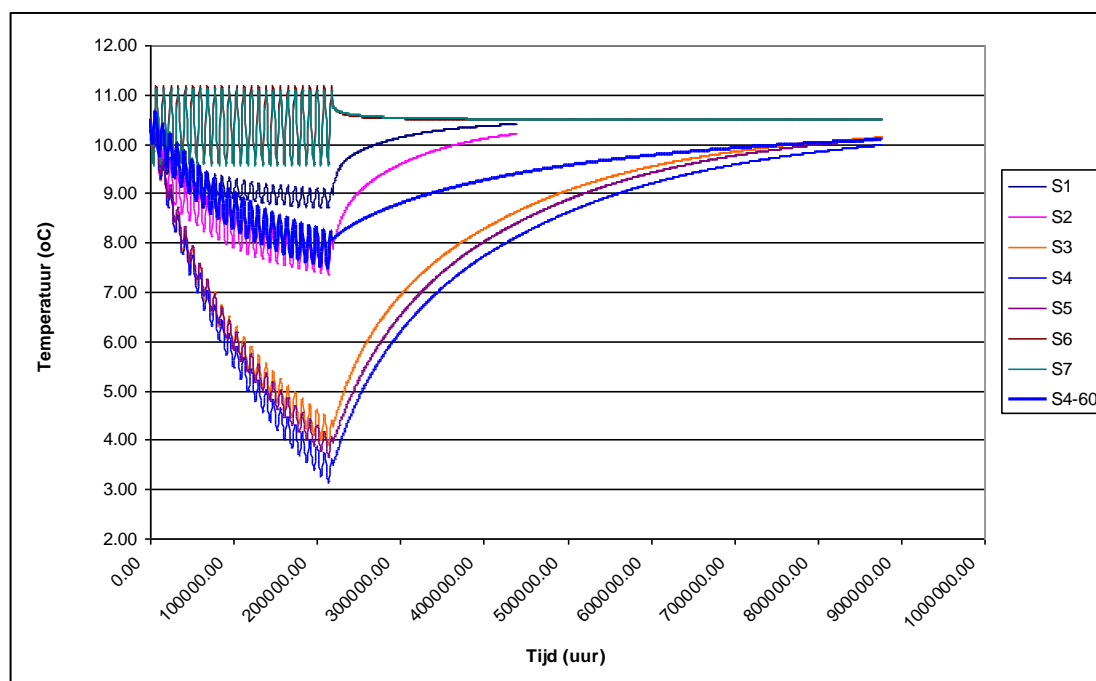


3.4 Natuurlijke regeneratie

Nadat een bodemenergiesysteem buiten gebruik is gesteld, is de vraag hoe snel de temperatuur in het geactiveerde bodemvolume weer naar de oorspronkelijke waarde terugkeert. In werkelijkheid zal de natuurlijke bodemtemperatuur in de toekomst niet perse dezelfde zijn als die op het moment van in bedrijf stellen, maar voor de berekeningen is dit minder relevant.

We hebben voor de scenario's 1 t/m 7 het systeem in jaar 25 buiten gebruik gesteld en vervolgens berekend hoe de gemiddelde bodemtemperatuur in het geactiveerde bodemvolume evolueert (figuur 8).

Figuur 8. Natuurlijke regeneratie, herstel van bodemtemperatuur na buitengebruikstelling bodemenergiesysteem, scenario 1 t/m 5 met 30% energiebalans, scenario 6 en 7 met 100% netto energiebalans en scenario 4 met 60% energiebalans.



Voor de kleine systemen is de uitwisseling met de omringende bodem groot en het beïnvloede volume relatief klein. Daar is het herstel dan ook snel: al na 7 jaar is de bodemtemperatuur tot 10 °C gestegen (0,5 °C minder dan de ongestoorde bodemtemperatuur van 10,5 °C). Voor scenario 2 duurt dit 17 jaar. In de scenario's met een zeer groot geactiveerd bodemvolume is de tijd nodig voor herstel van de bodemtemperatuur veel langer, tot maximaal 75 jaar.

In het geval van een volledige netto energiebalans (scenario 6 en 7) is de hersteltijd zeer kort.

De mate van temperatuurverandering in de bodem (afkoeling) is afhankelijk van de energiebalans en omvang van het geactiveerde bodemvolume. De vraag kan zijn wat de hersteltijd wordt indien voor een bepaald systeem de energiebalans verhoogd wordt. Voor scenario 4 (S4-60) is daarom ook berekend wat de hersteltijd is indien dit systeem niet 30% maar 60% energiebalans heeft. Voor dat scenario is, door de hogere mate van energiebalans, de grootste temperatuurdaling na 25 bedrijfsjaren veel minder groot (vergelijkbaar met de kleine systemen). Uit de berekening blijkt dat het bereiken van een nagenoeg volledig herstel van de bodemtemperatuur toch bijna evenveel tijd vergt als in het scenario met 30% energiebalans.

Dit kan als volgt verklaard worden: door de hogere temperatuur aan het begin van de herstelperiode stroomt netto minder energie per tijdseenheid het bodemvolume in. Omdat het totale geactiveerde bodemvolume vooral afhangt van het totale aantal bodemwarmtewisselaars (en voor grote projecten uiteraard groter is) is het effect van de energiebalans op de tijd waarop bijna volledig herstel optreedt daarom verwaarloosbaar.

Met de berekende temperatuurontwikkeling uit figuur 8 is voor elk scenario berekend hoeveel lang het duurt voor het temperatuurverschil met de oorspronkelijke ongestoorde bodemtemperatuur kleiner is dan 0,5; 1,0 en 2,0 K. De resultaten worden in tabel 5 gegeven.

Tabel 5. Natuurlijke regeneratie, tijd (in jaren na buiten bedrijf stellen van het bodemenergiesysteem) waarna het temperatuurverschil tussen de temperatuur in het bodemenergiesysteem en de oorspronkelijke temperatuur kleiner is dan 0,5; 1,0 of 2,0 K.

No	Omschrijving	Tijd (jaar) waarna verschil met ongestoorde bodemtemperatuur kleiner is dan		
		0,5 K	1,0 K	2,0 K
1a	Enkele woning	6,1	1,0	0,0
2	Klein woningbouwproject	17,2	8,1	1,3
3	Gemiddeld wb project	63,4	42,3	23,4
4	Groot wb project	75,3	51,9	30,4
4-60	Groot wb project – 60% balans	64,3	29,7	4,8
5	Zeer groot wb project	66,8	45,8	26,6
6	Kleine utiliteit – 100% balans	0,2	0,0	0,0
7	Grote utiliteit – 100% balans	0,2	0,0	0,0

Uit tabel 5 blijkt dat zelf voor grote projecten met een hoge mate van onbalans in het energievraagpatroon binnen relatief korte tijd (evenveel tijd als de tijd dat het systeem in bedrijf is geweest) de gemiddelde temperatuur in het bodemenergiesysteem minder dan 2,0 K van de oorspronkelijke temperatuur verschilt. Om een bijna volledig herstel van de bodemtemperatuur te bereiken duurt wel langer, tot circa 3 x de totale bedrijfstijd (75 jaar). Voor kleine systemen (een of enkele woningen) en systemen met een volledige energiebalans blijven de hersteltijden zeer kort.

3.5 Meerkosten voorziening warmteteruglevering

Bij passieve koeling zal in het algemeen tussen maximaal 30% en 40% van de verwarmingsvraag van de woning kunnen worden teruggeleverd naar de bodem. Indien geen passieve koeling wordt toegepast of waar een hogere energiebalans behaald moet worden, is het nodig extra warmte op te wekken. Mogelijkheden voor het opwekken van warmte zijn, bijvoorbeeld, een zonneboiler (vooral voor opwekken tapwater), het toepassen van zonnecollectoren uitsluitend voor opwekken van warmte ten behoeve van de energiebalans of een energiedak.

Om een volledige analyse te maken van de kosten en baten van een extra regeneratievoorziening is niet eenvoudig. Hier zijn verschillende redenen voor:

1. De hoeveelheid warmte die door een zonnecollector of energiedak wordt geleverd is o.a. afhankelijk van de aanvoertemperatuur. Aangezien de aanvoertemperatuur uit de bodem niet constant is (zoals bij tapwater wel verondersteld kan worden) zou het regeneratiesysteem in een dynamisch model opgenomen moeten worden. Dat model zou een veel kortere tijdstap moeten hebben dan de voor de overige berekeningen gebruikte modellen.
2. Van diverse zonnecollectoren (vlakke plaat en vacuümbuis) zijn gegevens beschikbaar over de globale opbrengst (opbrengstverklaring zonneboilers¹²). Deze gegevens hebben betrekking op tapwaterbereiding. Voor energiedaken zijn vooralsnog geen gegevens voorhanden maar aangenomen kan worden dat ze van gelijke orde grootte zijn.
3. Om de kosten en baten te bepalen moet rekening gehouden worden met:
 - a. Het effect op het rendement van het systeem
 - b. Indien het regeneratiesysteem een zonneboilersysteem is: het aandeel tapwater wat door het systeem geleverd wordt (veelal wordt uitgegaan van 50% van de totale vraag). Hierbij zou zelfs het ontwerp van de bodemwarmtewisselaarsysteem aangepast moeten worden.
 - c. Mogelijk aandeel in directe warmtelevering, ook hierbij zou het ontwerp van het bodemwarmtewisselaarsysteem aangepast moeten worden.

Een volledige analyse is binnen het kader van deze studie daarom niet mogelijk. Een indicatie van de meerkosten voor een installatie waarmee warmte aan het bodemenergiesysteem geleverd kan worden is berekend op basis van de gemiddelde opbrengst van vlakkeplaat collectoren en de energievraagpatronen uit de referentiestudie.

Uit gegevens van TNO blijkt een vlakkeplaat collector gemiddeld 0,45 MWh/m²/jaar op te leveren. De opbrengstverklaringen worden opgesteld voor toepassing voor tapwateropwekking, met een buffercapaciteit van 110 liter en een temperatuurtraject van 10 – 60 °C. Wanneer de collector wordt toegepast voor regeneratie zal de aanvoertemperatuur afhangen van de temperatuur uit de bodemwarmtewisselaar die in de winter lager zal zijn dan 10 °C, terwijl in de zomer de temperaturen hoger kunnen worden. Om rekening te houden met het effect van een wisselende aanvoertemperatuur zijn met een eenvoudig model van een vlakkeplaatcollector verschillende berekeningen uitgevoerd. De opbrengst bij een aanvoertemperatuur van 0 °C is bijna 0,54 MWh/m²/jaar terwijl bij 15 °C de opbrengst slechts 0,41 MWh/m²/jaar bedraagt. Als uitgangspunt voor het bepalen van de noodzakelijke oppervlakte nemen we een gemiddelde van 0,47 MWh/m²/jaar.

¹² http://www.tno.nl/downloads/Opbrengstverklaringen%20zonneboilers_07022011.pdf

Wanneer de warmte nodig voor de warmteteruglevering kan worden opgewekt door passieve koeling zal er geen sprake zijn van significante meerkosten van de installatie. Er dient wel een temperatuurregeling aanwezig te zijn om de temperatuur in het afgiftesysteem te regelen in verband met mogelijke condensvorming en het regelen van comfort.

Wanneer er geen passieve koeling wordt geleverd, of wanneer het aandeel regeneratie meer is dan door passieve koeling kan worden geleverd, dan zal voor het opwekken van de warmte een extra systeem geïnstalleerd moeten worden. De meest eenvoudige regeneratievoorziening bestaat uit een vlakke plaat zonnecollector. De voorziening bestaat dan tenminste uit:

- Vlakke plaat zonnecollector
- Een circulatiepomp
- Leidingwerk en isolatie
- Controlesysteem (inclusief regelklep)

Prijzen voor vlakkeplaat collectoren kunnen sterk variëren, waarbij ook het nodige montage materiaal een rol speelt. Voor montage op een vlak dak zijn bijvoorbeeld nog aparte staanders nodig. Kosten van een vlakkeplaat collector zijn gesteld op gemiddeld € 300,00 per m². Voor één MWh regeneratie bedragen de kosten aan noodzakelijke collector oppervlak dan € 638,00. Op deze basis kan voor alle scenario's eenvoudig de kosten voor de te installeren oppervlakte zonnecollector worden bepaald, afhankelijk van het percentage regeneratie (tabel 6).

Tabel 6. Indicatie kosten voorziening warmteopwekking als functie van gewenste energiebalans.

No	Omschrijving	V	Indicatie kosten (€ x 1000) voor vlakkeplaatcollector (geleverde warmte als percentage van verwarmingvraag)		
			MWh	30%	60%
1a	Enkele woning	10	1,91	3,83	5,74
1b	Enkele woning	10	1,91	3,83	5,74
2	Klein woningbouwproject	50	9,57	19,15	28,72
3	Gemiddeld wb project	500	95,74	191,49	287,23
4	Groot wb project	1000	191,49	382,98	574,47
5	Zeer groot wb project	2000	382,98	765,96	1148,94
6a	Kleine utiliteit PK	100	19,15	38,30	57,45
6b	Kleine utiliteit	100	19,15	38,30	57,45
7a	Grote utiliteit PK	300	57,45	114,89	172,34
7b	Grote utiliteit	300	57,45	114,89	172,34

Voor de installatie (per woning) wordt uitgegaan van € 1000,00 (2 mandagen, inclusief materiaal).

Als voorbeeld, voor scenario 1b is bij een gewenste energiebalans van 60% in totaal 12,8 m² zonnecollector nodig (60% komt overeen met 6 MWh, $6/0,47 = 12,8$ m²). De kosten voor de vlakkeplaat collector bedragen dan ± € 3.840,00. Inclusief installatiekosten bedragen de totale kosten dan €4.380,00. Nemen we aan dat de passieve koeling (van 30%) wel geleverd blijft worden, dan neemt het te installeren oppervlakte af tot 6,4 m² en bedragen de totale kosten € 2.920,00.

De totale meerkosten (investering bij nieuwbouw) voor een warmtepompinstallatie met gesloten bodemenergiesysteem ten opzichte van een gasgestookte ketel, bedragen circa € 8.000 – 10.000. Indien een zonnecollectorsysteem wordt toegepast om de warmteopwekking te realiseren zal dat een extra investering van 20% (bij 30% energiebalans) tot 60% (bij 90% energiebalans) vergen. Daartegenover staan mogelijke extra besparingen in de vorm van:

1. Een kleinere bodemwarmtewisselaar óf een hoger rendement gedurende de levensduur.
2. De mogelijkheid om ook tapwater met het zonnecollectorsysteem te produceren. Dit vermindert het energieverbruik van de warmtepomp en verhoogt het rendement (omdat geen water op hoge temperatuur geproduceerd hoeft te worden).
3. Mogelijke directe levering van warmte. Ook dan zou de omvang van de bodemwarmtewisselaar verkleind kunnen worden.

De omvang en kosten van een regeneratievoorziening zoals hier gegeven zijn alleen een globale indicatie, Om de werkelijke kosten en baten te bepalen zal ten alle tijden een projectspecifieke berekening gemaakt moeten worden.

4 CONCLUSIES

In deze studie zijn voor de referentiescenario's zoals gepresenteerd in werkpakket 0 verschillende berekeningen uitgevoerd om vast te stellen wat de effecten van projectomvang en energiebalans zijn op de bodemtemperatuur in het geactiveerde bodemvolume, rendement en emissies en op de tijd die nodig is voor natuurlijk herstel (natuurlijke regeneratie) nadat het bodemenergiesysteem buiten gebruik is gesteld. Hierbij is de energiebalans (de balans tussen warmte- en koudelevering) steeds gedefinieerd als de balans tussen de vraag aan de afgifte (gebouw) zijde. Dit is gedaan omdat het rendement de nettovraag aan de bodemzijde bepaalt en dat rendement tijdens de berekeningen varieert (van maand tot maand en van jaar tot jaar).

4.1 *Wat is het cumulatieve effect van vele kleine gesloten systemen op de bodemtemperatuur?*

Uit de berekeningen in paragraaf 3,1 blijkt dat de gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume sterk afhangt van de gerealiseerde energiebalans. Voor de referentiescenario's (met uitzondering van scenario 1) is het uitgangspunt bij ontwerp een energiebalans van 30% (koelvraag als percentage van de verwarmingsvraag). Wanneer er in het geheel geen warmte naar de bodem wordt teruggevoerd daalt de gemiddelde bodemtemperatuur aanzienlijk. Bij de energiebalans zoals die is gebruikt bij de referentiescenario's met passieve koeling is bij middelgrote en grote projecten (scenario 3, 4 en 5) nog altijd sprake van een aanzienlijke verlaging van de gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume. Bij een energiebalans van 60% is het maximale temperatuureffect sterk gereduceerd.

Wanneer de energiebalans zodanig wordt gekozen dat meer koudelevering plaatsvindt (energiebalans > 100%) dan blijkt de temperatuurverhoging met name voor de grote utiliteit (vanaf een energiebalans van 120%) en kleine en grote utiliteit (150%) groot. In de scenario's met passieve koeling is de opslag van warmte in de bodem (bij koudelevering) beperkt omdat de temperatuur niet hoger kan worden dan 18 °C.

In de praktijk zal een onder- of overschrijding van de temperatuur niet voorkomen omdat de regeling van het bodemenergiesysteem en de warmtepomp dit dient te voorkomen.

4.2 *Bij hoeveel procent energiebalans werkt het systeem naar behoren?*

Wanneer het aantal (kleine) systemen in een project toeneemt en de individuele ontwerpen niet worden aangepast dan blijkt uit de berekeningen dat er een groot additioneel temperatuureffect optreedt door de onderlinge beïnvloeding. Bij kleine projecten (scenario 1 of 2) zal dit binnen acceptabele grenzen blijven. voor grote projecten komt het technisch functioneren in het geding omdat in de bodem rond de bodemwarmtewisselaars bevrozing op zou treden. Omdat de aanvoertemperatuur naar de bodem beperkt is tot > -3 °C zal door de regeling van het bodemenergiesysteem de warmtelevering gestaakt worden. Wanneer er geen secundair verwarmingssysteem aanwezig is zal het gebouw dan niet meer verwarmd kunnen worden.

Wanneer een energiebalans (vraagzijde) van ± 60% gerealiseerd wordt blijkt de interactie tussen de aangrenzende systemen zodanig klein te worden dat er feitelijk geen extra effect optreedt.

4.3 *Welke invloed hebben de energiebalans en rendementsverliezen op de CO2 uitstoot?*

Een hoge energiebalans heeft een gunstig effect op het rendement bij verwarming. Hierbij moet wel aangetekend worden dat het uitgangspunt een energiebalans van 30% is geweest. Ook in de ongunstige gevallen (geen koudelevering, alleen warmtelevering) is de SPF over de gehele bedrijfsperiode altijd nog 3,5 of hoger. Bij 30% energiebalans is de gemiddelde SPF 3,9 en bij 60% 4,2.

Bij koudelevering is de SPF bij een energiebalans tussen 60 – 90% het hoogst, daarboven neemt de SPF af omdat (in de scenario's met passieve koeling) er minder koude geleverd kan worden. Hierbij moet aangetekend worden dat niet is meegewogen of het afgiftesysteem ook daadwerkelijk de hoeveelheid koude kan opwekken, bij passieve koelsystemen zal dit niet in alle gevallen mogelijk zijn. Dan moet de aan de bodem te leveren energie uit (bijvoorbeeld) een zonthermische installatie komen.

De effecten op de CO₂ emissie zijn uiteraard vergelijkbaar met de effecten op SPF. Voor systemen zonder enige energiebalans (alleen verwarmingsbedrijf) is de besparing op CO₂ uitstoot (51 kg/MWh) bijna 10% minder in vergelijking met het referentiescenario. Wanneer de warmtelevering toeneemt stijgt de besparing op CO₂ emissie met circa 50% (tot 86 kg/MWh).

Voor de koudelevering in de scenario's met passieve koeling is het duidelijk dat hoge hoeveelheden koude niet door passieve koeling geleverd kunnen worden. De besparing is redelijk stabiel op gemiddeld 105 kg/MWh geleverde koude. In de twee scenario's met mechanische koeling daalt de gerealiseerde besparing op emissie, tot ongeveer 15 kg/MWh bij een energiebalans van 150%.

Deze getallen zijn gebaseerd op het energietoekomstscenario 2013. Indien het rendement van de elektriciteitsopwekking toeneemt (scenario 2020) nemen de reducties voor verwarmingsbedrijf significant toe (30 – 50% meer besparing). Voor koelbedrijf neemt de reductie met $\pm 25\%$, omdat de vergroening van de elektriciteitsproductie ook een positief effect heeft op de conventionele koeltechniek.

4.4 Wat is de natuurlijke regeneratie van de bodem?

De natuurlijke regeneratie is de tijd waarna de temperatuur in het door het bodemenergiesysteem gebruikte bodemvolume weer gelijk is aan de ongestoorde bodemtemperatuur. Dit is berekend voor een maximaal temperatuurverschil van 0,5; 1,0 en 2,0K.

Voor de kleine systemen (enkele woningen, klein woningbouwproject) en systemen met een 100% energiebalans (utiliteit met mechanische koeling) blijkt de hersteltijd relatief kort te zijn: na 0 – 17 jaar verschilt de temperatuur in het bodemenergiesysteem minder dan 0,5 K van de oorspronkelijke temperatuur. Voor grotere systemen is de tijd voor volledig herstel langer, tot circa 75 jaar. De tijd dat de temperatuur minder dan 1,0 of 2,0 K verschilt is veel korter, ook voor grote systemen. Na maximaal 30 jaar (minst gunstige scenario) is het temperatuurverschil minder dan 2,0 K.

Indien bij deze systemen een grotere mate van energiebalans geeist wordt blijkt de volledige hersteltijd niet significant korter. Omdat de temperatuur in het geactiveerde bodemvolume aan het begin van de hersteltijd hoger is zal per tijdseenheid namelijk minder warmte het gebied instromen (bij warmtegeleiding als transportproces is het temperatuurverschil en de warmtegeleidingscoëfficiënt bepalend voor de warmtestroom).

4.5 Wat zijn de meerkosten om een energiebalans te realiseren?

Met behulp van diverse kengetallen over de opbrengst van zonnecollectoren en energiedaken is een inschatting gemaakt van de kosten van een installatie om warmte op te wekken. De kosten van de installatie hangen vooral af van de hoeveelheid warmte die opgewekt moet worden en daarmee van de gewenste energiebalans. Voor een klein project zullen de kosten voor het realiseren van een volledige energiebalans $\pm 60\%$ van de totale investeringskosten van het bodemenergiesysteem (inclusief warmtepomp) kunnen bedragen. Daartegenover staan mogelijke besparingen in de vorm van een bijdrage aan tapwatervoorziening (waardoor het rendement van het bodemenergiesysteem toeneemt en de omvang mogelijk afneemt).

Bijlage I

Gemiddelde temperatuur in het geactiveerde bodemvolume en gemiddelde circulatiemediumtemperatuur voor verschillende energiebalans (vraagzijde).

