

**BEPALEN VAN HET ENERGETISCH RENDEMENT VAN
EEN WARMTEPOMPINSTALLATIE MET EEN
GESLOTEN BODEMENERGIESYSTEEM**

Projectnummer: GHNL 012002
Uitgebracht aan: I&M
Opdrachtnummer: 5200000753-1
Datum: 2/11/2012

© 2012 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	Vraagstelling.....	1
1.2	Achtergrond.....	1
1.2.1	Scope van de studie (beschouwde systemen)	2
2	BEGRIPSBEPALING	3
2.1	Basisprincipe warmtepomp - bodemenergiesysteem	3
2.2	Onderdelen gesloten bodemenergie- warmtepompsysteem.....	4
2.3	Definitie rendement, COP en SPF	6
2.3.1	COP, Coëfficiënt van Prestatie (Coefficient Of Performance).	6
2.3.2	SPF, Seizoens Prestatie Coëfficiënt (Seasonal Performance Factor).....	8
2.4	Berekenen van energieverbruik en emissies	8
2.4.1	Rekenvoorbeeld.....	10
3	RENDEMENT EN SYSTEEMGRENZEN.....	13
3.1	SEPEMO seizoenfactoren Verwarming (V).....	14
3.2	SEPEMO prestatiefactoren Koeling (C, Cooling).....	16
3.3	Totale rendement.....	17
3.4	Bepalen van het rendement	17
3.4.1	Berekenen van het (ontwerp)rendement (SPF).....	17
3.4.2	Monitoren van het rendement	18
4	Welke systeemgrens en welk rendement?.....	20
4.1	Welke systeemgrens?	20
4.2	Welk rendement?	20
4.2.1	Bovengrens aan rendement	21
4.2.2	Ondergrens aan rendement.....	21
4.3	Referentiesystemen.....	22
5	Samenvatting en aanbevelingen	23
5.1	Samenvatting	23
5.2	Aanbevelingen.....	23

1 INLEIDING

1.1 Vraagstelling

Op 28 maart 2012 is in een workshop over energierendement (ministerie van I&M, Agentschap NL, 28 maart 2012) afgesproken dat de Seizoens Prestatie Factor (SPF) als eenheid van rendement voor een bodemenergiesysteem gehanteerd zal worden. Dit is inmiddels ook opgenomen in de Raad van State versie van het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen, waarbij in dat besluit is opgenomen dat bij ministeriële regeling eisen kunnen worden gesteld aan het minimale rendement.

Met betrekking tot definitie van het systeemrendement en SPF van gesloten bodemenergiesystemen zijn er een aantal openstaande vragen:

1. Uit welke onderdelen is een gesloten bodemenergiesysteem opgebouwd en hoe hangen deze qua rendement samen.
2. Op welke SPF zou het wijzigingsbesluit zich moeten richten?
3. Hoe wordt de SPF berekend?
4. Wat zijn "state of the art" referenties voor een goed presterend bodemenergiesysteem, wat is nodig om in de toekomst goed onderbouwde referenties te kunnen geven.

Het ministerie van I&M heeft Groenholland BV opdracht gegeven deze vragen nader uit te werken. Dit rapport is het resultaat van die uitwerking.

1.2 Achtergrond

De Europese Unie heeft een doel gesteld van 20% hernieuwbare energie in 2020 en de lidstaten hebben middels NREAP (National Renewable Energy Action Plans, Nationale Hernieuwbare Energie Actie Plannen) aangegeven hoe ze dit willen bereiken. Binnen het brede Europese kader van 20% hernieuwbare energie heeft Nederland aangegeven in 2020 14% van het energieverbruik door hernieuwbare bronnen te leveren.

Door de Europese Unie worden bodemenergiesystemen gezien als een hernieuwbare energiebron (mits aan bepaalde voorwaarden is voldaan, zie § 4.2). Bodemenergiesystemen en warmtepompsystemen hebben daarmee een grote potentie voor het vervangen van primaire energie door hernieuwbare energie, aangezien een zeer significant deel van het energieverbruik (45% - 50% van het totale primaire energieverbruik in de Europese Unie) gebruikt wordt voor het klimatiseren (verwarmen en koelen) van gebouwen.

In het NREAP¹ heeft Nederland met betrekking tot bodemenergiesystemen aangegeven om in 2015 161 ktoe² en in 2020 242 ktoe middels geothermische warmtepompen te realiseren. Dit komt overeen met 11% van de totale hernieuwbare verwarming/koeling doelstelling voor 2020. Dit is alleen haalbaar als het gebruik van bodemenergie gestimuleerd wordt. De overheid heeft hiertoe een ontwerpbesluit bodemenergiesystemen gepubliceerd (Staatscourant 4830, 5 april 2011).

Bodemenergiesystemen worden toegepast bij het verwarmen en koelen van gebouwen en gebruiken de bodem daarbij als bron of buffer van warmte en koude. Een goed functionerend

¹ ECN-E-10-069, 2011: Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States.

² ktoe : kilo tons oil equivalent, 1 toe = 41,84 Gigajoule = 11,63 MWh

bodemenergiesysteem bespaart een significante hoeveelheid primaire energie en levert daarmee tevens een wezenlijke bijdrage aan het verminderen van primair energieverbruik en emissie van broeikasgas (CO₂).

Anders dan bij andere duurzame en hernieuwbare bronnen van energie (zoals wind, fotovoltaïsch of biomassa) wordt door een bodemenergiesysteem geen primaire energie opgewekt maar wordt het gebruik van primaire energie vermeden. De besparing zit hem met name in het verschil met conventionele systemen (koel- en verwarmingsinstallaties). Bij directe omzetting van primaire energie naar warmte of koude kan het rendement in principe nooit groter zijn dan 100%, in de praktijk is het rendement veel lager omdat er verliezen optreden en hulpenergie nodig is om de warmte of koude te transporteren. Bij een bodemenergiesysteem wordt de thermische energie (warmte of koude) voor het grootste deel uit de bodem gewonnen, een relatief kleine hoeveelheid primaire energie wordt verbruikt om de voor verwarming of koeling gewenste temperatuur te bereiken (door een warmtepomp) en om de warmte te transporteren (door circulatiepompen of ventilatoren).

Omdat bodemenergiesystemen met een warmtepomp geen energie opwekken maar verbruik vermijden, is de verhouding tussen geleverde thermische energie en verbruikte hulpenergie (het rendement) een belangrijke parameter. Het is daarom nodig om een aantal begrippen die met het rendement te maken hebben zo eenduidig mogelijk vast te leggen.

1.2.1 Scope van de studie (beschouwde systemen)

Lage temperatuur bodemenergiesystemen, geïnstalleerd op dieptes die variëren van circa 40 tot circa 200 meter, 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 systemen wordt warmte in de bodem getransporteerd door geleiding als gevolg van temperatuurverschillen. Naast gebruik voor verwarmen en koelen kan ook op grotere diepte warmte van zeer hoge temperatuur gewonnen worden waarmee direct elektriciteit kan worden opgewekt, deze diepe geothermie valt niet onder de hier gebruikte definitie van bodemenergiesysteem.

Zoals hierboven omschreven bestaan in de praktijk verschillende typen bodemenergiesystemen. De belangrijkste zijn open bodemenergiesystemen (WKO/aquifersystemen) en gesloten (bodemwarmtewisselaar, BWW) systemen. In dit rapport worden de rendementsbegrippen nader uitgewerkt voor gesloten bodemenergiesystemen.

2 BEGRIPSBEPALING

2.1 Basisprincipe warmtepomp - bodemenergiesysteem

We kunnen in de klimaatinstallatie van een gebouw globaal drie onderdelen onderscheiden:

- 1) De bron van thermische energie. Dit is bijvoorbeeld gas, de zon of de bodem.
- 2) De opwekker (installatie) die de energie in de bron omzet in een vorm geschikt voor verwarming of koeling. Hieronder vallen de gasketel, zonnecollectoren, koelmachine of de warmtepomp.
- 3) Het afgiftesysteem en distributiesysteem, het systeem wat de warmte of koude door het gebouw transporteert en met de verschillende ruimten uitwisselt. Het transportmiddel is water (verplaatst door een circulatiepomp) of lucht (verplaatst door een ventilator). Voorbeelden van afgiftesystemen zijn radiatoren, vloerverwarming, koelplafonds of luchtbehandelingskasten.

Om een ruimte te verwarmen moet de aanvoertemperatuur altijd boven de gewenste ruimtetemperatuur liggen, om te koelen juist daaronder (voor ontvochtiging zijn nog lagere temperaturen noodzakelijk). Het thermische vermogen van het afgiftesysteem is daarbij op een specifiek temperatuurtraject ontworpen. Voor een vloerverwarmingssysteem is het temperatuurtraject bijvoorbeeld 30 - 35 °C nodig, terwijl een radiator een aanvoertemperatuur van 55 °C of hoger eist. Een luchtbehandelingskast heeft voor koeling en ontvochtiging een temperatuur van 8 °C- 10 °C nodig, een koelplafond of vloerkoeling (hoge temperatuur koeling) heeft globaal³ een aanvoertemperatuur > 18 °C nodig om te koelen aangezien bij lagere temperaturen condensatie op kan treden .

Het bodemenergiesysteem gebruikt de bodem in de winter als bron van warmte terwijl in de zomer warmte uit het gebouw aan de bodem wordt afgestaan. Voor de bodemenergiesystemen die niet diepe geothermie betreffen zal de natuurlijke bodemtemperatuur in Nederland tussen de 8 °C en 14 °C variëren. Deze temperatuur zal afhankelijk van het systeemtype en ontwerp bij gebruik in de winter, over meerdere jaren, ook nog kunnen dalen waardoor in januari / februari de temperatuur die uit de bodem gewonnen kan worden tot ± 0 °C kan dalen. Het is daarom niet mogelijk om het gebouw direct te verwarmen met een bodemenergiesysteem.

In de zomer kan het bodemenergiesysteem gebruikt worden voor koelen. In een aantal gevallen zal de temperatuur die uit de bodem gewonnen kan worden laag genoeg zijn voor directe koeling. Soms zal de bodemtemperatuur gedurende de zomer zover stijgen dat directe koeling niet meer mogelijk is, in dat geval zal de warmtepomp mogelijk als koelmachine in worden gezet.

In de praktijk wordt een warmtepomp gebruikt om de temperatuur die in de bodem heerst om te zetten naar een temperatuur die bruikbaar is voor het verwarmen of koelen van het gebouw. De warmtepomp kan de temperatuur uit een lage-temperatuur bron halen en dit omzetten naar een hogere temperatuur. In verwarmingsbedrijf wordt de koude zijde van de warmtepomp aan de bodem gekoppeld en de warme zijde aan het afgiftesysteem. Om te koelen wordt dit omgekeerd: de koude zijde wordt aan het afgiftesysteem gekoppeld en de warme zijde aan de bodem. De bodem fungeert in dat geval als een seizoensmatig opslagsysteem.

Een gesloten bodemenergie- warmtepompsysteem is een vorm van duurzame en hernieuwbare energie omdat:

³ In werkelijkheid is dit iets complexer en is de temperatuur van het oppervlakte, de luchttemperatuur en luchtvochtigheid bepalend voor de ondergrens van de aanvoertemperatuur.

- 1) Het gesloten bodemenergiesysteem een zeer lange levensduur heeft (50 - 100 jaar) en onderhoudsvrij is.
- 2) Omdat de warmte (of koude) die uit de bodem gewonnen wordt door natuurlijke processen wordt aangevuld (toestroom vanuit de diepe ondergrond, toestroom van zonne-energie vanaf het oppervlak, toestroom uit de wijde omgeving). Ook bij een onbalans in energievraag (waar meer warmte wordt onttrokken of juist meer warmte wordt afgestaan aan de bodem) zal dit uiteindelijk vereffenen. Wanneer het systeem wordt uitgeschakeld keert het terug naar een evenwichtstoestand met de omgeving: het effect op de bodem is omkeerbaar en de bron raakt niet uitgeput.
- 3) Omdat het rendement van het bodemenergie- warmtepompsysteem zeer hoog kan zijn. Hierdoor wordt, in vergelijking met conventionele technieken, voor verwarming of koeling veel minder primaire energie verbruikt.

2.2 Onderdelen gesloten bodemenergie- warmtepompsysteem

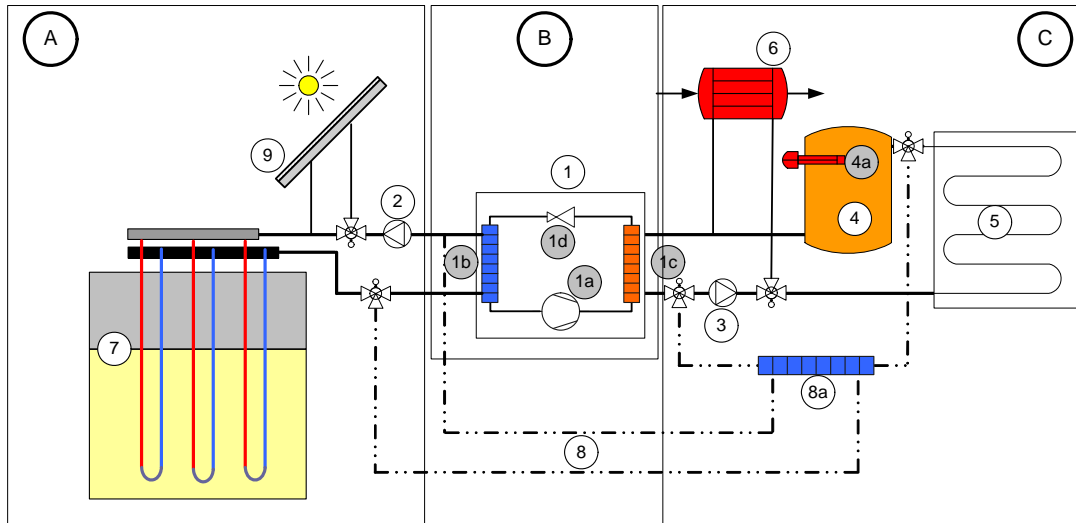
Een gesloten bodemenergiesysteem wordt nagenoeg altijd samen met een warmtepomp toegepast. Een warmtepomp is in staat om thermische energie (warmte) van een laag temperatuurniveau om te zetten naar een hoog temperatuurniveau.

Alhoewel er verschillende andere principes worden toegepast voor warmtepompen (zoals adsorptie of compressie) en de aandrijfenergie ook verschillend kan zijn (warmte, mechanisch) worden hier alleen elektrisch aangedreven compressiewarmtepompen beschouwd, deze zijn het algemeenst. De "pomp" in zo een warmtepomp is de compressor, die voor het pompen energie verbruikt. Omdat een groot deel van de warmte uit de omgeving (dit geval de bodem) wordt gehaald en maar een kleine hoeveelheid arbeid wordt gebruikt om het proces te laten werken, is er een hoog rendement.

In figuur 1 worden de verschillende onderdelen van een gesloten warmtepomp-bodemenergiesysteem schematisch weergegeven (regeltechnische voorzieningen zoals mengkleppen zijn alleen zeer schematisch weergegeven). Hierbij is een relatief eenvoudig warmtepompsysteem als voorbeeld genomen, waarbij de warmtepomp mogelijk intern (koelmiddelcircuit) omkeerbaar is voor verwarmings- of koel bedrijf. Er worden ook systemen geleverd die direct en gelijktijdig kunnen verwarmen en koelen (3- of 4-pijpsystemen). De belangrijkste onderdelen en circuits zijn:

- A: Waterzijdige circuit bron
 - B: Koelmiddelcircuit (intern warmtepomp)
 - C: Waterzijdige circuit afgiftesysteem
-
- 1: Warmtepomp met:
 - 1a Compressor
 - 1b Warmtewisselaar verdamper (koude zijde)
 - 1c Warmtewisselaar condensor (warme zijde)
 - 1d Expansieventiel
 - 2: Bron circulatiepomp
 - 3: Afgiftezijde circulatiepomp
 - 4: Voorraadvat
 - 4a elektrisch verwarmingselement
 - 5: Afgiftesysteem (kan ook bijvoorbeeld een luchtbehandeling zijn!)
 - 6: Tapwatervat

- 7: Bronsysteem (bodemwarmtewisselaar)
 8: Passief koelcircuit
 8a Warmtewisselaar passief koelcircuit
 9: Zonthermisch (in dit geval gebruikt voor regeneratie bron)



Figuur 1. Schematische weergave warmtepompstelsel met diverse onderdelen.

Er is sprake van drie in principe volledig gescheiden circuits: het circuit aan de bronzijde (A), het koelmiddelcircuit in de warmtepomp zelf (B) en het circuit aan de afgiftezijde (C). Aan de bronzijde zal veelal een antivriesmengsel (monopropyleenglycol, ethyleenglycol) worden toegepast als vorstbescherming.

In de warmtepomp (1) wordt het koelmiddel door een compressor (1a) samengeperst tot een gas van hoge druk en hoge temperatuur. In de warmtewisselaar (condensator, 1c) wordt dit gas afgekoeld tot een vloeistof onder hoge druk. Bij de condensatie van het gas wordt veel warmte afgestaan aan het verwarmingcircuit (C). Vervolgens passeert de vloeistof onder hoge druk het expansieventiel (1d) waar het snel uitzet (expandeert) en deels overgaat in gas. Daarbij daalt de druk en temperatuur sterk. In de warmtewisselaar (verdamer, 1b) zal het zeer koude gas/vloeistofmengsel verder verdampen, waarbij veel warmte uit de omgeving wordt opgenomen (bronsysteem A).

Langs de warmtewisselaars, aan de verdamer en condensorzijde, moet een medium (water of antivriesmengsel) stromen om de warmte met het warmtepompstelsel uit te wisselen. Daarvoor zijn uiteraard pompen nodig, een aan de bronzijde (2) en een aan de afgiftezijde (3). Verder omvat het systeem veelal een buffer (4), en uiteraard een afgiftesysteem (5, vloerverwarming, radiatoren, luchtbehandeling) en het bronsysteem (7, bodemwarmtewisselaarsysteem).

De buffer of voorraadvat (4) kan diverse functies hebben, waaronder voorkomen van pendelen van de warmtepomp bij kleine lasten (deellastbedrijf), het aanmaken van een voorraad warm water voor kortstondige pieklasten (gebruik maken nachttarief), het mogelijk opnemen van een elektrisch verwarmingselement (4a, bijverwarming of backup-systeem). Voor tapwater kan een ander voorraadvat (6) in het systeem opgenomen zijn, de warmtepomp schakelt met een driewegklep tussen tapwater- en ruimteverwarmingbedrijf. Alhoewel een zonthermisch systeem zowel voor ruimteverwarming als voor tapwatervoorziening mogelijk is, wordt dit niet gezien als onderdeel van het warmtepompstelsel. Een zonthermische voorziening die wordt gebruikt

om de temperatuur in de bron te verhogen (regeneratie) wordt wel als onderdeel van het warmtepompsysteem beschouwd.

Mogelijk is een voorziening voor passieve of vrije koeling opgenomen (8). Hiermee wordt met het koude water uit de bodemwarmtewisselaar zonder tussenkomst van de warmtepomp het gebouw gekoeld. Hierbij kan een warmtewisselaar (8a) worden toegepast om het gebouwcircuit en het broncircuit te scheiden.

Getoond is het warmtepompsysteem in verwarmingsbedrijf. Het bodemenergiesysteem kan ook in mechanische koeling worden gebruikt, dan wordt de koude zijde aan het gebouw en de warme zijde aan de bron gekoppeld. Vooral bij kleine systemen wordt de koeling passief geleverd, daarbij wordt de warmtepomp niet gebruikt. Het koude water uit de bron wordt dan direct over het afgiftesysteem geleid.

In alle gevallen is er sprake van een primaire regeling op temperatuur. De warmtepompcyclus wordt op de gewenste afgiftetemperatuur geregeld, waarbij de brontemperatuur wordt bewaakt op een grenswaarde. Deze in verwarmingsbedrijf niet lager zijn dan $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, in koelbedrijf niet hoger dan $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (injectietemperatuur)⁴. Wanneer vrije koeling wordt toegepast zal aan de temperatuurregeling aan de afgiftezijde door een toerengeregelde pomp of mengklep worden geregeld. In het regelsysteem kunnen ook andere kleppen of warmtewisselaars en andere appendages (filters, inregelkleppen, expansievoorziening) zijn opgenomen.

2.3 Definitie rendement, COP en SPF

Rendement is gedefinieerd als de verhouding tussen investering en opbrengst. In het kader van dit rapport gaat het om het energetische rendement van het bodemenergie-warmtepompsysteem. Dit rendement is de verhouding tussen de energetische opbrengst (geleverde warmte en koude) en energetische investering (energieverbruik, hulpenergie). Dit rendement kan op verschillende manieren worden uitgewerkt, bijvoorbeeld in de “Coefficient Of Performance” (COP) die vooral naar het vermogen van de warmtepomp en compressor kijkt onder evenwichtscondities. Daarnaast bijvoorbeeld de “Seizoens Prestatie Factor” (SPF) die gebaseerd is op de gedurende een maand of op seizoensbasis geleverde thermische energie en verbruikte elektrische energie.

2.3.1 COP, Coëfficiënt van Prestatie (Coefficient Of Performance).

De verhouding tussen het geleverde thermische vermogen en verrichte arbeid (hulpenergie: opgenomen elektrische vermogen, zoals compressor energie) wordt de Prestatie Coëfficiënt (Coefficient of Performance, COP) genoemd:

$$COP = \frac{Q_{th}}{E}$$

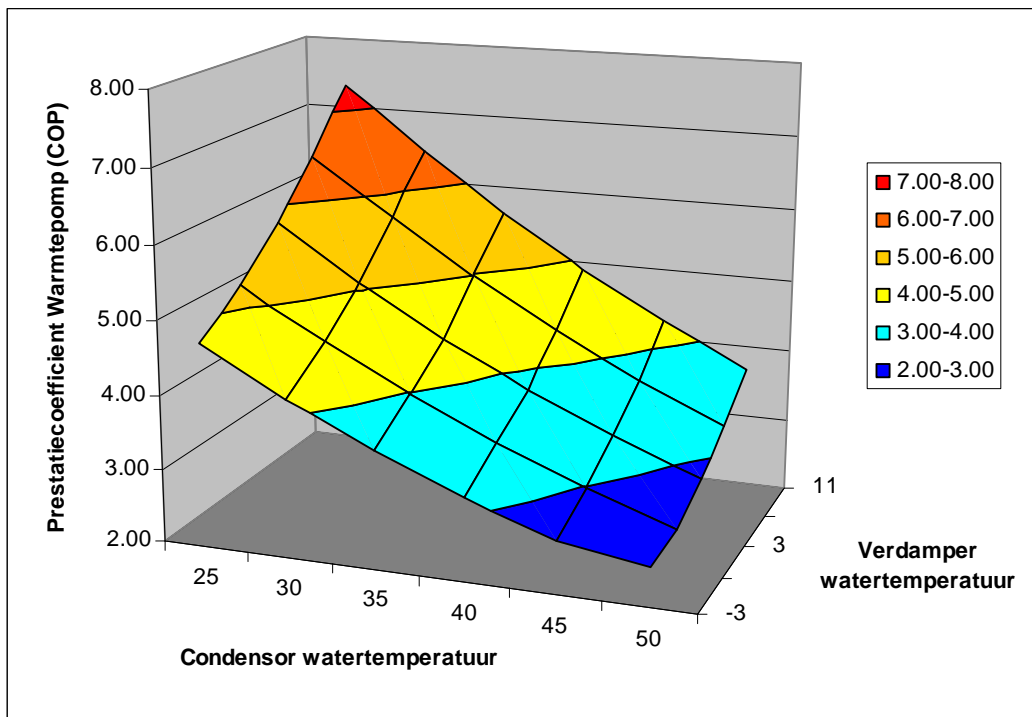
Q_{th} is hierbij het geleverde thermische vermogen (afgegeven warmte of koude) en E het opgenomen elektrische vermogen. Over het algemeen worden beiden eenheden in kW (kilowatt) gegeven.

Bijvoorbeeld, een warmtepomp heeft een verwarmend vermogen van 5,6 kW en de compressor neemt 1,3 kW elektrisch vermogen op, de COP is dan $5,6 / 1,3 = 4,3$. Voor koudelevering is het principe precies hetzelfde, alleen wordt de COP dan ook wel EER (Energy Efficiency Ratio) genoemd.

Voor de warmtepomp of koelmachine is deze COP door de fabrikant bepaald en opgegeven voor specifieke bedrijfscondities (lage en hoge temperatuur en temperatuurverschillen), de

⁴ Concept wijzigingsbesluit bodemenergie juni 2012, artikel 3.16j

testmethode is daarbij voorgeschreven en in normen en certificatie vastgelegd. In Europa is dit bijvoorbeeld *Eurovent* en normen als NEN-EN15879⁵, NEN-EN14511⁶, NEN-EN14825⁷. De metingen worden daarbij uitgevoerd door gecertificeerde meetinstituten zoals het warmtepompstestcentrum Töss (Zwitserland) of TNO (Nederland). Het rendement van de warmtepomp wordt vaak opgegeven bij normcondities "B5/W35" of "B0/W35", dit zijn de condities B(rine, van antivriesmiddel) ofwel aanvoertemperatuur verdamper 5 °C en W(ater) ofwel afgiftetemperatuur 35 °C. In werkelijkheid zijn de bedrijfscondities van de warmtepomp nooit zo constant, de bodemtemperatuur zal gedurende de winter en de verschillende jaren nogal variëren. Omdat het rendement van de warmtepomp zeer sterk van de temperatuurverschillen afhangt is dit van groot belang. Onderstaande figuur geeft de COP van een warmtepomp weer voor verschillende verdamper- condensortemperaturen.



Figuur 2. Relatie tussen prestatiecoëfficiënt van de warmtepomp (COP), condensor en verdamper watertemperatuur (in °C).

Uit figuur 2 blijkt dat de prestatiecoëfficiënt toeneemt bij toenemende brontemperatuur en afnemende condensortemperatuur. Dit is logisch aangezien de compressor dan een kleiner temperatuurverschil moet overbruggen (en daarom minder arbeid verricht).

⁵ Beproevingen en schatting van direct gekoppelde warmtemengpompen met elektrisch aangedreven compressoren voor het verwamen en/of koelen van een ruimte - Deel 1: Directe warmtemengpompen.

⁶ Luchtbehandelingsapparatuur, koeleenheden voor vloeistof en warmtepompen met elektrisch aangedreven compressoren voor verwarmen en koelen van een ruimte - Deel 2: Beproevingssomstandigheden.

⁷ Luchtbehandelingsapparatuur, koeleenheden voor vloeistof en warmtepompen met elektrisch aangedreven compressoren, voor ruimteverwarming en verkoeling - Beproeving en capaciteit op gedeeltelijke laadcondities

2.3.2 SPF, Seizoens Prestatie Coëfficiënt (Seasonal Performance Factor)

De prestatiecoëfficiënt zoals hierboven omschreven (COP) betreft een rendement voor de warmtepomp in verwarmings- of koelbedrijf onder evenwichtscondities en wordt bepaald in een laboratorium. In een werkelijke situatie zal, afhankelijk van het ontwerp en omgevingsfactoren, het rendement van de warmtepomp van dag tot dag, van maand tot maand en van jaar tot jaar verschillen. Het gemiddelde rendement van de warmtepomp over de seizoenen wordt de Seizoens Prestatie Factor (SPF) genoemd. In sommige literatuur wordt ook wel de term sCOP (seizoens COP) gebruikt.

De COP betreft normaal gesproken het vermogen (kilowatt [kW], Joule per seconde [J/s]) van het bodemenergie- warmtepompsysteem terwijl de SPF (sCOP) op de hoeveelheden energie (kilowattuur [kWh], megajoule [MJ]) gebaseerd is.

De SPF wordt over het algemeen per maand berekend op basis van totalen geleverde en verbruikte energie:

$$SPF = \frac{\sum_{t=1}^n Q_{th}}{\sum_{t=1}^n E}$$

Waarbij de energiestromen met een bepaalde frequentie in de tijd (t) worden gemeten en over de meetperiode (n) worden gesommeerd.

Bij systemen met een aanzienlijke overlap in verwarmen en koelen (bijvoorbeeld in voor en najaar s'ochtends verwarmingsvraag en s'middags koelvraag) kan de SPF voor verwarmingsbedrijf en koelbedrijf apart worden berekend.

2.4 Berekenen van energieverbruik en emissies

Het rendement (COP, SPF) van het warmtepompsysteem zegt iets over hoeveel hulpenergie die het warmtepompsysteem gebruikt om een bepaalde hoeveelheid warmte of koude op te wekken. Dit geeft nog geen inzicht in de hoeveelheid primair energie (energie die niet omgezet of getransformeerd is) die nodig is, die hangt namelijk ook af van het opwekrendement in de energiecentrales. De Primaire Energie Ratio (PER) geeft de verhouding tussen geleverde warmte en de totale hoeveelheid verbruikte primaire energie. Een PER groter dan 1,0 houdt in dat meer warmte geleverd is dan primaire energie geconsumeerd.

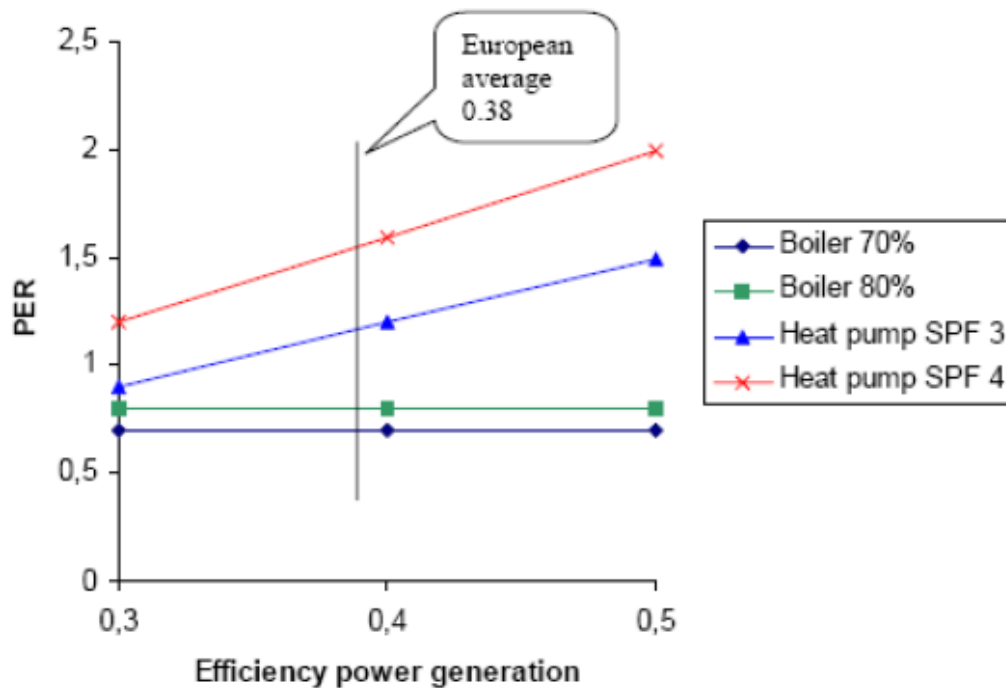
Het verschil is dat de COP/SPF bepaald worden op basis van de energie die de warmtepomp gebruikt (stroom "uit het stopcontact") terwijl de PER kijkt naar de energie nodig om die stroom in de centrale op te wekken en naar de eindgebruiker te transporteren. De PER geeft aan hoeveel primaire energie (aardgas, olie, kolen, nucleair, wind) er gebruikt wordt om een eenheid energie te leveren. De PER hangt daarom sterk af van de mix van primaire brandstoffen die gebruikt wordt (waarbij ook hernieuwbare bronnen betrokken worden) en kan van jaar tot jaar verschillen. Een typische opwekwaarde in 1965 was 32%, in 2003 42,5%. Op dit moment worden opwekrendementen van 50% of meer gerealiseerd (bron: ENECO).

De PER van de warmtepomp kan worden berekend door de prestatiecoëfficiënt met het opwekrendement te vermenigvuldigen. Voor een elektrisch aangedreven warmtepomp:

$$PER_{wp} = \eta_{el} \frac{Q_{th}}{E}$$

Bijvoorbeeld, een warmtepomp levert 5,6 kW aan warmte en neemt daarvoor 1,3 kW elektrisch vermogen op, de COP is dan $5,6 / 1,3 = 4,30$. Met een η_{el} (opwekrendement elektra) van 0,4 wordt de PER: $0,4 * 4,30 = 1,72$.

Een voorbeeld van de PER voor warmtepompen en gasgestookte ketels is gegeven in figuur 3



Figuur 3. Relatie tussen PER en warmtepomp/gasgestookte ketel efficiëntie en efficiëntie elektriciteitsopwekking. Bron: Forsén M. (2005), "Heat pumps – Technology and environmental impact: Part I", Swedish Heat Pump Association (SVEP), member of the European Heat Pump Association (EHPA), July 2005, background report for the development of EU Ecolabel for heat pumps.

Naast de PER, waarmee het primaire energieverbruik van verschillende systemen kan worden vergeleken, kan ook de hoeveelheid vermeden CO₂ emissies berekend worden. Hiervoor worden CO₂ factoren gebruikt, uitgedrukt in kilogram of ton CO₂ per eenheid verbruikte energie. Voor aardgas kunnen we deze baseren op de CO₂-standaard emissiegasfactor (f_{CO_2-GAS}) zoals die wordt gepubliceerd in de Staatscourant ten bate van de emissiehandel. Voor 2012 bedraagt deze 56,5 kg/GJ of 203,4 kg/MWh (Staatscourant 186, 02/01/2012).

Voor de CO₂ factor voor elektriciteitsopwekking moet weer rekening gehouden worden met de mix van verschillende primaire energiebronnen en het totale opwekrendement. In 2011 is een schatting van een algemene CO₂ factor (f_{CO_2-ELEK}) voor elektriciteit 13,6 kg/GJ of 490 kg/MWh (Milieubarometer Stichting Stimular). Daarbij is het opwekrendement (in dat geval 0,415) verdisconteerd.

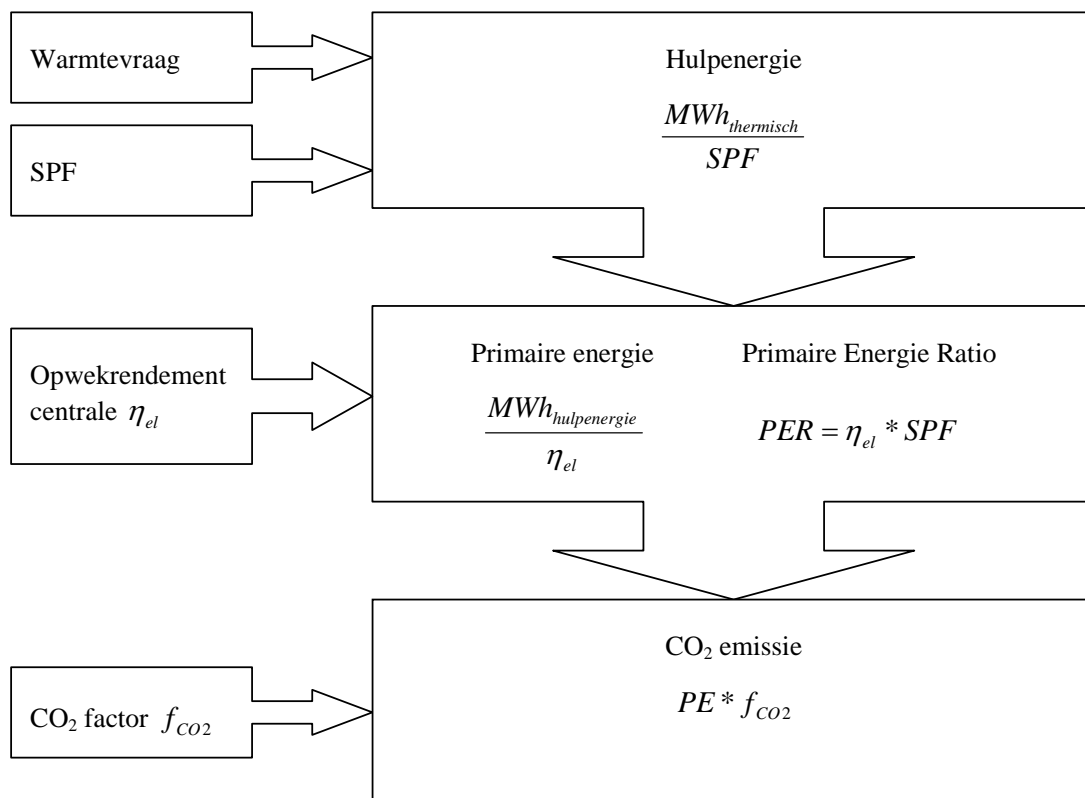
2.4.1 Rekenvoorbeeld

Hier geven we een rekenvoorbeeld waarbij een warmtepompsysteem wordt vergeleken met een systeem met conventionele verwarming en koeling. Daarbij worden de hoeveelheden bespaarde primaire energie en vermeden CO₂ emissies berekend.

Voor de voorbeeldberekening wordt het referentietype A1 (Nieuwbouw, rijtjeswoning) uit het rapport "Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen" (GHNL 011103) gebruikt. Een dergelijke woning heeft een jaarlijkse warmtevraag van ongeveer 6,5 MWh en een koudevraag van 1,9 MWh.

Voor de warmtepomp in verwarmingsbedrijf nemen we een SPF van 4,20 aan, voor de conventionele gasgestookte ketel 0,80. Voor passief koelbedrijf nemen we een SPF van 25 (gebaseerd op een 0,1 kW circulatiepomp en 750 vollasturen koelbedrijf). Voor actieve koeling (split unit, conventionele airconditioning) nemen we een SPF van 2,5. Opwekrendement van de centrale wordt op 0,4 gesteld, CO₂ factor 203,4 kg/MWh (gas) en 490 kg/MWh (elektriciteit).

Hoe de verschillende indicatoren samenhangen is in onderstaand stroomschema weergegeven.



Hoeveelheid hulpenergie voor warmte- en koudelevering:

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

Bij monitoren van een systeem zal de hoeveelheid geleverde thermische energie en hoeveelheid verbruikte energie gemeten zijn. Het rendement wordt dan berekend door:

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

Hulpenergie voor warmtelevering door het bodemenergie- warmtepompsysteem:

$$\frac{6,50}{4,20} = 1,55MWh$$

Hulpenergie voor warmtelevering door de gasgestookte ketel: $\frac{6,50}{0,80} = 8,13MWh$

Hulpenergie voor koudelevering door het bodemenergiesysteem: $\frac{1,90}{25,00} = 0,08MWh$

Hulpenergie voor koudelevering door de splitunit: $\frac{1,90}{2,50} = 0,76MWh$

1. Hoeveelheid primaire energie en Primary Energie Ratio

$$\text{Primaire Energie: } PE = \frac{MWh_{hulpenergie}}{\eta_{el}}$$

Primaire energie voor warmtelevering door het bodemenergie- warmtepompsysteem:

$$\frac{1,55}{0,40} = 3,88MWh$$

Primaire energie voor warmtelevering door gasgestookte ketel: $\frac{8,13}{1,00} = 8,13MWh$

Primaire energie voor koudelevering door het bodemenergiesysteem: $\frac{0,08}{0,40} = 0,20MWh$

Primaire energie voor koudelevering door het splitunit: $\frac{0,76}{0,40} = 1,90MWh$

De Primaire Energie Ratio: $PER = \eta_{el} * SPF$

PER bij warmtelevering door het bodemenergie- warmtepompsysteem: $0,40 * 4,20 = 1,68$

PER bij warmtelevering door het gasgestookte ketel: $1 * 0,80 = 0,80$

PER bij koudelevering door het bodemenergiesysteem: $0,40 * 25,00 = 10,00$

PER bij koudelevering door de splitunit: $0,40 * 2,50 = 1,00$

2. CO₂ emissies

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

of

$$CO_2 = f_{CO_2-ELEK} * MWh_{hulpenergie}$$

CO₂ emissie bij warmtelevering door het bodemenergie- warmtepompsysteem:
1,55 * 490 = 759,50 kg.

CO₂ emissie bij warmtelevering door het gasgestookte ketel: 8,13 * 203,40 = 1653,64 kg

CO₂ emissie bij koudelevering door het bodemenergiesysteem: 0,08 * 490,00 = 39,20 kg.

CO₂ emissie bij koudelevering door conventionele airconditioning:
0,76 * 490,00 = 372,40 kg.

3 RENDEMENT EN SYSTEEMGRENZEN

In figuur 1 (§2.1) zijn de diverse onderdelen van een gesloten bodemenergie - warmtepompsysteem weergegeven en in hoofdstuk 2 zijn de basisvergelijkingen voor het berekenen van het rendement (COP) en seizoensprestatie (SPF) gegeven. Bij het bepalen van het rendement of de SPF kunnen verschillende energieverbruikers al dan niet worden meegewogen. Het is van belang welke systeemgrenzen tussen de verschillende stroomverbruikers (pompen, compressoren) worden aangehouden.

Het rendement (COP) van de warmtepomp zoals opgegeven door de fabrikant zal de verhouding tussen geleverde warmte en door de compressor opgenomen elektrische energie betreffen. Deze waarde is prima te gebruiken om verschillende warmtepompen met elkaar te vergelijken. Om een warmtepompsysteem met een conventioneel systeem te vergelijken zal waarschijnlijk ook de bronpompenergie meegewogen worden, terwijl voor de evaluatie van de energieprestatie van een gebouw alle elektraverbruikers in het warmtepompsysteem meegewogen dienen te worden.

Op basis van figuur 1 is een indeling met verschillende systeemgrenzen opgesteld. Voor een groot deel is dit gebaseerd op het SEPEMO⁸ project.

Het SEPEMO-build (**S**easonal **P**erformance Factor and **M**onitoring for heat pump systems in the building sector) is een Europees project dat een algemene methodiek voor het omschrijven, meten en monitoren van warmtepomp installaties heeft ontwikkeld. De hieronder uitgewerkte SPF definities voor verschillende systeemgrenzen zijn uit dit project overgenomen (voor bodemgekoppelde water-water warmtepompen). Waar nodig zijn de definities aangevuld waarbij dezelfde systematiek als in SEPEMO is toegepast.

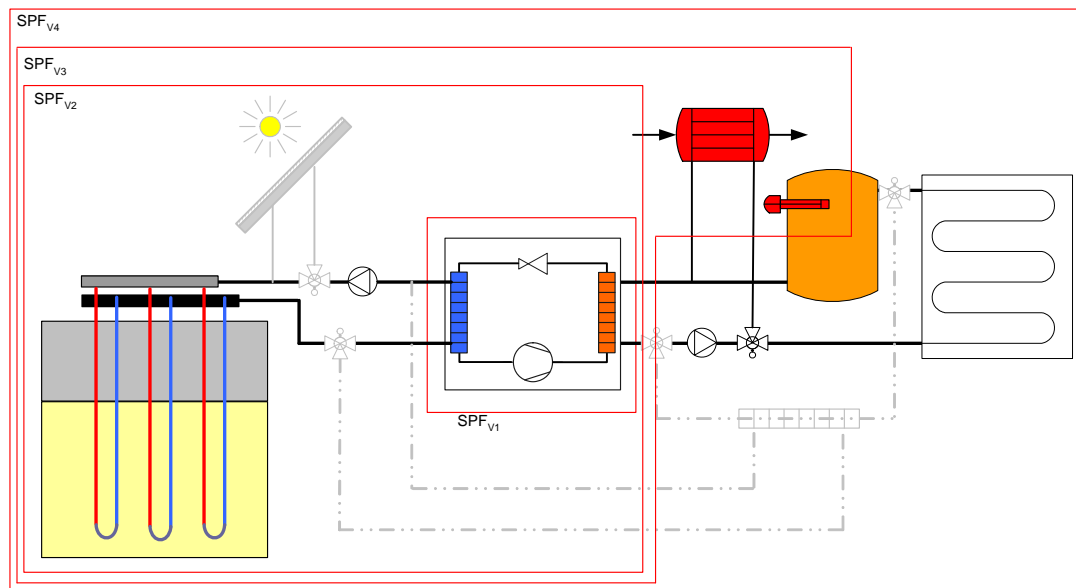
De basisvraag voor de SEPEMO indeling is: welke hoeveelheid thermische energie en welke hoeveelheid verbruikte energie nemen we mee in de bepaling van het rendement? In het warmtepompsysteem zijn verschillende energieverbruikers (compressor, circulatiepompen) en afhankelijk van het doel kan het van belang zijn hiertussen onderscheid te maken. Ook kan de afgegeven thermische energie, zoals die voor ruimteverwarming of tapwatervoorziening, met een ander deelsysteem of met een ander rendement opgewekt worden. De volgende eenheden worden gedefinieerd:

- Q_W : Hoeveelheid warmte door de warmtepomp opgewekt voor ruimteverwarming
- Q_T : Hoeveelheid warmte door de warmtepomp opgewekt voor tapwater
- Q_E : Hoeveelheid warmte opgewekt door het elektrische element voor tapwater of ruimteverwarming.
- Q_K : Hoeveelheid koude door de warmtepomp opgewekt voor ruimtekoeling
- Q_{PK} : Hoeveelheid passieve koeling door de bron geleverd voor ruimtekoeling
- E_c : Elektrische energie verbruikt door de compressor (1a)
- E_{bp} : Elektrische energie verbruikt door de bronpomp (2)
- E_{gb} : Elektrische energie verbruikt door de gebouw pomp (3)
- E_e : Elektrische energie verbruikt door het elektrische element (4a)
- E_a : Additionele elektrische energie verbruikt in gebouw ten behoeve van klimatisatie warmtepompsysteem (bijvoorbeeld ventilatoren luchtbehandeling)

⁸ <http://www.sepemo.eu/>

Binnen SEPEMO worden ook luchtwarmtepompen beschouwd en wordt op sommige plaatsen ook onderscheid in diverse gebouwssystemen gemaakt. In dit rapport is de SEPEMO systematiek zo ver vereenvoudigd dat deze eenvoudiger voor de gesloten bodemenergie - warmtepompsystemen in Nederland kan worden toegepast.

3.1 SEPEMO seizoenfactoren Verwarming (V)



Figuur 4. Systeemgrenzen voor bepalen diverse rendementen, verwarmingsbedrijf.

SPF_{V0} : Passieve verwarming, is niet in SEPEMO gedefinieerd. Alleen de circulatiepomp(en) die het water of water/antivriescemsel door de bron en het afgiftesysteem circuleren. Indien er geen warmtewisselaar wordt gebruikt om het bron- en gebouw-circuit te scheiden wordt alleen de bronpomp meegerekend. Deze SPF wordt voor de volledigheid gegeven, in de praktijk komt deze niet of nauwelijks voor. In Canada en Duitsland zijn wel enkele systemen die passieve verwarming toepassen (met seizoenopslag in het bodemenergiesysteem).

$$SPF_{V0} = \frac{Q_{PV}}{E_{bp} + E_{gb}}$$

SPF_{V1} : Alleen de warmtepomp, rendement van de compressiecyclus. In de praktijk betekent dit de afgegeven condensorenergie (voor ruimteverwarming en tapwater) gedeeld door de door de compressor opgenomen energie. De SPF_{V1} is bijna gelijkwaardig aan de EN 14511⁹, deze norm neemt namelijk een klein deel pompenergie (nodig om het drukverlies in de verdampers van de warmtepomp te compenseren) mee.

$$SPF_{V1} = \frac{Q_w + Q_r}{E_c}$$

SPF_{V2} : Warmtepomp en alle onderdelen die nodig zijn om de bronenergie voor de warmtepomp ter beschikking te stellen. In de praktijk betekent dit: de afgegeven condensorenergie (voor ruimteverwarming en tapwater) gedeeld door de door de compressor en bronpomp opgenomen

⁹ Luchtbehandelingsapparatuur, koeleenheden met vloeistof en warmtepompen met elektrisch aangedreven compressoren voor ruimteverwarming en voor koeling

energie. Opmerking: het rendement zoals omschreven in de EN 14511 ligt tussen SPF_{V1} en SPF_{V2} in.

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

SPF_{V3} : Warmtepomp en alle onderdelen die nodig zijn om de bronenergie voor de warmtepomp ter beschikking te stellen en mogelijk geïnstalleerde backup-verwarmingselement. In de praktijk betekent dit: de afgegeven condensorenergie (voor ruimteverwarming en tapwater) gedeeld door de door de compressor, bronpomp en het elektrische element opgenomen energie. Volgens SEPEMO kan deze SPF gebruikt worden om met conventionele systemen te vergelijken (het omvat het gehele warmtepompsysteem minus afgiftesysteem). Deze SPF is gelijkwaardig met de EN 5316-4-2¹⁰. In Nederland wordt voor de verhouding warmtepomp/elektrisch element ook wel de *Betafactor* gebruikt.

$$SPF_{V3} = \frac{Q_W + Q_T + Q_E}{E_c + E_{bp} + E_e}$$

SPF_{V4} : Warmtepomp en alle onderdelen die nodig zijn om de bronenergie voor de warmtepomp ter beschikking te stellen, mogelijk geïnstalleerde backup-verwarmingselement en alle onderdelen die nodig zijn om de bronenergie ter beschikking te stellen aan de warmteput (heat sink). In de praktijk betekent dit: de afgegeven condensorenergie (voor ruimteverwarming en tapwater) gedeeld door de door de compressor, bronpomp, het elektrische element, pomp afgiftesysteem en mogelijke ventilatoren/ventilatorconvectoren in het afgiftesysteem opgenomen energie.

$$SPF_{V4} = \frac{Q_W + Q_T + Q_E}{E_c + E_{bp} + E_e + E_{gb} + E_a}$$

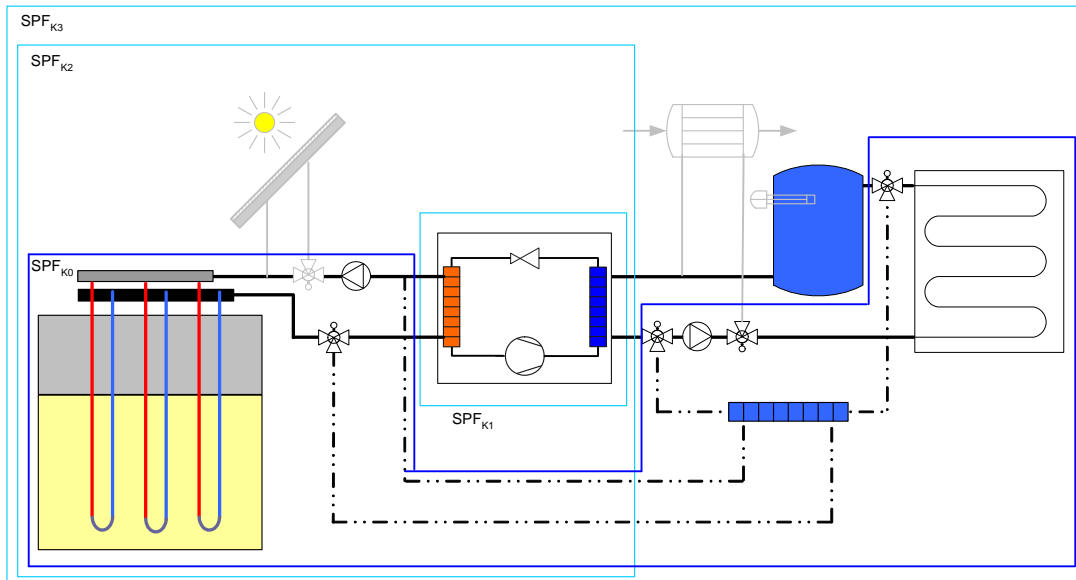
Enkele opmerkingen met betrekking tot SEPEMO: allereerst zijn tot op heden geen zonnecollectoren in SEPEMO opgenomen. Deze kunnen voor directe verwarming (tapwater, ruimteverwarming) worden toegepast, maar worden dan niet tot het warmtepompsysteem gerekend. Ook kunnen de zonnecollectoren gebruikt worden voor regeneratie van de bron, daardoor wordt het rendement beter maar wordt ook meer hulpenergie verbruikt. Verder zou ook vrije verwarming mogelijk zijn waarbij de warmte (op hoge temperatuur, tot ± 60 °C) in de bodem wordt opgeslagen, in Canada en Duitsland wordt dat wel toegepast, in Nederland is dat volgens de wetgeving op dit moment niet mogelijk (beperking injectietemperatuur < 30 °C).

Verder kan worden opgemerkt dat, in verwarmingsbedrijf, de circulatiepompen een nuttige bijdrage leveren: een deel (ongeveer 80%) van de pompenergie wordt omgezet in warmte. Zolang het om bodemenergie-warmtepompsystemen gaat met relatief kleine vermogens kan deze bijdrage buiten beschouwing gelaten worden. Bij de gebruikelijke vermogens van de toegepaste pompen zal de bijdrage aan het opwarmen van de vloeistof in de orde van 2% - 3% liggen¹¹.

¹⁰ Verwarmingssystemen in gebouwen - Berekeningsmethode voor de systeemenergiebehoefte en het systeemrendement - Deel 4-2: Warmteopwekkers voor ruimteverwarming, warmtepompsystemen

¹¹ Voor een warmtepomp met een thermisch vermogen van 6kW zal de pompenergie (bronpomp + afgiftepomp) ongeveer 100 - 200 W bedragen. De maximale bijdrage aan verwarming is dan $100 * (0,8 * 0,2) / 6 = 2,7\%$. Hierbij wordt de bronpomp meegerekend omdat hierdoor de brontemperatuur verhoogt en daarmee ook het rendement van de warmtepomp.

3.2 SEPEMO prestatiefactoren Koeling (C, Cooling)



Figuur 5. Systeemgrenzen voor bepalen diverse rendementen, koelbedrijf.

SPF_{K0} : Passieve koeling, is niet in SEPEMO gedefinieerd. Alleen de circulatiepomp(en) die het water of water/antivriesmengsel door de bron en het afgiftesysteem circuleren. Indien er geen warmtewisselaar wordt gebruikt om het bron- en gebouwcircuït te scheiden wordt alleen de bronpomp meegerekend.

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

SPF_{K1} : Alleen de warmtepomp, rendement van de compressiecyclus. In de praktijk betekent dit: de afgegeven verdamperenergie (voor koeling) gedeeld door de door de compressor opgenomen energie. De SPF_{K1} is bijna gelijkwaardig aan de EN 14511, deze norm neemt namelijk een klein deel pompenergie (nodig om het drukverlies in de condensor van de warmtepomp te compenseren) mee.

$$SPF_{K1} = \frac{Q_K}{E_c}$$

SPF_{K2} : Warmtepomp en alle onderdelen die nodig zijn om de thermische energie van de warmtepomp aan de bron af te staan. In de praktijk betekent dit: de afgegeven verdamperenergie (voor koeling) gedeeld door de door de compressor en bronpomp opgenomen energie. Opmerking: het rendement zoals omschreven in de EN 14511 ligt tussen SPF_{K1} en SPF_{K2} in.

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

SPF_{K3} : Warmtepomp en alle onderdelen die nodig zijn om de thermische energie van de warmtepomp aan de bron af te staan en alle onderdelen die nodig zijn om de koude aan het gebouw af te staan. In de praktijk betekent dit: de afgegeven verdamperenergie (voor koeling) gedeeld door de door de compressor, bronpomp, pomp afgiftesysteem en mogelijke

ventilatoren/ventilatorconvectoren in het afgiftesysteem opgenomen energie (merk op dat SPF_{K3} gelijkwaardig is aan SPF_{V4}).

$$SPF_{K3} = \frac{Q_K}{E_c + E_{bp} + E_{gb} + E_a}$$

3.3 Totale rendement

Binnen het bodemenergie - warmtepompsysteem zijn verschillende prestatiefactoren gedefinieerd op basis van diverse systeemgrenzen. Er is daarbij een tweedeling te maken in de prestatie bij verwarmingsbedrijf en de prestatie bij koelbedrijf. In verwarmingsbedrijf zou ook het rendement bij ruimteverwarming en voor tapwatervoorziening (die lager is omdat tapwater op een hogere temperatuur gemaakt moet worden) nog gesplitst kunnen worden.

Naast de verschillende detailrendementen kan ook een algehele prestatiefactor (of rendement) voor het bodemenergiesysteem gedefinieerd worden. Dit is de totale hoeveelheid geleverde warmte en koude in verhouding tot de totale hoeveelheid geconsumeerde energie:

$$SPF_{TOT-VK3} = \frac{Q_W + Q_T + Q_{PK} + Q_K}{E_c + E_{bp} + E_e + E_{gb} + E_a}$$

3.4 Bepalen van het rendement

3.4.1 Berekenen van het (ontwerp)rendement (SPF)

We geven hier een (vereenvoudigde) methode voor het bepalen van het ontwerprijndement op basis van gegevens die in een gebruikelijk ontwerp van een bodemenergie-warmtepompsysteem beschikbaar zijn. Dit zijn:

1. Warmte- en koudelevering aan het gebouw (MWh). Deze zijn per maand beschikbaar, de warmtelevering is daarbij het totaal aan verwarmings- en tapwatervraag.
2. Betafactor (β) van het warmtepompsysteem, hiermee wordt de hoeveelheid warmte die met het elektrische element wordt opgewekt bepaald.
3. Vermogen (condensorvermogen en verdampervermogen, compressor vermogen) van de warmtepomp bij normcondities of temperatuurafhankelijk. Indien alleen normcondities beschikbaar zijn wordt een temperatuurafhankelijk rendement bepaald op basis van een 3% rendementsverandering per graad temperatuurverandering (aan de verdamper of condensorzijde).
4. Bronvermogen passieve koeling. Deze wordt uit het bronontwerp afgeleid.
5. Q_p , Pompenergie, deze wordt bepaald aan de hand van de karakteristiek van de toegepaste pomp, het debiet en drukverlies over het hydraulische circuit.
6. Brontemperatuur per maand. Het betreft hier de gemiddelde intrede temperatuur naar de warmtepomp (gemiddeld pieklastbedrijf).

Hiermee wordt bepaald (per maand):

1. Draaiuren bronpomp verwarmingsbedrijf warmtepomp en pompenergie, hierbij wordt de betafactor gebruikt om het aandeel (draaiuren) van de warmtepomp en circulatiepomp te bepalen

$$U_{pomp-maand} = \frac{\beta * Q_{W-maand}}{kW_{condensor}}$$

$$E_{pomp-maand} = U_{pomp-maand} * kW_{pomp}$$

2. Draaiuren gebouw pomp verwarmingsbedrijf warmtepomp en pompenergie, hierbij wordt de betafactor gebruikt om het aandeel (draaiuren) van de warmtepomp en circulatiepomp te bepalen

$$U_{pomp\text{-}maand} = \frac{\beta * Q_{W\text{-}maand}}{kW_{condensor}} \quad E_{pomp\text{-}maand} = U_{pomp\text{-}maand} * kW_{pomp}$$

3. Verbruik elektrisch verwarmingselement

$$E_e = (1 - \beta) * Q_{W\text{-}maand}$$

4. Draaiuren bron (of gebouw) pomp¹² koelbedrijf warmtepomp en pompenergie

$$U_{pomp} = \frac{Q_{K\text{-}maand}}{kW_{verdamper}} \quad E_{pomp\text{-}maand} = U_{pomp\text{-}maand} * kW_{pomp}$$

5. Draaiuren bron (of gebouw) pomp passief koelbedrijf:

$$U_{pomp} = \frac{Q_{PK\text{-}maand}}{kW_{bron}} \quad E_{pomp\text{-}maand} = U_{pomp\text{-}maand} * kW_{pomp}$$

6. Warmtepomp rendement verwarmingsbedrijf, hulpenergie compressor wordt bepaald

- a. Rendement bij gemiddelde brontemperatuur. Bijvoorbeeld: COP B0/W35 4,5. De werkelijke brontemperatuur September bij gemiddeld pieklastbedrijf +5 °C, met als uitgangspunt 3% rendementseffect per K: COP_{maand} wordt 4,5 + (5,0*0,03*4,5) = 5,18. (Bij tapwaterlevering wordt dit analoog berekend).

- b. Compressor hulpenergie:

$$E_{C\text{-}maand} = \frac{\beta * Q_{W\text{-}maand}}{COP_{maand}}$$

Voor mechanisch koelbedrijf wordt dit op dezelfde wijze bepaald.

De ontwerp SPF kan nu berekend worden:

$$SPF_{TOT\text{-}vk3} = \sum_{maand=1}^{12} \frac{Q_{W\text{-}maand} + Q_{K\text{-}maand} + Q_{PK\text{-}maand}}{E_{bp\text{-}maand} + E_{gb\text{-}maand} + E_{e\text{-}maand} + E_{c\text{-}maand}}$$

3.4.2 Monitoren van het rendement

Om het rendement van een bodemenergie- warmtepompinstallatie te kunnen meten (monitoren) moeten de geleverde warmte en koude en de verbruikte hulpenergie gemeten worden.

¹² De pompen kunnen wat langer draaien dan de compressor (voor- en na-bedrijf ter beveiliging). Bij een systeem met een opslag in een buffer kan de gebouwzijdige pomp ook voor het afgeven van de opgeslagen warmte worden ingezet en zal deze pomp meer draaiuren kunnen hebben.

De warmte en koude wordt met een warmtemeter bepaald, dit is een apparaat wat het debiet en temperatuurverschil over een circuit meet en deze omrekent naar energie. Bij de keuze van de meter moet worden opgelet dat deze:

- a) zowel warmte als koude kan meten en apart registreert
- b) kan werken met het toegepaste circuliatiemedium (water of antivriesmengsel)

Voor het meten van elektraverbruik zijn verschillende energiemeters in de handel. Het voor verschillende meetperioden (bijvoorbeeld maandelijks) bijhouden van verbruik is niet met alle meters standaard mogelijk.

Deze meters worden naar internationale standaarden gefabriceerd en hebben een gecontroleerde nauwkeurigheid.

De noodzakelijke instrumentatie hangt vooral af van welke deel-rendementen allemaal tegelijkertijd in kaart moeten worden gebracht. Minimaal is één warmte/koude meter en één elektrische energiemeter nodig. De warmte/koude meter wordt zodanig in het systeem opgenomen dat alle door het bodemenergiesysteem aan het gebouw geleverde warmte en koude gemeten wordt. De elektrische energiemeter wordt zo met het systeem geïntegreerd dat het elektrische verbruik van de compressor, bronpomp en, indien gewenst, elektrisch bijstookelement en gebouwzijdige pomp gemeten worden.

4 Welke systeemgrens en welk rendement?

4.1 Welke systeemgrens?

De vraagstelling is onder andere welke eisen aan het rendement van gesloten bodemenergiesystemen gesteld kunnen worden, en op welk rendement/installatiedeel (zie hoofdstuk 3) dat betrekking zou moeten hebben. Omdat warmtepompsystemen met name gestimuleerd worden vanwege het duurzame energiekarakter ligt het voor de hand om een vergelijking te maken met conventionele verwarmings- en koelsystemen. Het beste zou zijn om het totale rendement van beide typen systemen te kunnen vergelijken. Een goed ontworpen lage temperatuur afgifte systeem kan bijvoorbeeld ook in een conventioneel systeem al tot lager energieverbruik leiden. Dat zal in de praktijk lastig zijn omdat de gegevens om dat te bepalen ontbreken, zeker wanneer een vergelijking met een conventioneel systeem "op papier" wordt gemaakt. Een alternatief is om alleen die energieverbruikers mee te nemen die voor het opwekken van de warmte en koude nodig zijn. Er wordt dan aangenomen dat de gebouwszijdige distributie tussen conventionele en warmtepompsystemen gelijkwaardig is. Deze laatste optie, waar de energie van de bronpompen wel wordt meegewogen, is de meest gebruikelijke maat voor het vergelijken van conventionele en warmtepomp systemen en wordt ook gebruikt voor het bepalen van de verwachte besparingen. Dit komt ook het beste overeen met de definitie in het wijzigingsbesluit: een bodemenergiesysteem is het ondergrondse deel inclusief de bovengrondse delen die direct onderdeel zijn van het systeem.

Optie 1, meest eenvoudige wijze van bepalen en vergelijken rendement.

Het meest eenvoudig is het rendement (COP) van de warmtepompsystemen conform de EN 14511 als maatgevend te nemen. Deze rendementen worden voor alle warmtepompen op dezelfde wijze bepaald, zijn standaard beschikbaar en er kunnen systemen onderling mee vergeleken worden. Nadelen zijn dat het ontwerp van de gesloten bron, de noodzakelijke pompenergie en andere bedrijfscondities niet goed worden verdisconteerd. Ook zal koeling (passieve koeling) hier niet in worden meegewogen. Bij systemen met temperatuurregeneratie van de bodem door middel van zonthermische panelen kan de daarvoor nodige pompenergie niet worden meegerekend. Het temperatuureffect kan wel worden geschat door de COP bij een hogere brontemperatuur te nemen.

Optie 2, meer realistische wijze van bepalen en vergelijkende rendement

Deze optie beoogt het rendement van een werkelijk gerealiseerd of te realiseren systeem te bepalen. De bepaling van dit rendement kan gebaseerd worden op het ontwerp van dat systeem (bronontwerp, energievraagpatroon gebouw, pompenergie en temperatuurafhankelijke rendement van de warmtepomp). De SPF_{V2} (compressorenergie en energie bronpomp) komt het beste overeen met de definitie van het Wijzigingsbesluit, voor koeling wordt dan SPF_{K0} en SPF_{K2} (passieve koeling en mogelijke actieve koeling) bepaald. Opgemerkt moet worden dat SPF_{V2} het eventuele elektrische element niet meeweegt, dat is in lijn met de definitie van het Wijzigingsbesluit maar maakt een vergelijking met conventionele systemen lastiger.

Het meten van dit rendement vereist tenminste één warmte/koude meter die de geleverde warmte en koude registreert en één energie (elektra)meter die de elektrische energie van de bronpomp en compressor registreert.

4.2 Welk rendement?

Naast het bepalen van welke systeemgrens gekozen wordt voor het bepalen van het rendement, is ook de vraag of hier een waarde (eis) aan opgelegd kan worden.

Om hierin een richting te kunnen bepalen wordt hieronder ingegaan op de theoretische bovengrens is (Carnot rendement), welke eisen aan het minimum rendement gesteld kunnen worden en waar op dit moment de warmtepompsystemen in de markt zich bevinden.

4.2.1 Bovengrens aan rendement

De warmtepomp werkt volgens een gas-compressiecyclus. Carnot¹³ heeft een model ontwikkeld om de theoretische bovengrens voor het rendement van de omzetting van warmte in arbeid. Deze bovengrens wordt bepaald als functie van de hoogste en laagste temperaturen in het systeem:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_h}{T_h - T_l}$$

Hierbij zijn alle temperaturen (T) in Kelvin gegeven. We kunnen vrij eenvoudig de maximaal haalbare rendementen bepalen (tabel 1).

	Condensor temperatuur				
		35	40	45	50
Verdamper temperatuur	-5	7,7	7,0	6,4	5,9
	0	8,8	7,8	7,1	6,5
	5	10,3	8,9	8,0	7,2
	10	12,3	10,4	9,1	8,1

Tabel 1. Theoretische maximale rendement van de warmtepomp (Carnot rendement).

De Carnot cyclus heeft betrekking op de cyclus in de warmtepomp (gas-compressiecyclus) en betreft alleen het rendement wanneer gekeken wordt naar de temperatuurverschillen tussen koude en warme zijde. Er zijn twee situaties waarbij het Carnotrendement niet representatief is:

1. Wanneer passieve koeling (of verwarming) wordt toegepast is er geen sprake van een gas-compressiecyclus. Alleen de energie van de circulatiepomp wordt gebruikt en het rendement kan hoger zijn dan het Carnotrendement uit tabel 1.
2. Wanneer een systeem wordt toegepast wat een gebouw tegelijkertijd kan verwarmen en koelen (bijvoorbeeld: in voor- of najaar kan gelijktijdige vraag optreden, of in de winter bij een gebouw waar ook een warmtebron zoals een computer serverruimte aanwezig is). Zowel de koude (verdamper) als warme (condensor) zijde wordt dan benut.

4.2.2 Ondergrens aan rendement

Als ondergrens voor het rendement wordt die waarde gebruikt waarbij de warmtepomp, in vergelijking met andere systemen, geen primaire energie meer bespaart (bijvoorbeeld evenveel hulpenergie verbruikt als een gasketel). De Europese Gemeenschap heeft deze waarde bepaald (RES directive, 2009/28/EC annex VII) op:

$$E_{RES} = Q_{bruikbaar} * (1 - 1/SPF)$$

¹³ Carnot, Sadi, 1824. Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance. Paris: Bachelier.

Een warmtepomp (met willekeurig welke bron) wordt niet als een hernieuwbare bron van energie beschouwd indien het rendement kleiner is dan dit getal. De Commissie geeft aan dat het minimum rendement van een warmtepomp moet voldoen aan:

$$SPF > 1,15 * 1/\eta$$

waarbij η de verhouding is tussen de totale productie van elektriciteit en de totale primaire energie consumptie voor de productie van elektriciteit (gebaseerd op Europees gemiddelde volgens Eurostat). Wanneer we het opwekrendement van de energieopwekking zoals in paragraaf 2.4 gegeven gebruiken, dan is de minimale SPF die door een warmtepompsysteem bereikt moet worden:

$$SPF > 1,15 * 1/0,4 > 2,87$$

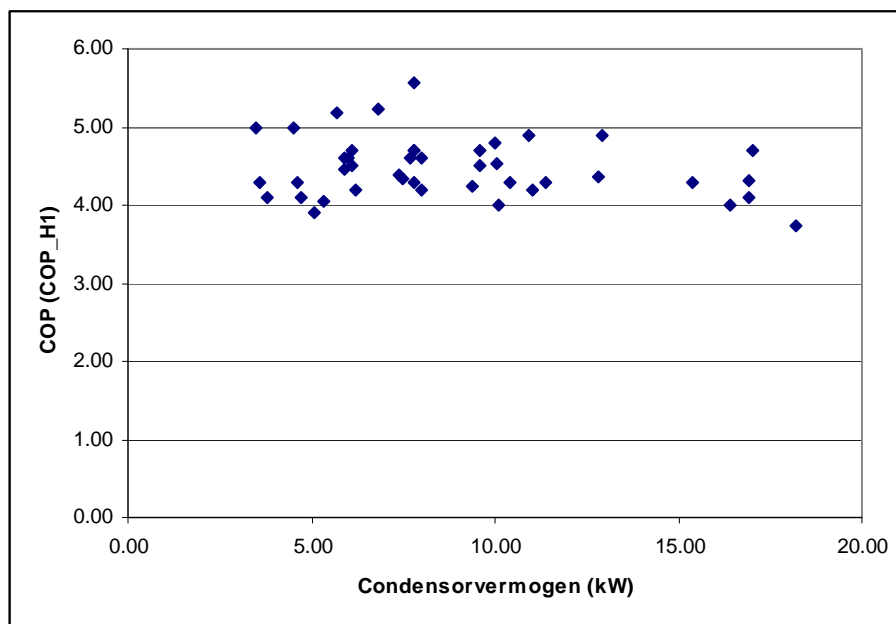
Vergelijken we voor ruimteverwarming een conventionele ketel met een rendement van 80% (PER = 0,8) dan bespaart de warmtepomp 30% primaire energie, bij een SPF van 3,5 wordt 43% en bij een SPF van 4,5 wordt 56% primaire energie bespaard.

De absolute ondergrens voor de SPF, waar een warmtepompsysteem bij ruimteverwarming niet meer rendeert, is 2,0 (bij een opwekrendement van 0,4 en vergeleken met een ketelrendement van 0,8).

4.3 Referentiesystemen

Voor een aantal veel voorkomende warmtepompen (met een condensorvermogen tot 20 kW) is via de websites van fabrikanten informatie verzameld over het vermogen en COP_{VI} van de warmtepompen. De gebruikte gegevens zijn allen gebaseerd op de EN14511 norm (bij B0/W35, met een ΔT van 5K). Gegevens van de volgende fabrikanten is gebruikt: Danfoss, ITHO, Nathan, NIBE, Stiebel-Eltron, Techneco, Vaillant en Viessmann. De rendementen (COP_{VI}) zijn in figuur 6 weergegeven.

De gemiddelde COP_{VI} van 51 systemen bij verwarming is $4,4 \pm 0,43$. Er zijn duidelijk enkele uitbeeters, een aantal warmtepompsystemen heeft een COP groter dan 5,0 en vier scoren 4,0 of lager.



Figuur 6. Efficiëntie van diverse warmtepompen conform EN 14511 (B0W35).

5 Samenvatting en aanbevelingen

5.1 Samenvatting

Bodemenergiesystemen worden gezien als een hernieuwbare energiebron en hebben een grote potentie voor het vervangen van primaire energie door hernieuwbare energie. Omdat bodemenergiesystemen geen energie opwekken maar verbruik vermijden, is de verhouding tussen geleverde thermische energie en verbruikte hulpenergie (het rendement) een belangrijke parameter. Dit rapport beoogt om, binnen het kader van het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen, voor gesloten bodemenergiesystemen de mogelijk te bepalen rendementen in kaart te brengen. Ook worden regels (formularium) voor het berekenen van diverse kengetallen (SPF, Primair Energieverbruik, Primaire Energie Ratio en CO₂ emissies) gegeven. Dat voor het rendement van bodemenergiesystemen de SPF gebruikt wordt in plaats van andere indicatoren (zoals Primaire Energie Ratio of CO₂ emissies) is redelijk omdat bij de andere indicatoren ook het totale opwekrendement van elektrische energie een rol speelt. Deze zal van jaar tot jaar kunnen verschillen en is niet (of in geringe mate) door de ontwerper of gebruiker van het bodemenergiesysteem te beïnvloeden.

Voor het rendement kan gekeken worden naar de COP (Coefficient of Performance, in koelbedrijf ook wel Energy Efficiency Ratio of EER genoemd) die vooral kijkt naar de verhouding tussen opgenomen vermogen en geleverd thermisch vermogen. Deze waarde is bruikbaar om onder constante condities apparaten met elkaar te vergelijken. Onder bedrijfscondities, gedurende een heel jaar, kan de verhouding tussen opgenomen energie en geleverde thermische energie beschouwd worden. Dit komt overeen met een gemiddelde COP en wordt de Seizoens Prestatie Factor (SPF) genoemd. Deze is (voor verwarmingsbedrijf "V" en koelbedrijf "K") ingedeeld aan de hand van de volgende systeemgrenzen:

SPF_{VK0}: passief koelen (of verwarmen), alleen de hulpenergie van de circulatiepomp.

SPF_{VK1}: actief verwarmen(of koelen), alleen de hulpenergie van de compressor (warmtepomp).

SPF_{VK2}: actief verwarmen(of koelen), hulpenergie van de bronpomp en compressor (warmtepomp).

SPF_{V3}: actief verwarmen, hulpenergie van de bronpomp, compressor (warmtepomp) en eventueel elektrisch verwarmingselement.

SPF_{V4}/SPF_{K3}: actief verwarmen (of koelen), hulpenergie van de bronpomp, compressor (warmtepomp), eventueel elektrisch verwarmingselement en pompen en ventilatoren in het afgiftesysteem.

5.2 Aanbevelingen

Voor kleine gesloten bodemenergie- warmtepompsystemen, die voornamelijk voor verwarming worden gebruikt (met mogelijk alleen passieve koeling), zou voor het bepalen van het rendement de SPF_{V2} toegepast kunnen worden. Deze waarde kan zowel bij het ontwerp bepaald worden en tijdens gebruik gemeten. Voordeel hiervan is (zie hieronder) dat het rendement voor alle verschillende systemen op dezelfde wijze gedefiniëerd is en toegepast wordt.

Nadeel is echter dat het voor zeer kleine systemen (één of enkele woningen) met de gebruikelijke ontwerppraktijk (ISSO 73) de SPF niet eenvoudig bepaald kan worden. Om het rendement te meten moeten energiemeters worden aangebracht en uitgelezen, hetgeen tot een stijging van de exploitatiekosten zal leiden. Als alternatief zou volstaan kunnen worden met de COP_{V1} van de warmtepomp conform de NEN EN14511. Hier zou geen meting aan het in bedrijf zijnde systeem voorgeschreven hoeven te worden aangezien de eisen aan temperatuur gesteld in het Wijzigingsbesluit al dicht bij de normcondities (B0/W35; B0/W45) liggen. De COP bij de

normcondities is bij een goed ontwerp dan de ondergrens van het systeemrendement. De meeste kleine gesloten bodemenergie- warmtepompsystemen betreffende woningbouw. Daar wordt weliswaar ook passieve koeling geleverd maar is de verwarmingsvraag (en besparingen daarmee behaald) leidend.

Voor systemen die ook een aanzienlijke koellevering hebben en voor grotere systemen kan de SPF_{V2} , SPF_{K0} en SPF_{K2} in het ontwerp bepaald worden voor het ontwerpjaar. Wanneer het systeem in bedrijf is kunnen de SPF-waarden gemeten worden door het toepassen van een warmtemeter en elektrische energiemeter. De warmtemeter moet uiteraard in staat zijn om warmte en koude apart te registreren. Deze keuze voor de systeemgrenzen maakt een beter vergelijk met conventionele systemen mogelijk. Deze systeemgrenzen (brongpomp en compressor) sluiten ook goed aan bij de gehanteerde definitie van gesloten bodemenergiesysteem. Voor verwarmingsbedrijf is een nadeel dat de mogelijke bijdrage van het elektrische bijstook-element ontbreekt. Deze zal, indien toegepast, het systeemrendement sterk kunnen beïnvloeden.

Om aangemerkt te kunnen worden als duurzame en hernieuwbare energiebron moet het rendement (SPF_{VK2}) van het gesloten bodemenergiesysteem tenminste groter zijn dan 2,0. Een bovengrens (Carnot-rendement) bij verwarmingsbedrijf (die niet overschreden kan worden) is gegeven de normale bedrijfsomstandigheden (verwarmingsbedrijf 35 °C aanvoertemperatuur, brontemperatuur 0 °C) 8,8. Uit een kleine steekproef van in Nederland aangeboden warmtepompen voor de woningmarkt is het gemiddelde rendement van deze warmtepompen 4,40 (COP_1 bij B0/W35).

Om een eis aan rendement te onderbouwen (voor verwarmings- en koelbedrijf) zouden gegevens van in bedrijf zijnde systemen, liefst van verschillende leveranciers, verzameld kunnen worden. Daarmee is zowel het systeemspecifieke als gebruikersspecifieke rendement te meten en wordt ook informatie over de variatie van de rendementen verkregen.