

Effecten van Gesloten Bodemenergiesystemen

Werkpakket 1

Positieve Effecten

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

© 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.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING.....	1
1.1	Werkpakket 1 – Positieve effecten.....	2
1.2	Achtergrond.....	2
1.2.1	Waarom een bodemenergiesysteem?.....	3
2	REKENMETHODE.....	5
2.1	Berekenen primair energieverbruik en CO ₂ emissie	5
2.2	Berekenen besparingen.....	7
2.3	Opwekrendement en emissiefactoren.....	7
3	Resultaten	9
3.1	Primair energieverbruik.....	9
3.2	CO ₂ emissie	12
4	COMFORT.....	14
4.1	Enquête eindgebruikers.....	15
4.2	Literatuurstudie	16
5	CONCLUSIES.....	17
5.1	Hoeveel energiebesparing levert een gesloten systeem?.....	17
5.2	Wat is het effect op CO ₂ uitstoot?	17
5.3	Wat is de invloed op het comfort van de gebruiker?	18
	BIJLAGE I.....	19

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, BWW 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 signaleerd³.

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:

0. Referentiesystemen
1. Positieve effecten
2. Gebruik circulatiemedium in bodemlussen
3. Energiebalans en rendement
4. Interferentie tussen open en gesloten systemen
5. Buitengebruikstelling
6. Effecten doorboren kleilagen

Het project wordt uitgevoerd door een consortium drie partijen (IF Technology, Groenholland Geo-energiesystemen en KWR Watercycle Research).

1.1 Werkpakket 1 – Positieve effecten

In dit werkpakket wordt ingegaan op de positieve effecten. Over het algemeen hebben de vragen die met betrekking tot gesloten bodemenergiesystemen leven een negatief karakter. Ze gaan vooral over de mogelijke negatieve (milieu-)effecten van bodemenergiesystemen. Echter, de rede om bodemenergiesystemen toe te passen is vooral de positieve bijdrage aan het behalen van milieudoelstellingen, met name de reductie van energieverbruik en broeikasgasemissies.

De kernvraag gesteld in het onderzoeksvorstel is:

Welke positieve (milieu-)effecten heeft de grootschalige toepassing van gesloten bodemenergiesystemen, vergeleken met conventionele systemen voor verwarmen en koelen van gebouwen?

Daarbij zijn een drietal meer specifieke vragen gesteld:

1. *Hoeveel energiebesparing levert een gesloten systeem?*
2. *Wat is het effect op CO₂ uitstoot?*
3. *Wat is de invloed op het comfort van de gebruiker?*

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 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, daarbij wordt de temperatuur die de bodem levert 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 Waarom een bodemenergiesysteem?

Een van de belangrijkste redenen voor het toepassen van gesloten systemen is het vermijden van het gebruik van primaire energie voor verwarming en koeling en de daarmee samenhangende vermindering van emissie van CO₂. Daarnaast kunnen er nog andere positieve effecten zijn, waaronder een verhoogd comfort en een kostenbesparing voor de eindgebruiker die minder energie verbruikt voor verwarming en koeling.

In veel situaties worden gesloten systemen in combinatie met warmtepompen vooral toegepast voor het efficiënt verwarmen van gebouwen, daarbij komt ook een koelpotentieel beschikbaar. Dit koelpotentieel, meestal toegepast als directe (passieve) koeling op hoge temperatuur (tot ± 18 °C), heeft een zeer hoog rendement en een gunstig effect op de EPC van een gebouw. Een goed geïsoleerd gebouw zal in de zomer veel warmte invangen, in de EPC wordt dit verrekend als energieverbruik omdat ervan uitgegaan wordt dat men dit actief weg zal koelen. Bij toepassen van een gesloten systeem vervalt deze post.

Om het positieve effect op reductie van primaire energie en CO₂ uitstoot 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 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.

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.

Tabel 1. Basis ontwerp bodemwarmtewisselaarsystemen. Jaarlijkse 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

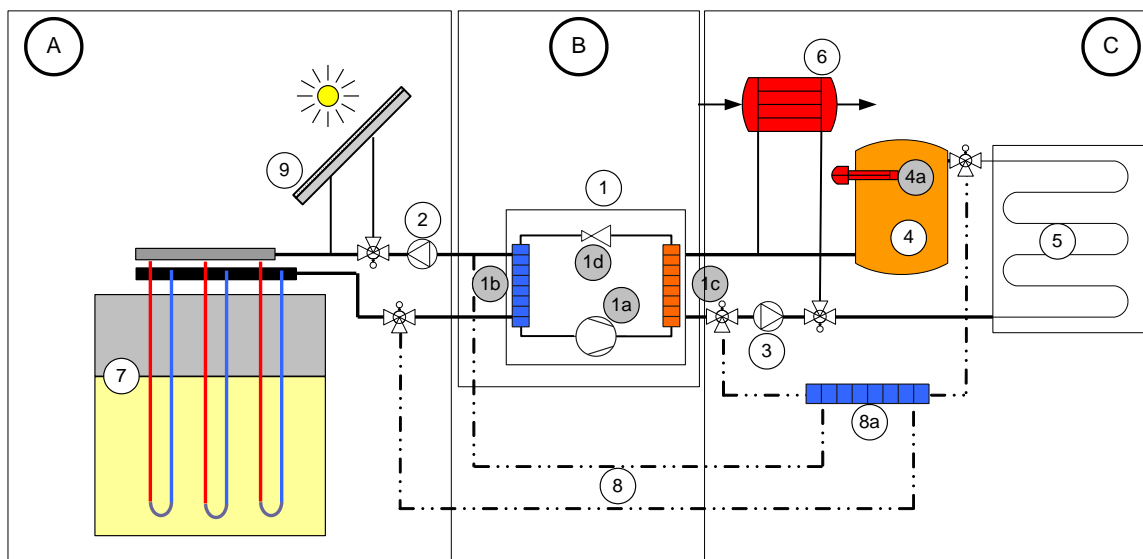
2 REKENMETHODE

In werkpakket 0 zijn voor de verschillende referentiescenario's ontwerpen van het bodemenergiesysteem opgesteld en zijn de hulpenergie en SPF bepaald. De methode waarmee dat is uitgevoerd is beschreven in werkpakket 0 (een samenvatting van de gevolgde methode is in opgenomen in bijlage I). Met de energievraagpatronen (verwarmingsvraag en koelvraag) en het over de hele levensduur van het bodemenergiesysteem bepaalde rendement kan vervolgens worden berekend hoeveel primaire energie een bodemenergiesysteem verbruikt en hoeveel CO₂ uitgestoten wordt. De besparingen worden vervolgens bepaald door te vergelijken met een conventioneel systeem.

2.1 Berekenen primair energieverbruik en CO₂ emissie

De rekenmethode om de door het bodemenergiesysteem gerealiseerde reductie van primaire energie verbruik en CO₂ emissies te bepalen is gebaseerd op de methode beschreven in het rapport "Bepalen van het energetische rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem"⁴. In dat rapport 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 ervoor gekozen het rendement van het bodemenergiesysteem te definiëren op basis van de compressorenergie en energie van de bronpomp (figuur 1, onderdelen 1a [compressor] en 2 [bronpomp]).

Figuur 1. Schematische weergave bodemenergiesysteem (A), warmtepompsysteem (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).



⁴ Ministerie van I&M, 2012 Bepalen van het energetisch rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem. Rapport GHNL 012002.

De volgende SPF-en worden gehanteerd:

$$SPF_{V2} = \frac{Q_W + Q_T}{E_c + E_{bp}} \quad SPF_{K0} = \frac{Q_{PK}}{E_{bp} + E_{gb}} \quad SPF_{K2} = \frac{Q_K}{E_c + E_{bp}}$$

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 gebouwpomp (indien van toepassing) (MWh)

Met deze SPF en met de totale energievraag van de referentiesystemen wordt berekend hoeveel hulpenergie het bodemenergie verbruikt, hoeveel primaire energie daarvoor nodig is en hoe groot de CO₂ emissie is die hiermee samenhangt:

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

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

2. Hoeveelheid primaire energie (PE), 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 (f_{CO2}):

$$CO_2 = f_{CO2} * PE$$

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 Maatlat⁵.

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 is⁶. 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 bovenwaarde⁷ (35,17 MJ/m³), ofwel 43% op onderwaarde (31,65 MJ/m³). Alhoewel de CO₂ emissie bij verbranding van aardgas ook 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 opwekrendement 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 opwekrendement 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.

⁵ Uniforme maatlat voor de warmtevoorziening in de woning- en utiliteitbouw. Versie 3.3. Expertisecentrum Warmte, Agentschap NL.

⁶ Vaststellingsmethodieken voor CO₂-emissiefactoren van aardgas in Nederland. TNO rapport 2006-A-R0079/B.

⁷ 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.

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 Primair energieverbruik

Allereerst is berekend wat het primaire energieverbruik van alle referentiesystemen is (tabel 3), vervolgens zijn de besparingen bepaald (tabel 4). In het 2013 scenario variëren de besparingen voor verwarmingsbedrijf tussen de 34% en 48% en nemen toe in het 2020 scenario tot 55% – 65%. Voor koelbedrijf zijn de besparingen groter, voor alle scenario's met passieve koeling meer dan 97%, voor de scenario's met een combinatie van passieve en mechanische koeling 35% – 40%. Voor de scenario's met koelbedrijf is er geen procentueel verschil tussen het scenario 2013 en scenario 2020. Dit feit is eenvoudig te verklaren: bij verwarming wordt een vergelijking gemaakt tussen het bodemenergiesysteem waarbij elektriciteit wordt omgezet in warmte en een conventioneel systeem wat gas gebruikt. Omdat het opwekrendement van elektriciteit in het scenario 2020 hoger is, maar het rendement van het conventionele gassysteem niet, neemt het verschil toe. Bij het leveren van koeling wordt in het bodemenergiesysteem en ook in het conventionele systeem alleen elektriciteit als hulpenergie gebruikt. Omdat de toename van het opwekrendement dan ook voor de conventionele airconditioning geldt, zijn er geen verschillen tussen de scenario's.

Tabel 3. Primair energieverbruik (MWh per jaar) referentiesystemen. Conventioneel met koelbedrijf in scenario 2013 en scenario 2020, bodemenergiesystemen verwarming en koelbedrijf in scenario 2013 en scenario 2020. Alle scenario's met uitzondering van 6b en 7b met passieve koeling, scenario 6b en 7b met passieve en mechanische koeling.

No	Omschrijving	Conventioneel			Bodemenergiesysteem			
		V	K2013	K2020	V2013	V2020	K2013	K2020
1a	Enkele woning	11,1			6,0	4,3		
1b	Enkele woning	11,1	2,3	1,7	6,0	4,3	0,0	0,04
2	Klein woningbouwproject	55,6	11,6	8,3	32,8	23,5	0,3	0,2
3	Gemiddeld wb project	555,6	116,3	83,3	306,8	219,9	2,3	1,6
4	Groot wb project	1111,1	232,6	166,7	605,6	434,0	3,9	2,8
5	Zeer groot wb project	2222,2	465,1	333,3	1180,5	846,0	5,1	3,7
6a	Kleine utiliteit PK	111,1	23,3	16,7	53,7	38,5	0,4	0,3
6b	Kleine utiliteit	111,1	65,1	46,7	50,1	35,9	34,9	25,0
7a	Grote utiliteit PK	333,3	69,8	50,0	157,1	112,6	1,1	0,8
7b	Grote utiliteit	333,3	183,7	131,7	148,4	106,4	119,3	85,5

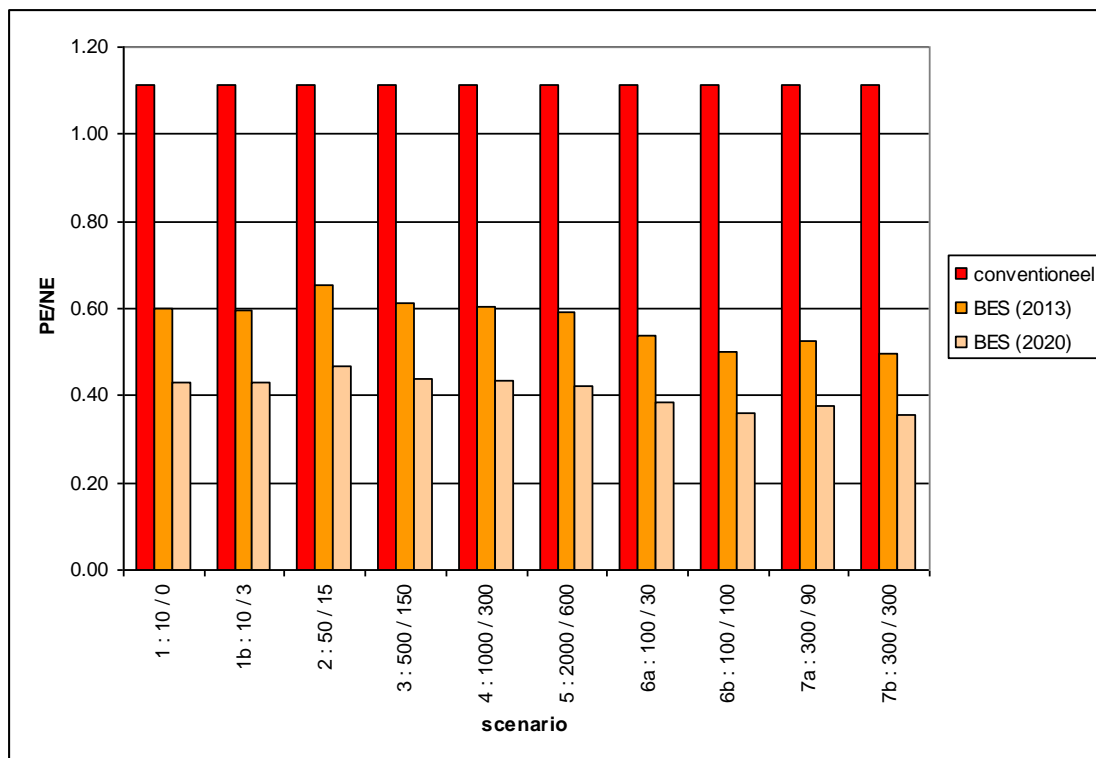
Figuur 2 geeft de besparing voor verwarming elk referentiescenario grafisch weer. Om de vergelijking te kunnen maken is hier de verhouding tussen de verbruikte primaire energie en geleverde thermische energie weergegeven. Voor conventionele systemen is deze verhouding vast en hangt af van het ketelrendement (0,90), waarmee de verhouding een constante 1,11 is. Voor de bodemenergiesystemen scoren vooral de kleine woningbouwprojecten het hoogste (minst gunstig), namelijk 0,66, hoger dan een enkele woning of grotere projecten.

Figuur 3 geeft dezelfde verhouding weer voor koelbedrijf. De verschillen zijn veel groter, in eerste instantie omdat passieve koeling een zeer gunstige (lage) verhouding heeft (zeer veel thermische energie geleverd per eenheid primaire energie).

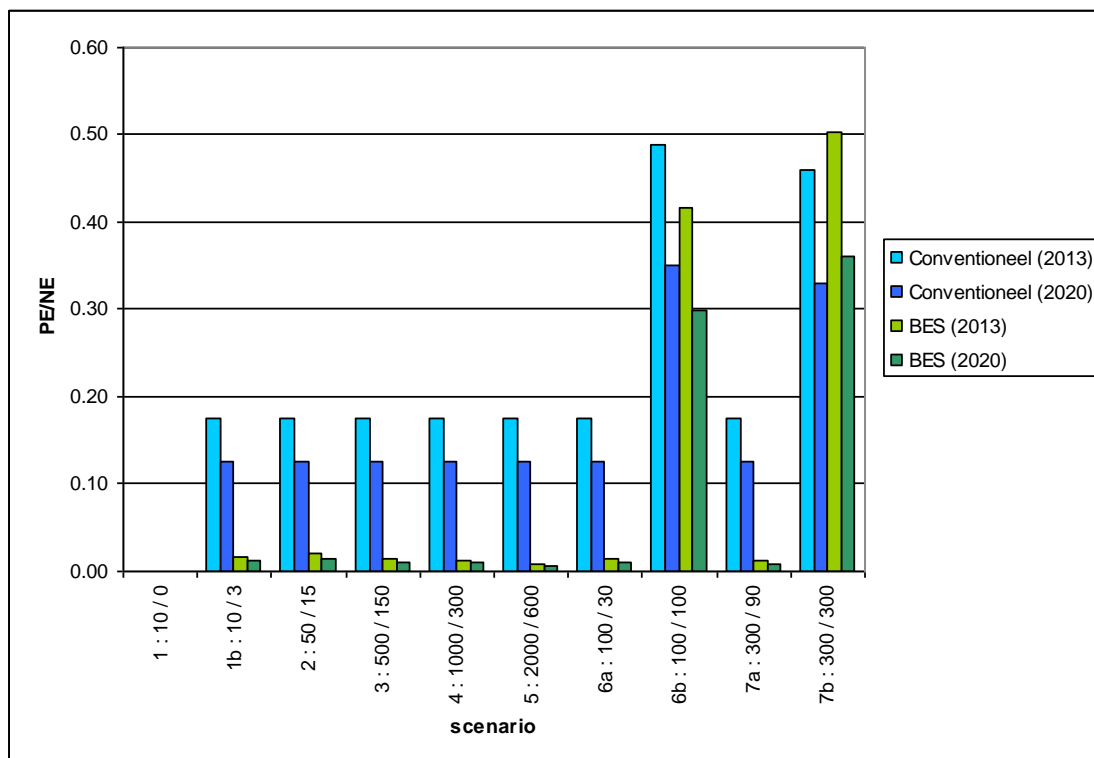
Tabel 4. Besparing op energieverbruik (MWh per jaar) en percentage besparing referentiesystemen ten opzichte van conventioneel verwarming en koelbedrijf in scenario 2013 en scenario 2020.

No	Omschrijving	Bodemenergiesysteem			
		V2013	V2020	K2013	K2020
1a	Enkele woning	5,1	6,8		
	<i>Percentage</i>	<i>45,9</i>	<i>61,2</i>		
1b	Enkele woning	5,1	6,8	1,7	1,2
	<i>Percentage</i>	<i>46,2</i>	<i>61,4</i>	<i>97,1</i>	<i>97,1</i>
2	Klein woningbouwproject	22,8	32,1	8,4	6,0
	<i>Percentage</i>	<i>41,0</i>	<i>57,7</i>	<i>96,4</i>	<i>96,4</i>
3	Gemiddeld wb project	248,8	335,7	84,9	60,9
	<i>Percentage</i>	<i>44,8</i>	<i>60,4</i>	<i>97,4</i>	<i>97,4</i>
4	Groot wb project	505,5	677,1	170,5	122,21
	<i>Percentage</i>	<i>45,5</i>	<i>60,9</i>	<i>97,8</i>	<i>97,8</i>
5	Zeer groot wb project	1041,7	1376,2	343,7	246,3
	<i>Percentage</i>	<i>46,9</i>	<i>61,9</i>	<i>98,5</i>	<i>98,5</i>
6a	Kleine utiliteit PK	57,4	72,6	17,0	12,2
	<i>Percentage</i>	<i>51,7</i>	<i>65,4</i>	<i>97,5</i>	<i>97,5</i>
6b	Kleine utiliteit	61,0	75,2	13,9	10,0
	<i>Percentage</i>	<i>54,9</i>	<i>67,7</i>	<i>28,4</i>	<i>28,4</i>
7a	Grote utiliteit PK	176,2	220,7	51,3	36,7
	<i>Percentage</i>	<i>52,9</i>	<i>66,2</i>	<i>98,0</i>	<i>98,0</i>
7b	Grote utiliteit	184,9	227	18,5	13,3
	<i>Percentage</i>	<i>55,5</i>	<i>68,1</i>	<i>13,4</i>	<i>13,4</i>

Figuur 2. Verwarmingsbedrijf: verhouding tussen verbruikte primaire energie (PE) en geleverde nuttige thermische energie (NE), voor conventionele systemen en voor bodemenergiesystemen (BES) in het scenario 2013 en scenario 2020.



Figuur 3. Koelbedrijf: verhouding tussen verbruikte primaire energie (PE) en geleverde nuttige thermische energie (NE), voor conventionele systemen en voor bodemenergiesystemen (BES) in het scenario 2013 en scenario 2020.



3.2 CO₂ emissie

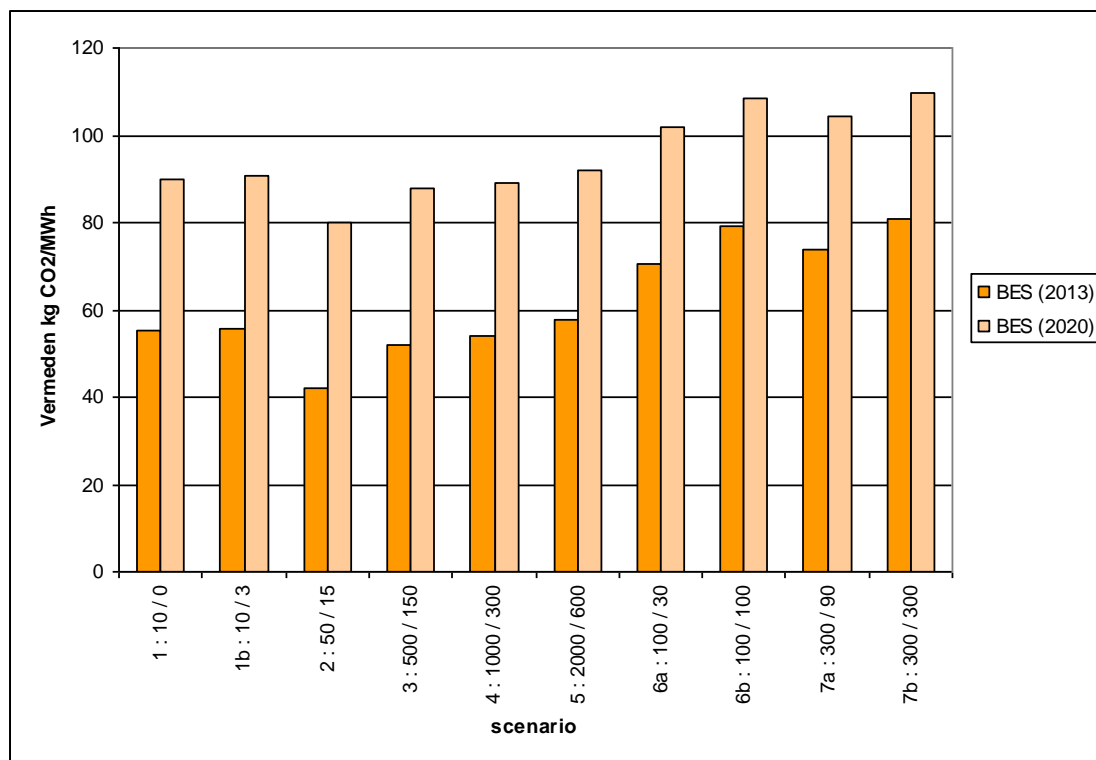
De berekende CO₂ emissies zijn in tabel 5 weergegeven, in ton CO₂. Uit de tabel blijken grote verschillen in absolute hoeveelheid tussen de diverse scenario's omdat de totale energievraag sterk verschilt. De reductie in CO₂ emissie zijn vergelijkbaar met de reductie van energieverbruik en bedragen voor verwarmingsbedrijf 20% – 40% (2013) oplopend tot 30% – 45%. Voor passief koelbedrijf wordt weer bijna 100% op emissies bespaard, voor mechanische koelbedrijf bedragen de besparingen altijd nog 35% – 45%.

In figuur 4 en 5 zijn de besparingen op CO₂ emissie per geleverde eenheid thermische energie weergegeven (in kg/MWh) voor verwarming en koeling. Globaal bespaart een bodemenergiesysteem in verwarmingsbedrijf tussen de 55 en 80 kg/MWh in het 2013 scenario, dit neemt toe tot 90 – 110 kg/MWh in het 2020 scenario. Voor passief koelbedrijf zijn de besparingen zeer groot (135 kg/MWh), deze nemen in het 2020 scenario af omdat de conventionele koelsystemen ook profiteren van het hogere rendement van de opwekking. Bij de utiliteit systemen met mechanische koeling zijn de gerealiseerde besparingen circa 40 kg/MWh in 2013, dit neemt af tot 30 kg/MWh in scenario 2020.

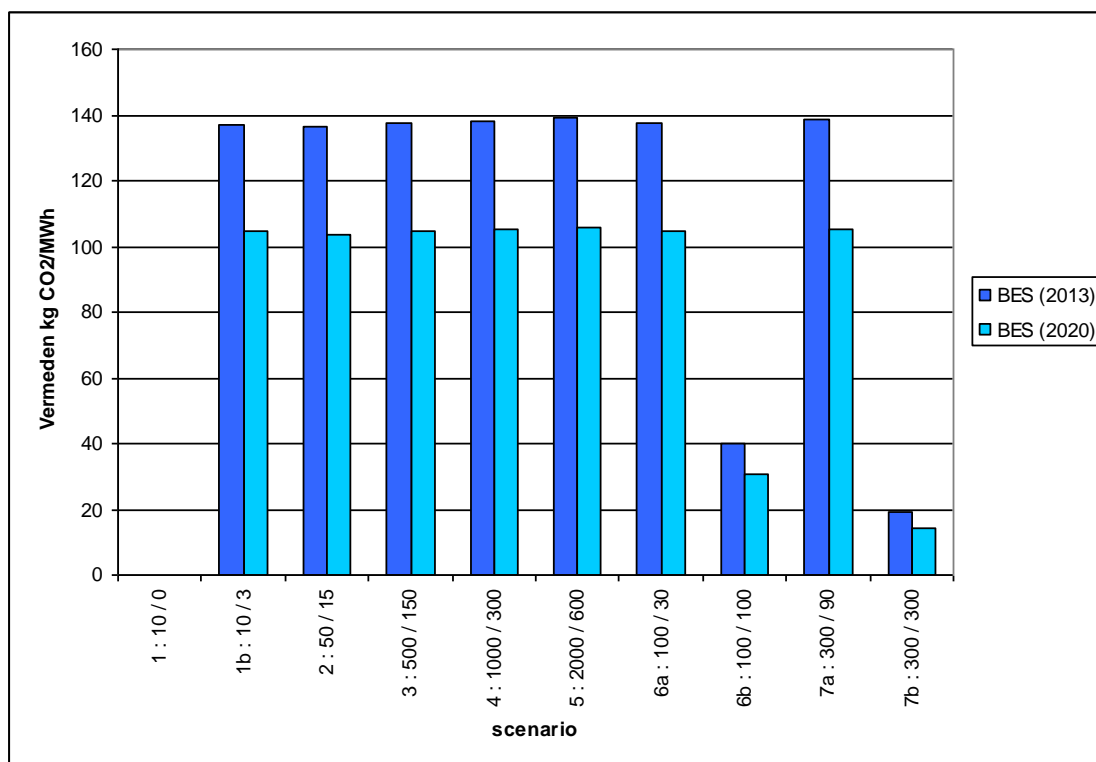
Tabel 5. CO₂ emissie (ton per jaar). Conventioneel met verwarmingsbedrijf (identiek voor scenario 2013 en 2020) en koelbedrijf in scenario 2013 en scenario 2020, bodemenergiesystemen verwarming en koelbedrijf in scenario 2013 en scenario 2020.

No	Omschrijving	Conventioneel			Bodemenergiesysteem			
		V	K2013	K2020	V2013	V2020	K2013	K2020
1a	Enkele woning	2,0			1,5	1,1		
1b	Enkele woning	2,0	0,6	0,4	1,5	1,1	0,0	0,0
2	Klein woningbouwproject	10,1	2,8	2,2	8,0	6,1	0,1	0,1
3	Gemiddeld wb project	100,6	28,3	21,5	74,6	56,7	0,6	0,4
4	Groot wb project	201,1	56,5	43,0	147,2	112,0	0,9	0,7
5	Zeer groot wb project	402,2	113,0	86,0	286,9	218,3	1,2	0,9
6a	Kleine utiliteit PK	20,1	5,7	4,3	13,1	9,9	0,1	0,1
6b	Kleine utiliteit	20,1	15,8	12,0	12,2	9,3	8,5	6,5
7a	Grote utiliteit PK	60,3	17,0	12,9	38,2	29,1	0,3	0,2
7b	Grote utiliteit	60,3	44,6	34,0	36,1	27,4	29,0	22,1

Figuur 4. Verwarmingsbedrijf, vermeden CO₂ emissie per eenheid geleverde thermische energie (kg/MWh).



Figuur 5. Koelbedrijf, vermeden CO₂ emissie per eenheid geleverde thermische energie (kg/MWh).



4 COMFORT

Naast de besparingen op verbruik van primaire energie en broeikasgasemissies hebben warmtepompen in combinatie met gesloten bodemenergiesystemen ook invloed op het comfort van de gebruiker. Alhoewel comfort lastig te kwantificeren is (er zijn weliswaar standaarden voor binnenklimaat, zoals de NEN-EN 15251 of een behaaglijkheidscore Fanger [1]), is het wel mogelijk hier kwalitatief enkele uitspraken over te doen.

In de internationale literatuur zijn zeer vele publicaties verschenen over het effect van binnenklimaat op behaaglijkheid en gezondheid. Deze studies hebben in het algemeen geen direct verband met bodemenergiesystemen, maar kunnen wel inzicht geven in het type comfort klachten en op welke wijze warmtepompen in combinatie met een gesloten bodemenergiesysteem daar een verbetering in aan kan brengen. In het rapport “Thermisch binnenklimaat” (2008) bijvoorbeeld, wordt aangegeven dat vooral de thermische behaaglijkheid in de zomer kritisch is. De behaaglijkheid in de winter is nagenoeg altijd voldoende omdat er voldoende capaciteit is opgesteld. Echter, ook in de winter zijn er klachten over tocht, koude voeten, koudestraling bij vensters of sterk wisselende temperaturen.

Een deel van het comfort dat een warmtepomp in combinatie met een gesloten bodemenergiesysteem kan leveren hangt samen met het feit dat de gebouwen over het algemeen goed geïsoleerd en luchtdicht zijn (weinig infiltratie) en dat het afgiftesysteem, zoals een vloerverwarming, uitgelegd is op lage temperatuur verwarming en hoge temperatuur koeling. Hierdoor ontstaat een constant binnenklimaat, zonder tocht of grote temperatuurverschillen. Aan de andere kant vinden bewoners het onprettig dat ze geen raam open kunnen zetten of weinig controle hebben over de instellingen van het systeem. Over het algemeen kunnen die klachten verholpen worden door betere instructie.

Een warmtepompinstallatie in combinatie met een gesloten bodemenergiesysteem wordt over het algemeen toegepast in een gebouw dat ontworpen is met een hoge isolatiefactor en voorzien kan zijn van balansventilatie. Hierdoor kunnen diverse comfortklachten ontstaan, maar die zijn niet specifiek toe te schrijven aan het bodemenergiesysteem.

Verhoging comfort bij gebruik bodemenergiesystemen:

- Vloerverwarming met relatief lage temperatuur: constant en homogeen binnenklimaat. Dit kan uiteraard ook met andere technologie geleverd worden.
- In de woningbouw wordt met het gesloten systeem passieve koeling geleverd. Bij conventionele verwarmingssystemen (in de woningbouw) wordt in het geheel geen koeling geleverd. Dit verhoogd in hoge mate het zomercomfort terwijl het toepassen van conventionele airconditioning apparatuur met een laag rendement voorkomen wordt.
- In vergelijking met conventionele koeltechniek (airconditioning) is er geen lawaai, geen condensatie en geen onprettige koude luchtstromen.
- Productiviteit neemt toe bij een behaaglijk klimaat, dit geldt zowel voor verwarming als voor koeling. In een te warme of te koude werkomgeving ligt de productiviteit al snel meer dan 10% onder het normale niveau. Uit verschillende studies [2] blijkt een afname van 2% in productiviteit voor elke graad boven de 25 °C. Deze waarnemingen worden door veel studies onderbouwd, een studie [3] waar neurogedragstests werden afgenomen kon duidelijk een effect op diverse productiviteit gerelateerde parameters (zoals accuratesse en snelheid) vaststellen.
- In scholen zal door koeling de concentratie toenemen en klachten die samenhangen met oververhitting van lokalen (hoofdpijn, concentratieverlies) afnemen.

- In scholen of zorginstellingen zullen mensen met epileptische verschijnselen (die door warmte kunnen worden getriggered) minder snel een toeval krijgen.
- Door het toepassen van bodemwarmtewisselaars voor het afstaan van condensorwarmte van koelmachines worden natte koeltorens vermeden, deze zijn vaak een bron van legionella besmetting.
- Door het toepassen van gesloten bodemenergiesystemen nemen geluidsemissies voor koeling (droge lucht koelers, adiabatische koelers etc) af.
- Er hoeft minder apparatuur op dak te geïnstalleerd te worden.
- Er hoeft in principe geen gasinfrastructuur aangelegd te worden.
- Een zeer lange levensduur met, voor het bodemenergiesysteem, geen of veel minder onderhoud
- Geen CO vergiftiging door slecht werkende of aangelegde rookgasafvoer.
- Meer betrokkenheid van de eindgebruiker bij energieverbruik van gebouw.

Nadelen van het gebruik bodemenergiesystemen:

- Om de energievraag van de woning zo klein mogelijk te maken wordt deze zoveel mogelijk luchtdicht gemaakt. Om toch voldoende ventilatie te hebben is een mechanisch ventilatiesysteem nodig, vaak een balansventilatie met warmteterugwinning. Over de balansventilatie zijn klachten bekend. Ook het niet zelf kunnen regelen van ventilatie (bijvoorbeeld door ramen te openen) wordt als negatief ervaren.
- De compressor in de warmtepomp produceert geluid, in sommige gevallen blijkt dit geluid van te hoog niveau te zijn. Door een goede isolatie van de warmtepomp en juiste plaatsing kan dit voorkomen worden. Als grens voor de geluidsproductie wordt over het algemeen < 30 dBa aangehouden.
- Bij een bodemenergiesysteem worden soms zonnecollectoren toegepast om voldoende energiebalans te halen (regeneratie). Deze zonnecollectoren kunnen als ontsierend worden ervaren.
- Bij grondgebonden woningen wordt het bodemenergiesysteem veelal in de tuin aangelegd. Voor de verbinding tussen de woning en het bodemenergiesysteem worden horizontale leidingen aangelegd. Hierdoor kan er sprake zijn van gebruiksbeperkingen (beperkte graafdiepte).
- De temperatuurregeling van het warmtepomp- bodemenergiesysteem is door de lagere aanvoertemperatuur beperkt. Ook reageert het systeem minder snel op een verandering van de instelling of gebruik van de ruimte. Deze mindere controle over het systeem wordt als negatief ervaren. Een ander nadeel kan zijn dat ruimtes die niet gebruikt worden, wel worden verwarmd.

4.1 Enquête eindgebruikers

Door KWR Watercycle Research is in het kader van dit onderzoeksproject een internet enquête opgezet bij eindgebruikers van gesloten bodemenergiesystemen. De resultaten van deze enquête worden in het rapport van KWR (werkpakket) gepresenteerd. Het comfort met betrekking tot climativering werd door de meerderheid als goed ervaren. Toch gaf 20% aan dat de woning onvoldoende gekoeld of verwarmd wordt. Daarbij werd ook aangegeven dat het systeem traag reageert en in eerste instantie niet goed was ingeregeld.

4.2 Literatuurstudie

Caird, S., Roy, R. & Potter, S., 2012: Domestic heat pumps in the UK: User behaviour, satisfaction and performance. Energy Efficiency (5) 3: 283-301.

Deze studie omvat 78 gebruikers (48 eigen woning, 30 sociale woningbouw; 50 bodemenergiesystemen, 28 luchtwarmtepompsystemen). Van alle gebruikers was 83% van mening dat het systeem hun woning voldoende verwarmd en 86% dat voldoende warm tapwater geproduceerd werd. In totaal vond 75% dat het systeem veel beter presteerde dan hun vorige (conventionele) systeem en 15% dat het systeem minder goed presteerde.

Alhoewel de tevredenheid over het systeem zeer groot is, werden er wel problemen geïdentificeerd. De belangrijkste problemen bij de systemen met een gesloten bodemwarmtewisselaar waren:

- 48%: Onbekend met hoe het systeem te beheren en prestatie te bevorderen, leesbaarheid van de handleiding.
- 20%: Niet alle ruimtes voldoende kunnen verwarmen,
- 17%: Langzaam opwarmen, trage respons van het systeem.
- 15%: Problemen met geluid

[1] Fanger, P.O., 1982. Thermal Comfort. Kreiger, Florida.

[2] Kamarulzaman, N., Saleh, A.A., Hashim, S.Z, Hashim, H. & Abdul-Ghani, A.A., 2011: An overview of the influence of physical office environments towards employees. Procedia Engineering, the 2nd International Building Control Conference.

[3] Lan, L., Lian, Z. & Pan, L., 2010. The effects of air temperature on office workers well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings. Applied Ergonomics 42: 29 – 36.

5 CONCLUSIES

In dit werkpakket zijn met name de positieve effecten van gesloten bodemenergiesystemen (besparingen op energieverbruik en CO₂ emissie) in kaart gebracht. Voor de referentiesystemen is in werkpakket 0 bepaald wat de verwarmings- en koelvraag is en zijn de bodemenergiesystemen ontworpen. Bij deze ontwerpen is bepaald wat het totale rendement gedurende de levensduur van het systeem is. Met deze resultaten zijn in dit werkpakket verschillende indicatoren berekend: door het bodemenergiesysteem verbruikte hulpenergie, totale hoeveelheid verbruikte primaire energie en CO₂ emissie. Door een vergelijking met een conventioneel systeem zijn daarna de besparingen begroot.

De kengetallen (efficiëntie van de elektriciteitsproductie en emissiefactoren) voor deze berekeningen zijn afkomstig uit de Uniforme Maatlat⁸. Voor het rendement van de elektriciteitsopwekking en emissiefactoren zijn twee scenario's beschouwd. Het huidige scenario (scenario 2013) gaat uit van de gegevens over mix van energiebronnen voor de elektriciteitsopwekking van 2013. Voor het scenario 2020 is uitgegaan van een "vergroening" van de elektriciteitsproductie (door het gebruik van meer duurzame bronnen zoals wind of zon) waardoor de emissiefactoren kleiner worden.

5.1 Hoeveel energiebesparing levert een gesloten systeem?

Op dit moment bedragen de verwachte besparingen op primaire energie bij warmtelevering 40% tot 55%. Deze besparingen kunnen in 2020 toenemen tot ongeveer 60% - 70%. Voor passief koelbedrijf bedraagt de besparing bijna 100%, voor mechanisch koelbedrijf bedraagt de besparing in scenario 2013 30%. In het 2020 scenario nemen de besparingen ten opzichte van conventionele systemen met ongeveer 15% toe. Gezien de lange levensduur van bodemenergiesystemen zal de cumulatieve besparing voor verwarming en koeling dan ook zeer groot zijn.

5.2 Wat is het effect op CO₂ uitstoot?

In het scenario 2013 wordt op verwarming tussen de 40 en 80 kg CO₂ per MWh geleverde warmte bespaard. In het scenario 2020 bedragen de besparingen 55 – 90 kg CO₂/MWh. Voor wat betreft verwarming hangen de besparingen af van hoe de totale energieproductie zich op termijn ontwikkelt (vergroening). Hoe groter het aandeel duurzaam (CO₂ vrij) opgewekte energie, hoe hoger de besparing van bodemenergiesystemen ten opzichte van conventioneel zal worden.

Voor koelbedrijf is voor passieve koeling de besparing zeer groot, aangezien bijna 100% bespaard wordt. In de huidige situatie (2013 scenario) zijn de besparingen in de scenario's met passieve koeling ± 135 kg CO₂/MWh. In het 2020 scenario neemt de besparing af, omdat voor de conventionele koeling het hogere rendement voor elektriciteitsopwekking zwaarder weegt. Voor systemen met mechanisch koelbedrijf hangen de besparingen minder af van de opwekking van elektrische energie, maar kan een technologische ontwikkeling van warmtepompen en conventionele koelmachines effecten hebben. In het huidige scenario (2013) wordt ± 30 kg CO₂/MWh bespaard, in het scenario 2020 is dit minder geworden, namelijk ± 20 kg CO₂/MWh.

Uit bovenstaande blijkt dat een verbetering van het opwekrendement van elektriciteit voor de bodemgekoppelde warmtepomp gunstig is voor verwarmingsbedrijf, maar ongunstig voor

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

koelbedrijf. Voor systemen met passieve koeling daalt het aandeel vermeden CO₂ emissie in koelbedrijf ook, maar de besparing blijft zeer hoog.

5.3 Wat is de invloed op het comfort van de gebruiker?

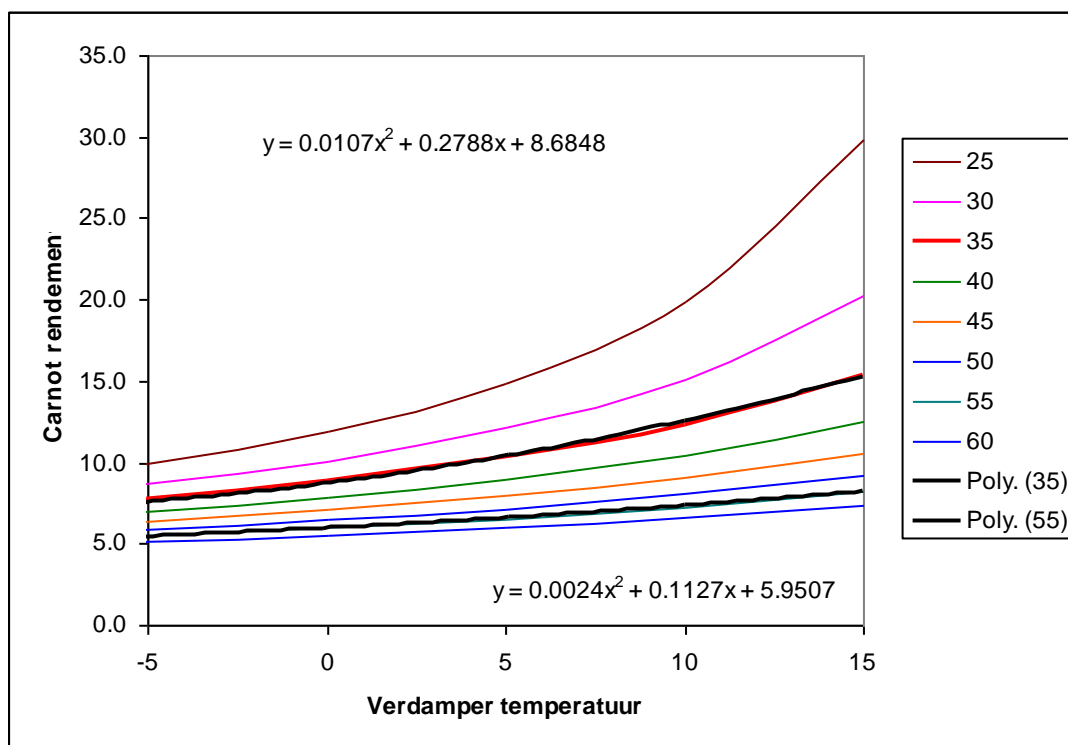
Door het toepassen van een gesloten bodemenergiesysteem met een warmtepomp wordt in het algemeen het comfort verhoogd. Voor een toepassing binnen de woningbouw is vooral de koeling in de zomer een factor die het comfort verhoogd. Met name omdat deze koeling niet gepaard gaat met lawaai of koude luchtstromen zoals kunnen optreden bij een conventionele airconditioning.

Ook bij toepassing in zorginstellingen of scholen zal het geleverde zomercomfort de grootste factor zijn. Deze heeft directe invloed op het welbevinden en kan gezondheidsklachten die samenhangen met te hoge temperaturen bij ouderen voorkomen en de concentratie en leersprestaties van leerlingen verbeteren.

BIJLAGE I.

Bij het ontwerp is gebruik gemaakt van twee ontwerpmethoden (programma's). Om de noodzakelijk lengte van een bodemwarmtewisselaarsysteem te bepalen als functie van het energievraagpatroon is het programma EED (Earth Energy Designer⁹). EED gebruikt het rendement (Seizoens Prestatie Factor, SPF) echter als invoerparameter, terwijl die SPF sterk van de temperaturen in het bodemenergiesysteem afhangt en daarmee ook niet in de tijd constant is. Om de werkelijke SPF te berekenen is het programma DST (Duct Ground Heat Storage Model¹⁰) gebruikt. In DST wordt de met EED bepaalde omvang van het bodemenergiesysteem ingevoerd en wordt vervolgens het rendement berekend. Dit rendement wordt dan in EED ingevoerd om de lengte van het bodemenergiesysteem opnieuw te bepalen, dit is nodig omdat het rendement bepaalt hoeveel energie daadwerkelijk met de bodem wordt uitgewisseld. De nieuwe lengte wordt vervolgens weer in DST ingevoerd om het rendement te bepalen, deze procedure wordt herhaald totdat de verandering in EED kleiner is dan 1%. Over het algemeen zijn hiervoor 2 iteraties (rekencycli) nodig.

Figuur B1. Relatie tussen Carnot rendement en verdampertemperatuur, voor verschillende condensortemperaturen. Weergegeven tevens de polynomiale fit voor condensortemperatuur 35 °C en 55 °C.



Het rendement is een functie van de toegepaste warmtepomp en de bron- en afgiftemperatuur van het systeem. Het rendement als functie van temperatuur is zeer variabel. Voor de overgrote meerderheid van de warmtepompen is het rendement echter alleen bekend bij evenwichtscondities (bijvoorbeeld brontemperatuur 5 °C en afgiftemperatuur 35 °C).

⁹ Blomberg, T., Claesson, J., Eskilson, P., Hellström, G., J., & Sanner, B. 2010. Earth Energy Designer - EED version 3.16.

¹⁰ Hellström, G. 1989. Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, University of Lund (Sweden).

Om het rendement bij verschillende temperaturen te kunnen berekenen wordt gebruik gemaakt van het Carnot-rendement¹¹. Het Carnot rendement van een ideale machine die de bovengrens van het rendement bepaald, deze wordt gegeven als functie van de absolute temperaturen in het systeem:

$$C\eta = \frac{T_h - T_l}{T_h} = 1 - \frac{T_l}{T_h}$$

Waar

$C\eta$: Carnot rendement

T_h : hoogste absolute temperatuur (K)

T_l : laagste absolute temperatuur (K)

Met deze functie is het maximale rendement voor verschillende temperaturen eenvoudig te berekenen. Door dit rendement te koppelen aan het rendement van een warmtepomp bij evenwichtscondities kan dan het werkelijke rendement bij andere temperaturen bepaald worden.

Voor verwarmingsbedrijf is uitgegaan van een condensor (verwarming) temperatuur van 35 °C, hiervoor is op basis van het bepaalde Carnot rendement een correlatie bepaald waarmee voor elke verdamper (bron) temperatuur het carnot rendement bepaald kan worden (figuur B1). Vervolgens gebruiken we het rendement van de warmtepomp bij de evenwichtscondities (B0/W35: bron) en afgifte 35 °C) en het Carnot rendement bij dezelfde evenwichtscondities om de SPF te bepalen, voor verwarmingsbedrijf:

$$SPF_v = SPF_{-wpB0W35} * \{(0,0107 * T_{verdamper}^2 + 0,2788 * T_{verdamper} + 8.6848) / SPF_{-carnotB0W35}\}$$

Voor tapwaterbedrijf:

$$SPF_T = SPF_{-wpB0W55} * \{(0,0024 * T_{verdamper}^2 + 0,1127 * T_{verdamper} + 5.9507) / SPF_{-carnotB0W55}\}$$

De referentierendementen voor verwarmingsbedrijf zijn gebaseerd op de studie “Bepalen van het energetische rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem”¹². Daarin is, voor 51 verschillende warmtepompen van in Nederland actieve leveranciers, het verwarmingsrendement geïnventariseerd. Dit betreft warmtepompen die worden toegepast in de woningbouw en kleine utiliteit (maximaal condensorvermogen 20 kW). Bij B0W35 is het gemiddelde rendement 4,4 voor ruimteverwarming. Bij deze condities is het Carnot rendement 8,8.

Voor tapwaterbedrijf bij een condensortemperatuur van 55 °C is het gemiddelde rendement van de beschouwde warmtepompen ± 2,5. Bij gelijke condities (condensortemperatuur 55 °C) is het Carnot rendement 6,0.

Voor mechanisch koelbedrijf kan dezelfde procedure gevolgd worden. Echter, de temperatuurbandbreedte voor koelbedrijf is veel nauwer omdat bij mechanisch koelbedrijf de condensortemperatuur geregeld wordt op een min of meer vaste waarde. Wel zal de SPF voor een koelmiddel omkeerbare machine, bij W10B30, iets hoger zijn dan bij verwarmingsbedrijf, we stellen deze op 4,5.

¹¹ Carnot, S., 1824. Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.

¹² Ministerie van I&M, 2012 Bepalen van het energetisch rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem. Rapport GHNL 012002.

Voor passief koelbedrijf is het niet zinvol dezelfde procedure te gebruiken. Het rendement van het passieve koelbedrijf wordt vooral bepaald door de pompenergie. Moderne pompen met permanente magneetmotoren, zoals die tegenwoordig toegepast moeten worden, bereiken een groot rendement. Bijvoorbeeld, een standaard centrale verwarmingspomp (UPS 2040) neemt 120 Watt op terwijl bij hetzelfde werkpunt een Magna (permanente magneet) pomp slechts 20 Watt verbruikt. Op basis van 750 draaiuren is de SPF met de UPS pomp dan ongeveer 20 terwijl met de Magna pomp de SPF 146 wordt. Als beginwaarde nemen we daarom een SPF passieve koeling van 125.

Om het rendement voor passieve koeling en de rendementen met pompenergie te bepalen is het nodig uit te rekenen hoeveel energie de circulatiepomp nodig heeft om de hoeveelheid vloeistof rond te pompen. Dit hangt af van de toegepaste leidingen, eigenschappen van het circuliatiemedium en met name van het totale debiet en opvoerhoogteverlies in het bodemwarmtewisselaarsysteem.

Voor de verschillende scenario's is steeds het debiet bepaald op basis van het vermogen met een temperatuurverschil over de bodem van 3K. De pompenergie volgt dan uit het totale debiet en opvoerhoogteverlies uit:

$$E_v = \frac{Q \cdot \rho \cdot 9,81 \cdot \Delta P}{\eta \cdot 3,610^6}$$

Hier is:

- Q : Totale debiet (m³/uur)
ρ : Dichtheid medium (kg/m³)
ΔP : Opvoerhoogteverlies (kPa)
η : Efficiëntie pomp (0,35)

Samenvattend:

1. Met EED wordt de omvang (aantal, lengte) van het bodemwarmtewisselaar systeem bepaald op basis van het energievraagpatroon.
2. Met DST wordt het werkelijke (temperatuurafhankelijke) rendement bepaald. Dit gemiddelde rendement wordt vervolgens weer in EED ingevoerd om een nieuwe lengte te bepalen.
 - a. DST berekend in elke tijdstap het rendement (apart voor ruimteverwarming, tapwaterbereiding, passieve en, voor utiliteit, mogelijk mechanische koeling) op basis van een warmtepomprenndment in een evenwichtsituatie en de correlaties tussen rendement en temperatuur zoals gegeven door het Carnot-rendement. Dit rendement wordt gebruikt om de netto energievraag aan de bodem te bepalen.
3. Stap 1 en 2 worden herhaald totdat de lengte met minder dan 1% verandert.
4. Definitieve rendementen (SPF) worden bepaald, inclusief nodige pompenergie. Rendement voor passieve koeling wordt bepaald op basis van pompenergie.