

Effecten van Gesloten Bodemenergiesystemen

Werkpakket 0

Referentietypen

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	<i>INLEIDING</i>	1
2	<i>Referentietypen</i>	3
2.1	Bodemeigenschappen	3
2.2	Bodemwarmtewisselaars en bodemwarmtewisselaarsysteem	4
2.3	Circulatiemedium eigenschappen	6
2.4	Gebruikstypen en energievraagpatroon	8
3	<i>Methode</i>	12
3.1	Bepalen rendement	12
3.2	Verificatie	16
4	<i>BASIS ONTWERPBEREKENINGEN</i>	18
5	<i>GEVOELIGHEIDSANALYSE</i>	23

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 geïdentificeerd³.

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

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

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

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

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

Deze vragen zijn verdeeld in de volgende werkpakketten:

1. Positieve effecten
2. Gebruik circulatiemedium in bodemlussen
3. Energiebalans en rendementen
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 0 - referentiesystemen

Om de resultaten van de verschillende werkpakketten eenvoudiger te kunnen vergelijken is het handig om in kaart te brengen welke algemene randvoorwaarden en welk type gesloten bodemenergiesystemen beschouwd gaan worden. Daarbij is het doel om de systemen zo te kiezen dat ze geschikt zijn om de diverse effecten goed in kaart te brengen (systemen die in bepaalde mate gevoelig zijn voor effecten) én in voldoende mate naar werkelijke praktijksituatie te vertalen zijn.

In dit werkpakket definiëren we de referentietypen die voor de andere werkpakketten toegepast kunnen worden. Deze referentietypen zijn deels gebaseerd op de voor het ministerie van I&M uitgevoerd onderzoek “Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen”⁴. Voor de volgende onderdelen worden referentiewaarden gegeven:

- Bodemeigenschappen
- Bodemwarmtewisselaar en bodemwarmtewisselaarsysteem
- Circulatiemedium eigenschappen
- Gebruikstypen (energievraagpatroon)

Daarnaast wordt ingegaan op de toegepaste ontwerpmethodes en methodes om het werkelijke rendement van het bodemenergiesysteem te bepalen. Bij de gebruikelijke ontwerpmethodes is het rendement namelijk een invoerparameter en niet een resultaat. Daarnaast is het berekenen van het rendement niet eenvoudig omdat het rendement sterk afhangt van de brontemperatuur die tijdens het bedrijf niet constant is maar afhangt van het energievraagpatroon.

De opgestelde energievraagpatronen zijn representatief voor verschillende projecttypen, voor elk energievraagpatroon wordt een ontwerp van een bodemenergiesysteem opgesteld. Die ontwerpen worden in de andere werkpakketten (met name werkpakket “positieve effecten” en werkpakket “energiebalans en rendement”) gebruikt.

⁴ Groenholland Geo-Energiesystemen, 2011. Rapport GHNL 011103.

2 Referentietypen

Bij het ontwerp van een gesloten bodemenergiesysteem wordt bepaald wat de grootte van de bodemwarmtewisselaar moet zijn om een bepaalde hoeveelheid warmte- en koude langdurig te kunnen leveren. Voor het ontwerp zijn diverse gegevens nodig, zoals gegevens over energievraagpatroon en gegevens over de bodem. Voor het effectenonderzoek is het nodig de uitgangspunten zo te kiezen dat ze representatief zijn voor de meeste in Nederland voorkomende systemen, dit zijn de referentietypen die in de andere werkpakketten worden gebruikt. Om inzicht te geven in het relatieve belang van de verschillende ontwerpparameters is een beperkte gevoeligheidsanalyse voor de ontwerpen uitgevoerd.

In dit hoofdstuk beschrijven we de verschillende parameters die voor het ontwerp van een gesloten bodemenergiesysteem nodig zijn. Daarbij wordt steeds aangegeven wat, voor Nederland, de te verwachten spreiding (onderwaarde en bovenwaarde) van de parameters is. Deze vormen de basis voor de gevoeligheidsanalyse. Voor de berekeningen van de verschillende scenario's in de overige delen van de studie wordt uitgegaan van de referentiewaarde.

2.1 Bodemeigenschappen

Bodemeigenschappen zijn van wezenlijk belang voor het ontwerp en de werking van het bodemenergiesysteem. De referentietypen voor de bodemeigenschappen beschrijven het gemiddelde (meest voorkomende) en de onder- en bovenwaarde voor de verschillende bodemparameters (tabel 1).

Tabel 1. Onderwaarde, bovenwaarde en referentiewaarde voor de thermische bodemparameters.

	Onderwaarde	Referentiewaarde	Bovenwaarde
Bodemtemperatuur (°C)	7,0	10,5	14,0
Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)	1,5	2,0	2,5
Warmtecapaciteit (MJ/m ³)	2,0	2,3	2,6

Onderwaarde en bovenwaarde voor de bodemtemperatuur zijn gebaseerd op ervaringsgetallen, afkomstig uit een groot aantal uitgevoerde Thermische Respons Tests (Groenholland Geo-Energiesystemen, ongepubliceerd). Deze hebben een grotere spreiding dan de door het KNMI gepubliceerde gemiddelde luchttemperaturen (die een redelijke indicatie van de gemiddelde bodemtemperatuur zouden moeten geven). Dit is een gevolg van effecten zoals mate van verstedelijking en geothermische gradiënt die in de klimaatgegevens niet voldoende terugkomen.

Nabij het oppervlak is er sprake van een seizoensmatige temperatuurvariatie (tot een diepte van circa 10 meter). Hieronder is tot een diepte van 100 – 150 meter de temperatuur vrij stabiel, soms is er sprake van een geringe thermische gradiënt (0,005 – 0,015K/m). Op grotere diepten treed meestal een toename van de temperatuur met de diepte op (globaal 0,011 – 0,035 K/m)⁵.

In stedelijke gebieden vindt men, door opwarming van het oppervlak, vaak een invers profiel. Hier neemt de temperatuur met de diepte eerst af om pas op grotere diepten toe te nemen.⁶ De temperatuur in de bovenste 100 meter in stedelijke gebieden kan significant hoger zijn (2,5 – 3,5 °C) in vergelijking met landelijke gebieden.

⁵ Edelman, 2004

⁶ Buik, Stolk & Willemsen, Stromingen 10:4 (2004)

Voor de toe te passen ontwerpmethoden kan volstaan worden met het invoeren van de gemiddelde temperatuur over het verticale profiel. Er hoeft dan geen geothermische warmteflux ingevoerd te worden. De seizoensmatig wisselende temperatuurgradiënt nabij het oppervlak wordt daarbij niet verdisconteerd. Voor niet al te ondiepe bodemwarmtewisselaars (± 50 meter of meer) is deze aanname redelijk. Voor zeer korte of horizontale bodemwarmtewisselaars moet wel rekening gehouden worden met de seizoenmatig variërende temperatuur nabij het oppervlak.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem hangt van veel factoren af. Vooral de samenstelling van de bodem en mate van verzadiging spelen een belangrijke rol: klei of veen hebben een lage warmtegeleidingscoëfficiënt terwijl de grove zanden in watervoerende pakketten een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt hebben. De onderwaarde (1,5 W/mK) is typerend voor overwegend kleiige afzettingen (zoals bij relatief korte warmtewisselaars op locaties met een dikke deklaag) terwijl de bovenwaarde karakteristiek is voor locaties waar de warmtewisselaar vooral in een goed watervoerend pakket is geplaatst.

De Warmtecapaciteit heeft over het algemeen een minder grote spreiding.

2.2 Bodemwarmtewisselaars en bodemwarmtewisselaarsysteem

De constructie van de individuele bodemwarmtewisselaar is bepalend voor de efficiëntie van de warmteoverdracht tussen de vloeistof en de bodem. Deze wordt uitgedrukt als een thermische weerstand (R_b , de boorgatweerstand) die uit verschillende deelweerstand is opgebouwd. De boorgatweerstand varieert tussen 0,08 K/(W/m) voor zeer goed presterende warmtewisselaars tot 0,25 K/(W/m) voor zeer slecht presterende bodemwarmtewisselaars. Belangrijke effecten op de boorgatweerstand zijn het stromingsregime in de warmtewisselaar zelf (turbulent of laminair) en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het vulmateriaal.

De boorgatweerstand is bepalend voor het nodige temperatuurverschil om een bepaalde warmtestroom te krijgen. Bijvoorbeeld: een boorgatweerstand van 0,1 K/(W/m) en een warmtestroom van 25 W/m komt overeen met een temperatuurverschil tussen vloeistof en bodem van $0,1 * 25 = 2,5K$. Omdat het rendement van de temperatuur afhangt is dit een belangrijke parameter.

Drie referentiesituaties worden beschreven (tabel 2), een typische situatie en een met een lage en een met een hoge boorgatweerstand. Andere parameters (type warmtewisselaar – zoals enkele U-lus, dubbele U-lus of concentrische warmtewisselaar – pijpdiameters, afstand tussen pijpen, boorgatdiameter etc) worden niet beschreven, maar hebben allemaal een invloed op de uiteindelijke thermische boorgatweerstand zoals die in de tabel gegeven is.

Tabel 2. Onderwaarde, bovenwaarde en referentiewaarde voor de boorgat – bodemwarmtewisselaar constructie parameters.

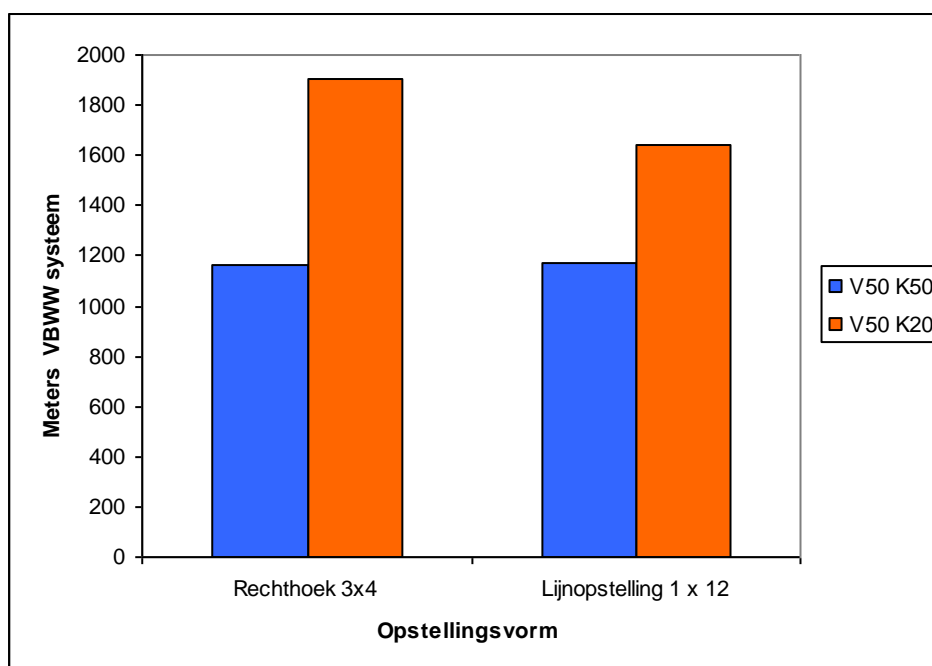
	Onderwaarde	Referentiewaarde	Bovenwaarde
Stromingsregime (Reynolds)	1000	2500	4000
Lengte (H)	80	100	150
Warmtegeleidingscoëfficiënt	1,5	2,0	2,5
Boorgatweerstand (R_b)	0,24	0,11	0,09

Voor het bodemwarmtewisselaarsysteem als geheel nemen we een boordiepte aan die kan variëren van 80 tot 150 meter –mv. In de praktijk komen ondiepere en diepere systemen ook voor, maar de effecten voor die systemen kunnen gerelateerd worden aan grotere (meer bodemwarmtewisselaars in totaal) of kleinere (minder bodemwarmtewisselaars in totaal) systemen.

Naast de einddiepte zijn er nog drie aspecten, namelijk het aantal bodemwarmtewisselaars, de opstellingsvorm en de afstand tussen individuele bodemwarmtewisselaars. Voor de effectenstudies is het aantal bodemwarmtewisselaars een functie van de ontwerpen die gebaseerd zijn op de energievraagpatronen. Voor de opstellingsvorm is gekozen voor een zo dicht mogelijke opstelling (rechthoek of vierkant) en voor de tussenafstand zes meter, hierbij is de thermische interactie tussen de warmtewisselaars vrij groot en is de analyse als geheel gevoelig voor de effecten.

Een voorbeeld van het effect van de opstellingsvorm en tussenafstand wordt in onderstaande figuren (figuur 1, 2) gegeven⁷. In de gevoeligheidsanalyse wordt hier in meer detail op ingegaan.

Figuur 1. Indicatie van effect van opstellingsvorm op ontwerplengte bodemwarmtewisselaarsysteem, bij 100% en 40% energiebalans.

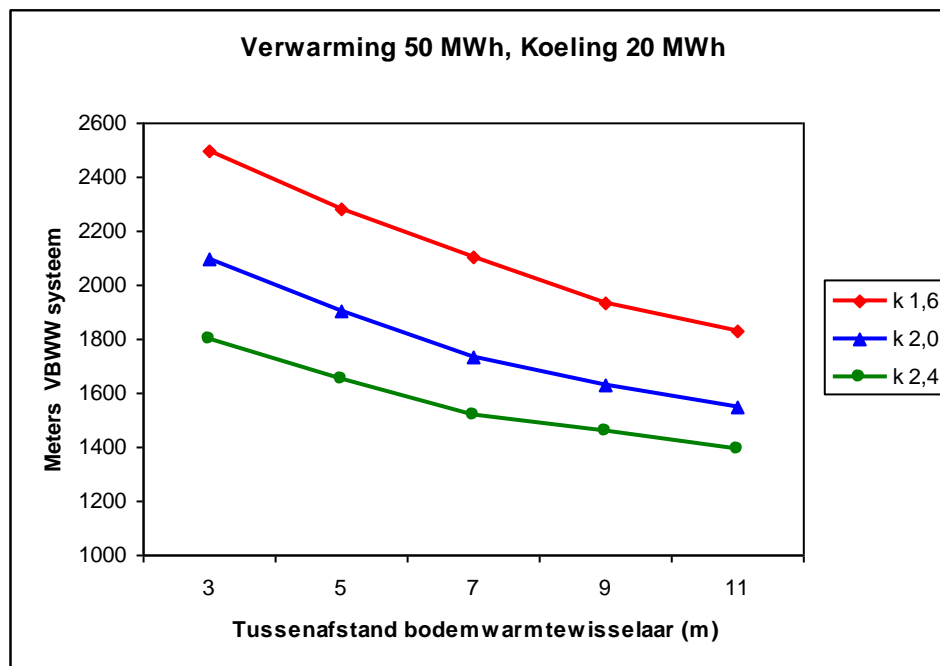


In figuur 1 blijkt dat met name voor systemen met weinig energiebalans bij een gesloten opstellingsvorm (rechthoek) veel meer lengte bodemkoppeling nodig. Voor systemen met een grotere mate van energiebalans heeft de opstellingsvorm duidelijk minder effect.

Figuur 2 laat zien dat (voor systemen met weinig energiebalans) het vergroten van de afstand tussen individuele bodemwarmtewisselaars in een bodemwarmtewisselaarveld de totale lengte doet afnemen. Ook is duidelijk dat bij een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt minder meters nodig zijn dan bij een lage warmtegeleidingscoëfficiënt.

⁷ Bron: leergang Bodemenergiesystemen, Bodemenergie NL.

Figuur 2. Indicatie van effect van tussenafstand op ontwerplengte bodemwarmtewisselaarsysteem, bij 40% energiebalans.



2.3 Circulatiemedium eigenschappen

Alhoewel het circulatiemedium niet direct invloed zal hebben op de effectenstudie, kiezen we voor monopropyleenglycol (25%) als circulatiemedium. Monopropyleenglycol heeft in verhouding de hoogste viscositeit bij lage temperaturen en daarmee het grootste potentiële effect. Om te vergelijken kan als alternatief water of mono-ethyleenglycol worden toegepast. De vloeistofeigenschappen zijn hieronder in tabel 3, 4 en 5 weergegeven.

Voor eventuele modelberekeningen is het van belang de eigenschappen bij de werkelijke bedrijfstemperatuur te kiezen.

Tabel 4. Medieum eigenschappen bij verschillende temperaturen, 25% monopropyleenglycol.

Eigenschappen Monopropyleenglycol		Temperatuur (°C)					
		-5	0	10	15	20	25
25%	Dichtheid (kg/m ³)	1032,7	1031,2	1027,8	1025,9	1023,9	1021,8
	Warmtecapaciteit (kJ/(kg·K))	3867	3879	3903	3915	3928	3940
	Warmtegeleiding (W/m·K)	0,441	0,448	0,461	0,467	0,473	0,479
	Viscositeit (mPa·s)	6,01	4,87	3,31	2,78	2,30	2,02

Tabel 5. Medie-eigenschappen bij verschillende temperaturen, 25% mono-ethyleenglycol.

Eigenschappen Mono-ethyleenglycol		Temperatuur (°C)					
		-5	0	10	15	20	25
25%	Dichtheid (kg/m ³)	1044,4	1043,2	1040,8	1038,7	1037,0	1035,1
	Warmtecapaciteit (kJ/(kg·K))	3689	3702	3727	3739	3752	3764
	Warmtegeleiding (W/m·K)	0,447	0,455	0,469	0,476	0,482	0,488
	Viscositeit (mPa·s)	3,93	3,28	2,38	2,06	1,80	1,59

Tabel 6. Medie-eigenschappen bij verschillende temperaturen, water.

Eigenschappen Water		Temperatuur (°C)					
		-5	0	10	15	20	25
%	Dichtheid (kg/m ³)		999,8	999,8	999,2	998,3	997,2
	Warmtecapaciteit (kJ/(kg·K))		4217	4192	4186	4182	4180
	Warmtegeleiding (W/m·K)		0,562	0,582	0,591	0,600	0,608
	Viscositeit (mPa·s)		1,79	1,31	1,14	1,00	0,89

2.4 Gebruikstypen en energievraagpatroon

Voor de effectenstudie gesloten bodemenergiesystemen kunnen we globaal drie gebruikstypen onderscheiden, te weten: verwarming zonder koeling (woonfunctie), verwarming met passieve koeling (woonfunctie) en verwarming met passieve zowel als actieve koeling (utiliteit/kantoorfunctie). Bij de woonfunctie zou nog onderscheid gemaakt kunnen worden in individueel of collectief en in grondgebonden of gestapelde bouw, maar dat maakt voor de uiteindelijke range van energievraagpatronen niet zoveel uit.

Tabel 7. Overzicht referentietypen: toepassing bodemenergiesysteem (V: Verwarming; PK: Passieve koeling; MK: Mechanische koeling), indicatie opgesteld vermogen voor verwarming, koeling (mechanisch en passief). Uitgangspunt is maximaal 70 kW vermogen bodemzijdig.

No	Gebouwtipe	Toepassing			Verwarming Condensor kW	Koeling Verdamp er kW	Koeling Passief kW
		V	PK	MK			
A1	Nieuwbouw, rijtjeswoning	+	+/-	-	3 - 5	-	2,8 - 4,7
A2	Nieuwbouw, hoekwoning	+	+/-	-	4 - 7	-	3,7 - 6,5
A3	Nieuwbouw, vrijstaand	+	+/-	+/-	6 - 11	4,4 - 8,1	5,6 - 10,3
B1	Bestaande bouw, rijtjeswoning	+	-	-	5 - 8	-	-
B2	Bestaande bouw, hoekwoning	+	-	-	8 - 10	-	-
B3	Bestaande bouw, vrijstaand	+	+/-	+/-	10 - 14	12,6 - 17,7	9,3 - 13,1
C1	Appartementencomplex (10)	+	+	+/-	30 - 50	22 - 37	28 - 47
C2	Appartementencomplex (20)	+	+	+/-	50 - 90	37 - 59	46,7 - 62
D1	Bedrijfshal met kantoor	+	+	+	20 - 90	15 - 62	19 - 62
D2	Kantoorpand	+	+	+	40 - 90	30 - 62	37 - 62
D3	School	+	+/-	-	40 - 90	-	37 - 62

Tabel 8. Overzicht referentietypen: Totaal verwarmingsvraag (ruimteverwarming + tapwater), draaiuren verwarming, totaal koelvraag, draaiuren koeling. Warmte en koudevraag verkregen door vermenigvuldigen maximale aantal uren met minimale capaciteit.

No	Warmtevraag MWh/jaar		Draaiuren		Koelvraag MWh/jaar		Draaiuren	
	min	max	min	max	min	max	min	max
A1	5,4	7,5	1500	1800	1,7	2,1	350	750
A2	7,2	10,5	1500	1800	2,3	2,8	350	750
A3	10,8	16,5	1500	1800	3,3	3,6	350	750
B1	8,8	10,0	1250	1750	0,0	0,0	350	750
B2	12,5	14,0	1250	1750	0,0	0,0	350	750
B3	17,5	17,5	1250	1750	6,2	7,0	350	750
C1	60,0	66,0	1500	2200	16,5	16,5	350	750
C2	105,0	110,0	1500	2200	21,7	27,8	350	750
D1	25,0	36,0	1000	1800	20,3	40,3	500	1000
D2	70,0	72,0	1000	1800	48,0	58,9	500	1000
D3	70,0	72,0	1000	1800	29,6	48,0	500	1000

In tabel 7 worden voor verschillende projecttypen typische waarden gegeven voor de toepassing (V, verwarming; PK, passieve koeling; MK, mechanische koeling) en vermogens. Samen met een inschatting van aantal draaiuren levert dit een onder en bovengrens voor de totale hoeveelheid te leveren warmte en koude (tabel 8). Deze referentietypen zijn gebaseerd op de Novem referentiewoningen en monitoringgegevens van bestaande projecten zoals beschreven en toegepast in rapport GHNL 011103⁸.

Hierbij moet aangetekend worden dat deze studie kleine gesloten bodemenergiesystemen betreft, waarbij het maximale aan de bodem gevraagde vermogen 70 kW bedraagt. Voor de effectenstudies dient dit te worden opgeschaald. Op basis van de huidige voorkomende projectomvang zal de bovengrens voor woningbouwprojecten gelegd worden op projecten met een totale verwarmingsvraag van ± 2000 MWh (150 – 200 woningen). Voor de referentietypen met mechanische koeling zal de maximale omvang gesteld worden op ± 300 MWh (circa 150 kW vermogen). Voor de utiliteit wordt een scenario berekend met een koellast van 30% van de warmtelast en met een maximale koellast. De maximale koellast wordt hierbij zo gekozen dat deze met het berekende rendement precies in balans is met de warmtevraag. We definiëren hiermee de uiteindelijke referentietypen (energievraagpatronen) voor het uitvoeren van de werkpakketten “positieve effecten” en “effecten energiebalans”, samengevat in tabel 9 en 10.

Tabel 9. Overzicht energievraagpatronen scenario's, inclusief indicatie projecttype en omvang.

No	Omschrijving	Warmtevraag		Koudevraag	
		MWh	kW	MWh	kW
1a	Enkele woning	10	10	0	0
1b	Enkele woning	10	10	3	3
2	Klein woningbouwproject	50	40	15	27
3	Gemiddeld web project	500	350	150	275
4	Groot wb project	1000	625	300	400
5	Zeer groot wb project	2000	1000	1200	220
6a	Kleine utiliteit PK	100	60	30	40
6b	Kleine utiliteit	100	60	84	135
7a	Grote utiliteit PK	300	170	90	120
7b	Grote utiliteit	300	170	237	248

Voor de woningbouwprojecten wordt als uitgangspunt een maximale koudevraag van 30% van de warmtevraag aangenomen. Dat komt overeen met wat globaal door passieve (directe) koeling geleverd kan worden. Voor de utiliteit wordt daarnaast ook mechanische koeling toegepast.

Voor de woningbouw is de energievraag verder te verdelen in ruimteverwarming en tapwatervraag. De tapwatervraag is, op basis van bekende vuistregels (2,5 persoon per huishouden, 50 liter per persoon per dag, 45 °C temperatuurverhoging; hetgeen neerkomt op 2 MWh/jaar) en monitoringgegevens (1,2 MWh/jaar) gesteld op 1,6 MWh/jaar. Voor de utiliteit is aangenomen dat de tapwatervraag relatief zeer klein is, deze wordt niet apart in de berekeningen opgenomen.

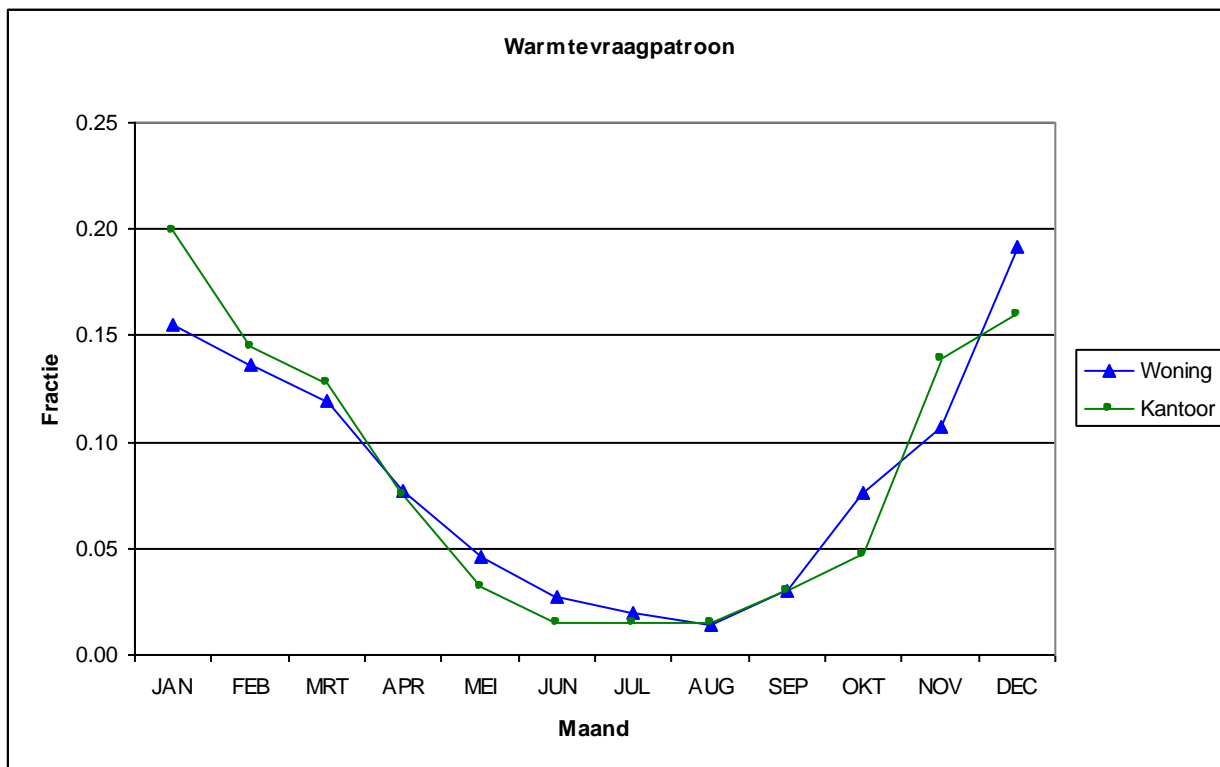
De seizoensverdeling van de warmte- en koudevraag wordt in tabel 11 en figuur 3 weergegeven. Voor de berekeningen wordt de maandelijkse energievraag berekend door de totale vraag uit tabel 9 te vermenigvuldigen met de fractie van de betreffende vraag per maand uit tabel 10.

⁸ Bron: Ministerie van I&M, 2011. Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen. Rapport GHNL 011103.

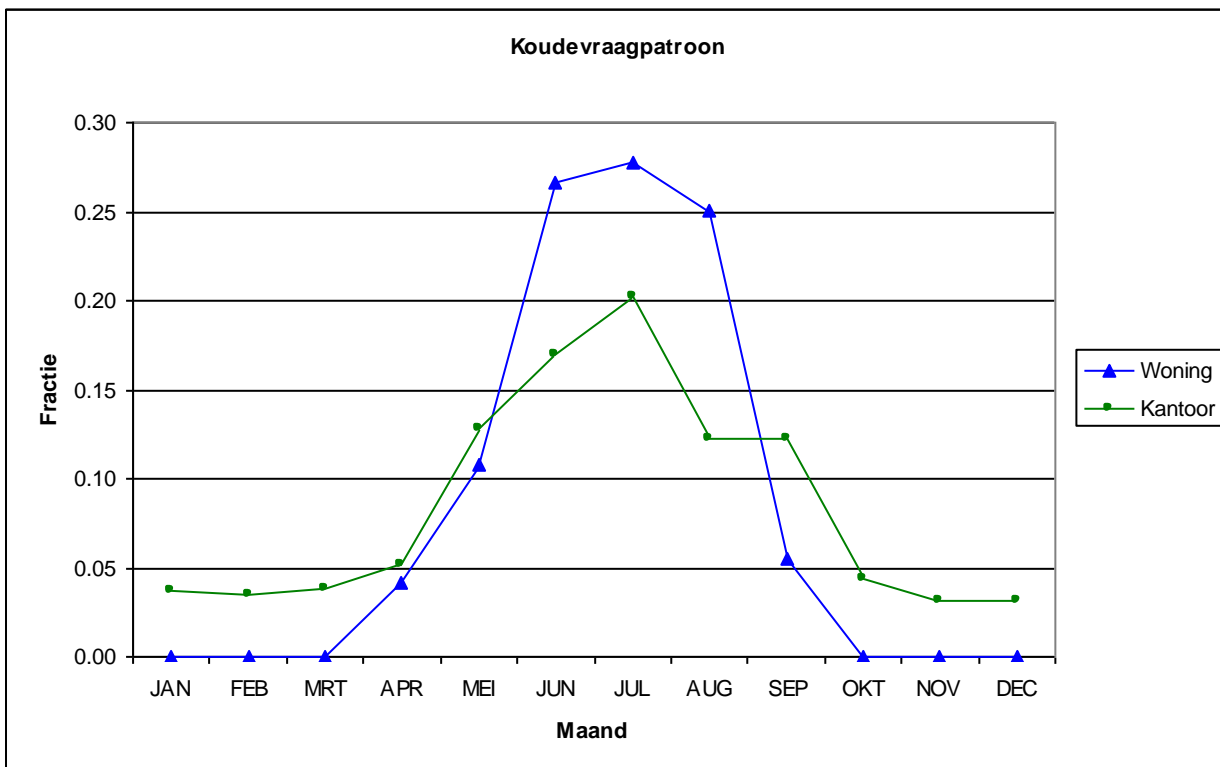
Tabel 10. Seizoensverdeling warmte- en koudvraag voor woningen en utiliteit.

	Warmtevraag Woning	Warmtevraag Utiliteit	Koudevraag Woning	Koudevraag Utiliteit
Jan	0,15	0,20	0,00	0,04
Feb	0,14	0,15	0,00	0,03
Mar	0,12	0,13	0,00	0,04
Apr	0,08	0,08	0,04	0,05
Mei	0,05	0,03	0,11	0,13
Jun	0,03	0,02	0,27	0,17
Jul	0,02	0,02	0,28	0,20
Aug	0,01	0,02	0,25	0,12
Sep	0,03	0,03	0,06	0,12
Oct	0,08	0,05	0,00	0,04
Nov	0,11	0,14	0,00	0,03
dec	0,19	0,16	0,00	0,03

Figuur 3. Seizoensverdeling warmtevraag, voor woningen en utiliteit.



Figuur 4 Seizoensverdeling koudevraag, voor woningen en utiliteit.



3 Methode

Hier beschrijven we de basismethode voor het opstellen van de verschillende ontwerpen en het bepalen van de temperatuurafhankelijke systeem prestaties (rendement). Met de hier beschreven rekenmethode zijn de ontwerpen voor de referentietypen opgesteld, deze dienen als basis voor het berekenen van de gerealiseerde besparingen in de werkpakket “positieve effecten” en voor het uitvoeren van de berekeningen in de werkpakket “effecten energiebalans”.

Als ontwerpcriterium is steeds een gemiddelde minimum mediumtemperatuur gehanteerd van 0 °C (overeenkomend met de in de AMvB Bodemenergie toegestane minimum aanvoertemperatuur naar de bodem van -3 °C) en een maximum mediumtemperatuur van 27,5 °C (overeenkomende met de toegestane maximale aanvoertemperatuur naar de bodem van +30 °C). Temperatuur voor verwarming is op 35 °C gesteld. Als grens voor mogelijke passieve koeling is een retourtemperatuur uit de bodem van 18 °C gehanteerd. Mechanische koeling wordt op een temperatuur van ± 12 °C geleverd, op basis waarvan het rendement gekozen is.

Bij het ontwerp is gebruik gemaakt van twee rekenmethoden (programma's). Om de noodzakelijk lengte van een bodemwarmtewisselaarsysteem te bepalen als functie van het energievraagpatroon is het programma EED (Earth Energy Designer⁹) gebruikt. 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 (rekencyli) nodig.

3.1 Bepalen rendement warmtepomp-bodemenergiesysteem

Met name in het werkpakket “positieve effecten” is het rendement een resultaat waarvan de positieve effecten sterk afhangen. Hoe we in de berekeningen het rendement bepalen is daarom van groot belang. Bij het bepalen van het rendement spelen er twee hoofdvragen:

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

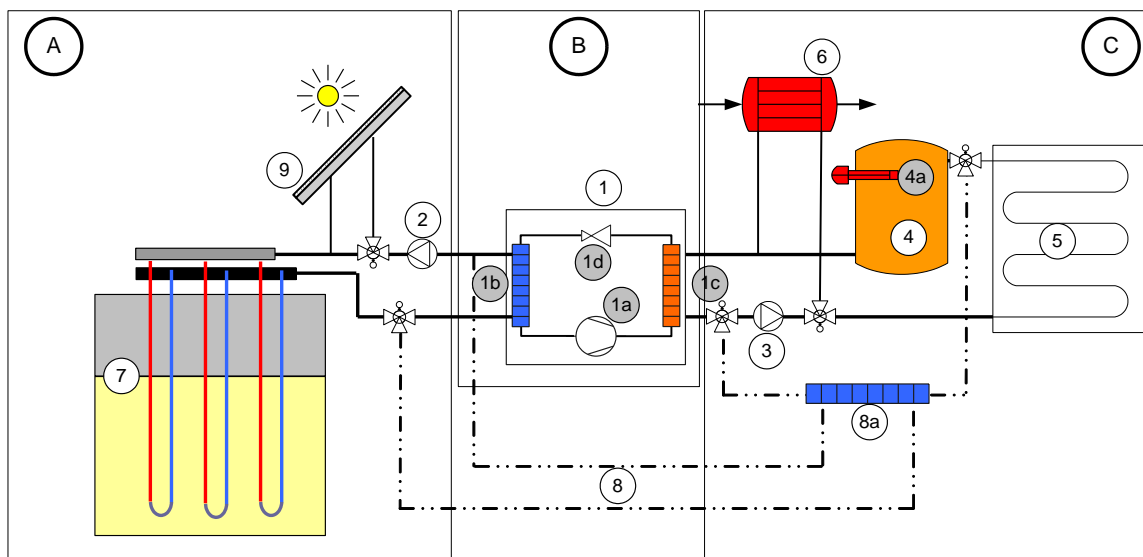
In de studie “Bepalen van het energetische rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem”¹¹ is een overzicht gegeven van de mogelijke systeemgrenzen die aangehouden kunnen worden. Daarin is vooral wezenlijk welke energieverbruikers (compressor van de warmtepomp, circulatiepomp) worden meegewogen. Uiteindelijk is het rendement van het bodemenergiesysteem gedefinieerd op basis van de compressorenergie en energie van de bronpomp (figuur 5, onderdelen 1a [compressor] en 2 [bronpomp]).

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).

¹¹ Ministerie van I&M, 2012 Bepalen van het energetisch rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem. Rapport GHNL 012002.

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



Het rendement van het systeem is sterk afhankelijk van de temperatuur in het bodemenergiesysteem. Omdat de temperatuur in het bodemenergiesysteem niet constant is maar in de tijd varieerd wordt een Seizoens Prestatie Factor (SPF) berekend. De volgende SPF-en worden berekend:

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

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

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

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

Het rendement van de warmtepomp hangt af van de eigenschappen van de toegepaste warmtepomp en de bron- en afgiftemperatuur van het systeem. Voor de overgrote meerderheid van de warmtepompen is het rendement alleen bekend bij één bepaalde evenwichtsconditie (bijvoorbeeld brontemperatuur 5 °C en afgiftemperatuur 35 °C). Omdat het rendement van het bodemenergiesysteem sterk van temperatuur afhangt is het niet mogelijk de systeem SPF te bepalen met alleen dit constante warmtepomprendement.

Om het rendement bij verschillende temperaturen te kunnen berekenen wordt daarom gebruik gemaakt van het Carnot-rendement¹². Het Carnot rendement is het maximale rendement van een ideale machine, 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

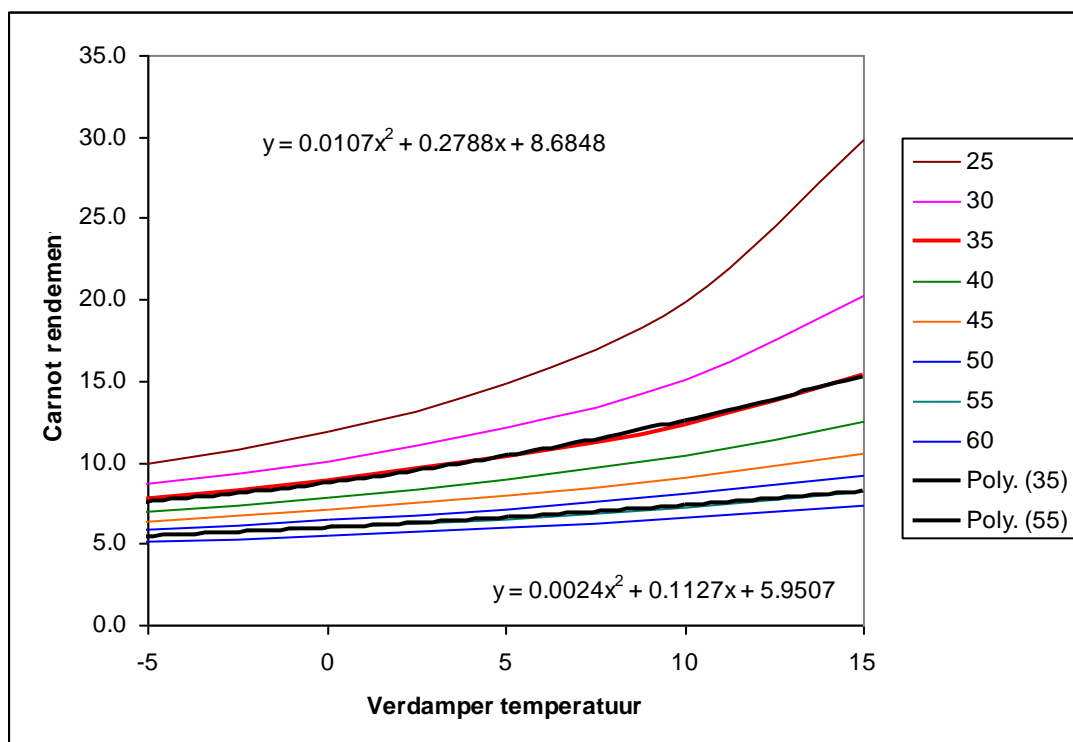
$C\eta$: Carnot rendement

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 (figuur 6). Door dit rendement te koppelen aan het rendement van een warmtepomp bij evenwichtscondities kan vervolgens het werkelijke rendement bij andere temperaturen bepaald worden.

Figuur 6. Relatie tussen Carnot rendement en verdampertemperatuur, voor verschillende condensortemperaturen. Weergegeven tevens de polynomiale fit voor condensortemperatuur 35 °C en 55 °C.



¹² Carnot, S., 1824. Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.

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 6). 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”¹³. 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.

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 circulatiemedium 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:

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

¹³ Ministerie van I&M, 2012 Bepalen van het energetisch rendement van een warmtepompinstallatie met een gesloten bodemenergiesysteem. Rapport GHNL 012002.

Hier is:

Q	:	Totale debiet (m ³ /uur)
ρ	:	Dichtheid medium (kg/m ³)
ΔP	:	Opvoerhoogteverlies (kPa)
η	:	Efficiëntie pomp (0,35)

Samenvattend worden de berekeningen als volgt uitgevoerd:

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.

3.2 Verificatie

Bij de berekeningen worden twee verschillende rekenmethoden toegepast. Het is daarbij van belang vast te stellen of deze twee rekenmethoden vergelijkbare resultaten opleveren. Hiertoe is een berekening uitgevoerd met de uitgangspunten zoals weergegeven in tabel 11.

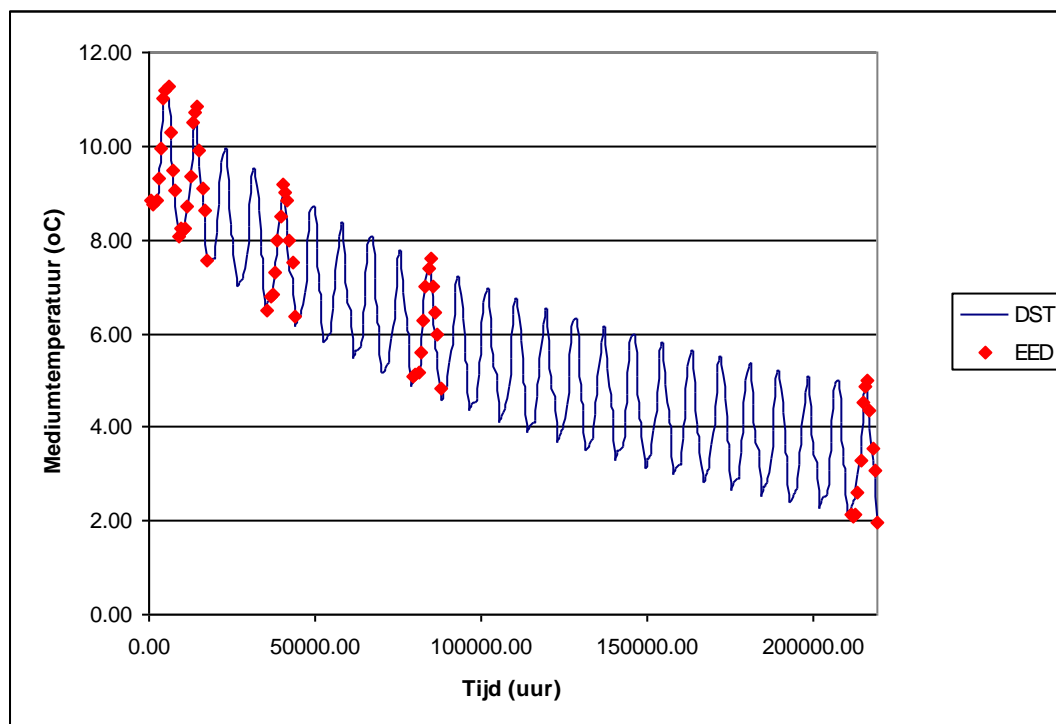
Tabel 11. Uitgangspunten ontwerpberekeningen voor verificatie gelijkwaardigheid rekenmethoden.

Energievraag (MWh/kW)	Verwarmen	Passief koelen	Actief koelen
	500 / 275	150 / 275	
Bodem	WGC (W/mK)	WC (MJ/m ³ /K)	T (°C)
	2,0	2,3	10,5
Bodemwarmtewisselaar	Debiet (m ³ /uur)	Medium	Reynolds
	108	25% MPG @ 0 °C	2500
	Diameter (m)	Aantal	Lengte (m)
	0,15	10 x 12	115
	Rb (K/(W/m))		
0,11			

Om aan de gestelde temperatuurcriteria te voldoen is een bodemwarmtewisselaarveld (BWW) van 120 BWW met een lengte van 115 meter en een tussenafstand van 6 meter nodig.

De ontwerpberekening met een vaste SPF voor verwarmings en koelbedrijf zijn uitgevoerd met EED en met DST (figuur 7). Met EED zijn de bedrijfsjaren 1, 2, 5, 10 en 25 berekend en uitgezet tegen de met DST berekende temperaturen van jaar 1 tot jaar 25. In jaar 1 is de maximale afwijking $-0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (winter) en $-0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zomer), de kwadraatsom-afwijking (Sum Square Error, SSE) voor jaar 1 is $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$. In jaar 25 is de maximale afwijking $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (winter) en $-0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zomer), SSE voor jaar 25 is $0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$. De overeenkomst tussen beide modellen is zeer goed.

Figuur 7. Overeenkomst tussen gemiddelde mediumtemperatuur berekend met EED of DST (SPF constant).



4 BASIS ONTWERPBEREKENINGEN

Volgens de in hoofdstuk 3 beschreven methode zijn voor alle scenario's uit tabel 10 bodemwarmtewisselaarsystemen ontworpen. In tabel 12 zijn de ontwerpresultaten weergegeven. Uit praktische overwegingen is het niet mogelijk om voor elk scenario verschillende bodemwarmtewisselaars te ontwerpen. Daarbij zal de verhouding tussen warmte en koelvraag tussen de verschillende scenario's ook het ontwerp beïnvloeden. Voor alle ontwerpen is daarom uitgegaan van een zo rechthoekig mogelijke opstelling, waardoor de interacties tussen de bodemwarmtewisselaars maximaal is. Hierdoor zijn de resultaten eenvoudiger te vergelijken en te interpreteren.

Tabel 12. Basis ontwerp bodemwarmtewisselaarsystemen. Warmte (V) en koude (K) vraag, aantal individuele bodemwarmtewisselaar (n), diepte van de bodemwarmtewisselaars (H), totale lengte systeem (TL), SPF – inclusief pompenergie - bij verwarmings en koelbedrijf.

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

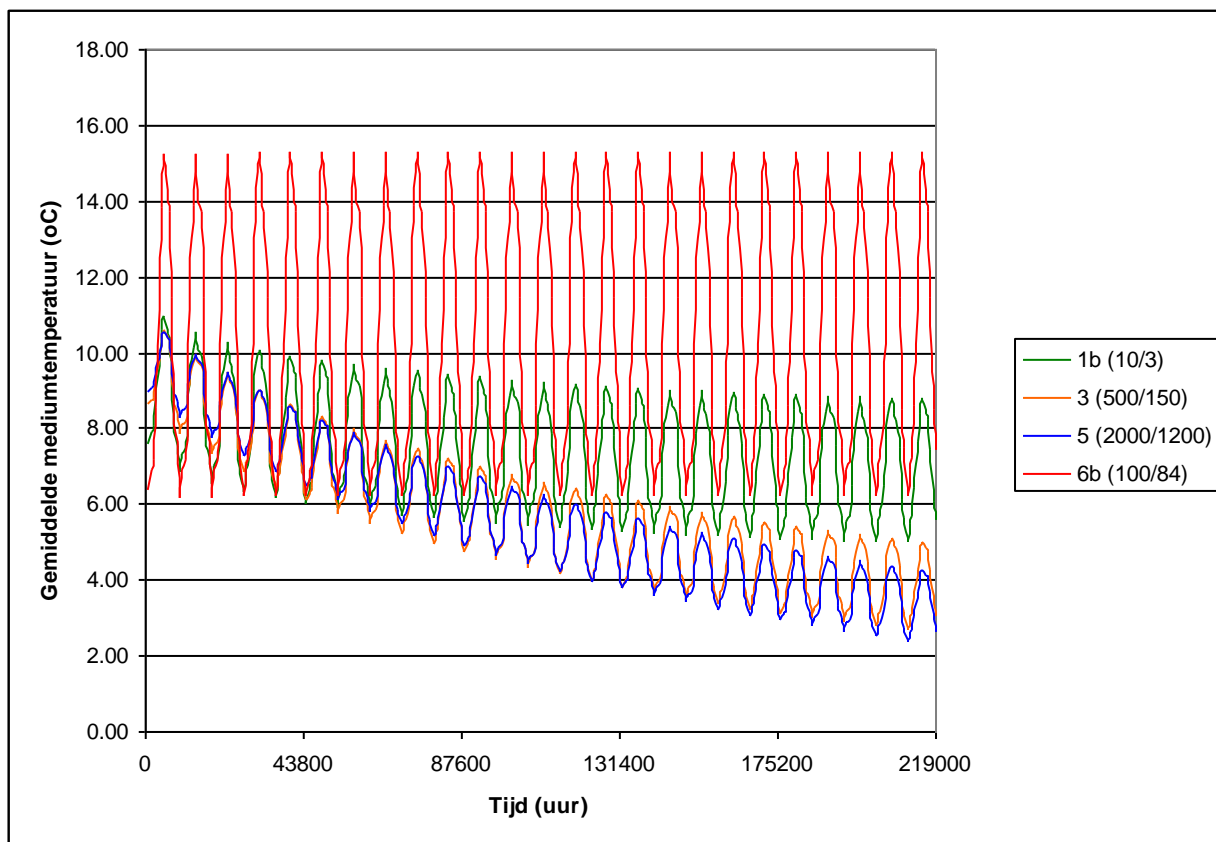
Figuur 8 laat voor enkele scenario's de gemiddelde mediumtemperaturen gedurende 25 jaar zien. In deze grafiek is duidelijk waarneembaar dat bij geen of geringe energiebalans (overheersende warmtevraag) de temperatuur in het bodemwarmtewisselaarsysteem blijft dalen, maar dat de snelheid van de daling in de tijd wel afneemt. Voor de berekeningen met een grote mate van energiebalans is er geen trend van dalende temperatuur, maar een seizoenmatig wisselend temperatuurverloop. Wel is duidelijk dat de seizoensamplitude (verschil tussen zomer en winter) veel groter is. In de eerste jaren is de temperatuur in het winterseizoen zelfs lager dan in de scenario's zonder energiebalans.

Een maat voor hoe effectief het bodemenergie de bodem gebruikt voor energie-uitwisseling en –opslag is het specifieke vermogen (W/m)¹⁴. Dit is een directe maat voor de verhouding tussen de totale energievraag en de omvang van het bodemwarmtewisselaarsysteem: hoe groter het specifieke vermogen hoe meer energie per meter bodemkoppeling wordt uitgewisseld. Deze zijn weergegeven in figuur 9. De kleine systemen, die met een enkele bodemwarmtewisselaar een groot bodemvolume kunnen activeren, hebben een vrij groot specifiek vermogen zelfs als er geen enkele koelvraag tegenover staat. Neemt de omvang van de systemen toe, dan neemt de

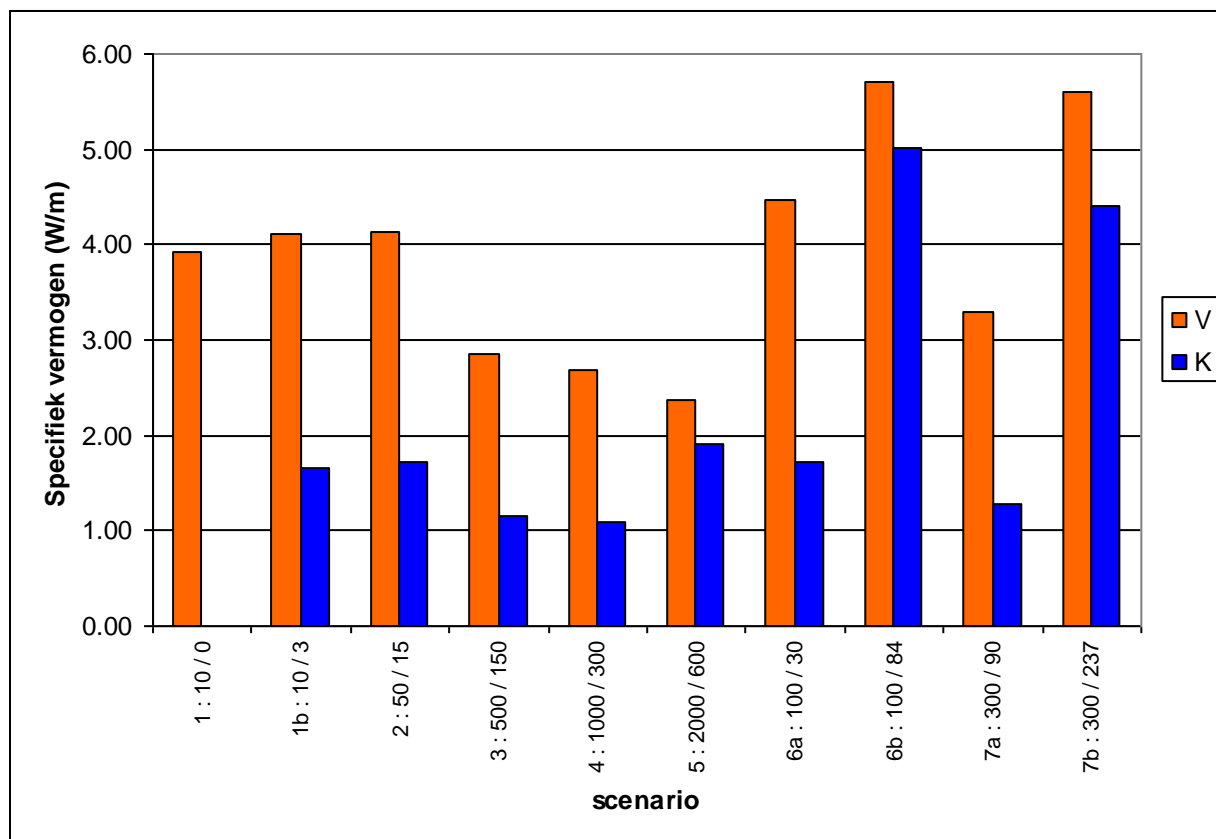
¹⁴ Vaak wordt het specifieke vermogen in W/m gegeven gebaseerd op de capaciteit van de warmtepomp (kW), die houdt echter geen rekening met het aantal bedrijfsuren. Daarom wordt hier het specifieke vermogen op basis van de totale energievraag (MWh) gebruikt: 10 MWh/jaar bij een lengte van 216 meter komt overeen met $10.000.000 / 8760 / 216 = 5,3 W/m$.

thermische interactie met de omringende bodemwarmtewisselaars toe. Alleen bij een grotere mate van energiebalans zijn dan nog hoge specifieke vermogens mogelijk.

Figuur 8. Gemiddelde mediumtemperatuur enkele geselecteerde scenario's.



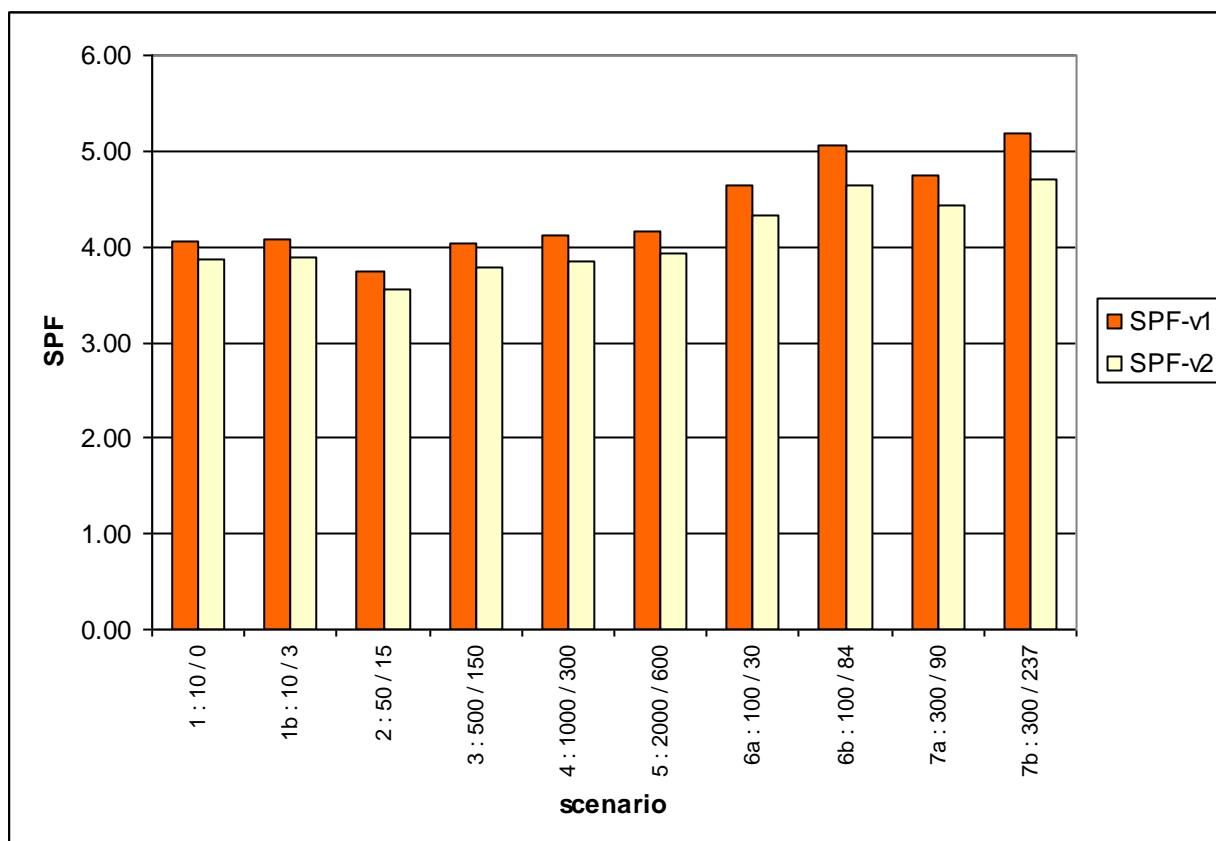
Figuur 9. Specifieke vermogen (W/m) bij basislast voor verwarming (V) en koelbedrijf (K).



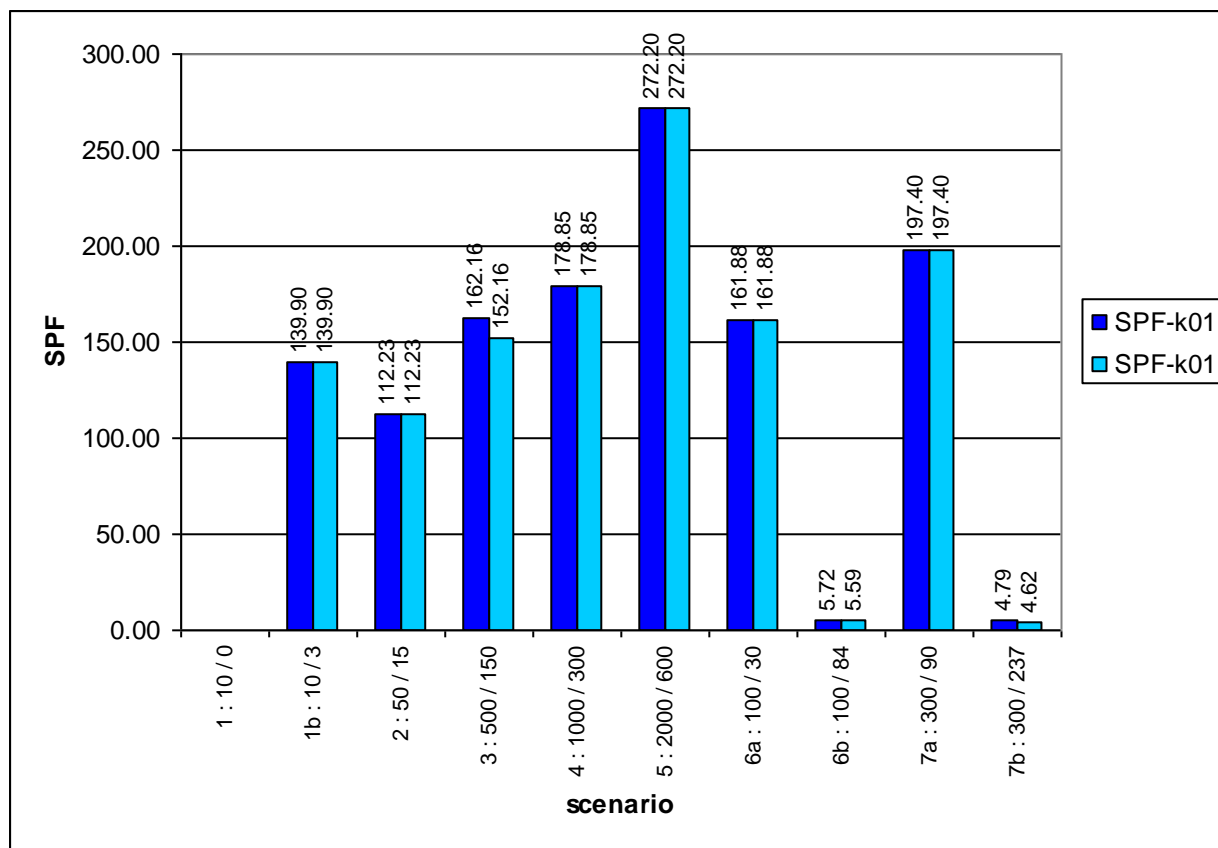
Figuur 10 geeft de seizoens prestatie factoren (SPF) voor verwarming, met alleen compressorenergie (zonder de bronpompenergie) en met zowel compressorenergie als bronpompenergie. Voor de woningbouwprojecten ligt de SPF rond of net onder de 4,0 (dit is de SPF voor ruimteverwarming en tapwater), voor de utiliteit (zonder tapwater) ligt de SPF hoger namelijk tussen 4,5 en 5,0. Figuur 11 geeft de prestatiefactoren voor koeling. Deze zijn, omdat het vooral passieve koeling betreft, zeer veel hoger. Voor de scenario's met mechanische koeling bedraagt de SPF altijd nog 4,6 tot 5,6 (inclusief pompenergie).

Naast de verdeling van de warmtevraag in ruimteverwarming en tapwater speelt er nog een andere zaak: ontsmetting ivm legionella preventie. Met een warmtepompsysteem is het normaal gesproken niet mogelijk om water in de tap-buffer tot de vereiste 65 °C te verwarmen. In die gevallen zal ontsmetting plaatsvinden door elektrische bijverwarming. Voor de woningbouwscenario's is een inschatting gemaakt van hoe groot dit effect op het totale rendement is. Voor de ontsmettingscyclus is uitgegaan van een 300 liter tapwaterbuffer die 1 x per week van 55 °C naar 65 °C elektrisch opgewarmd moet worden. Hiervoor is 187 kWh/jaar nodig. Het effect op het verwarmingsrendement is een ongeveer 10% lager rendement (figuur 13).

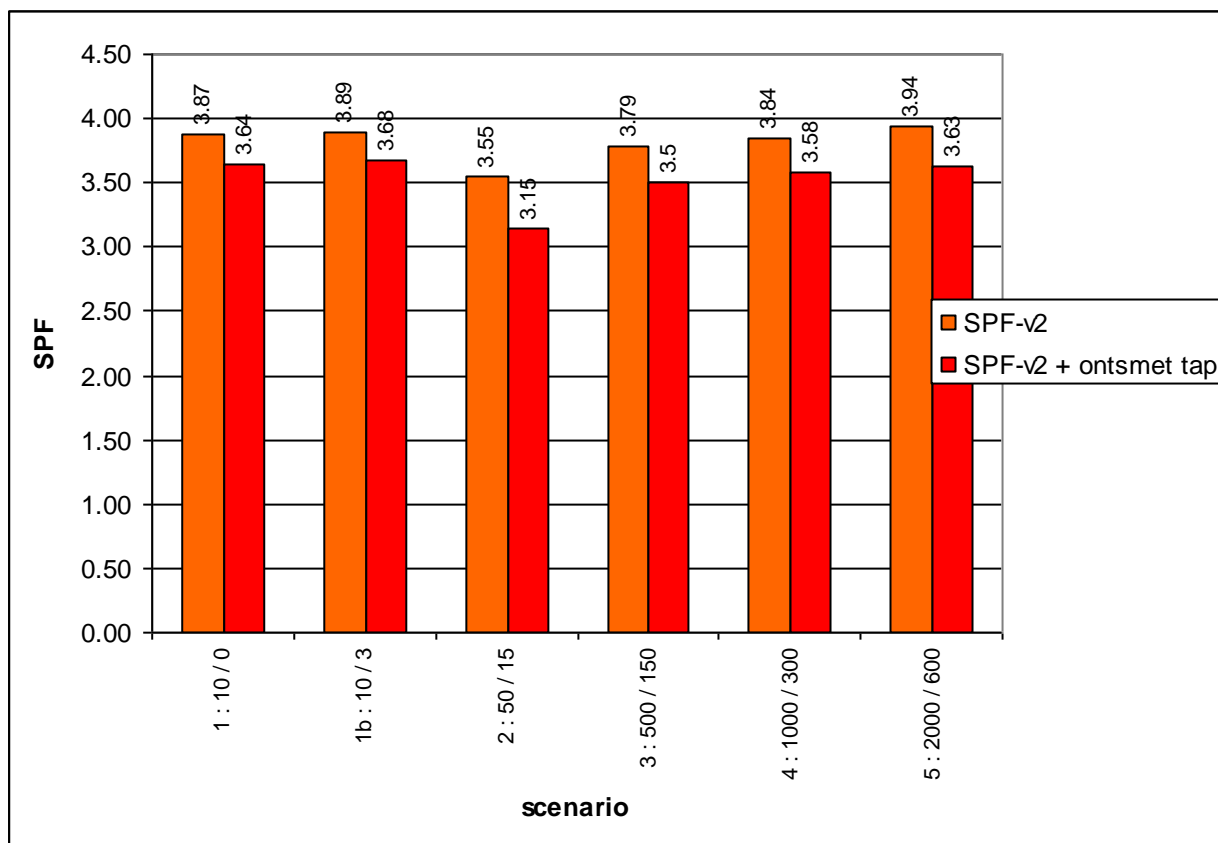
Figuur 10. Seizoensprestatiefactor (SPF) verwarmingsbedrijf. Met alleen compressorenergie (SPF-v1) en met compressor- en bronpompenergie (SPF-v2).



Figuur 11. Seizoensprestatiefactor (SPF) koelbedrijf. Zonder (SPF-k01) en met (SPF-k02) pompenergie (bij passief koelbedrijf wordt de pompenergie altijd meegeteld).



Figuur 12. Seizoensprestatiefactor (SPF) verwarmingsbedrijf. met (SPF-v2) pompenergie en SPF waarbij ontsmetting tapwater meegerekend is.



5 GEVOELIGHEIDSANALYSE

Voor de uit te voeren werkpakketten is het niet mogelijk om binnen het kader van dit project de overige randvoorwaarden te wijzigen om een volledig inzicht in de effecten van alle parameters te krijgen. Omdat veel parameters onderling samenhangen zouden, om een volledig beeld te schetsen, zeer veel berekeningen moeten worden uitgevoerd. Om de effecten van enkele belangrijke parameters globaal in kaart te brengen wordt in dit hoofdstuk voor een tweetal scenario's (een woningbouwproject met een beperkte energiebalans, scenario 2, en een utiliteit scenario met grotere energiebalans, scenario 7b) de gevoeligheid van het ontwerp onderzocht. Bij deze analyse is het rendement niet opnieuw bepaald, het rendement zoals berekend in de referentieontwerpen is gebruikt.

Het effect van de parameters (tabel 2) is bepaald door deze 25% te vergroten of te verkleinen en te berekenen hoe de ontwerplengte van het bodemenergiesysteem moet veranderen om aan dezelfde temperatuurcriteria te voldoen. De resultaten zijn in figuur 13 (scenario 2) en 14 (scenario 7b) weergegeven.

5.1 Bodemtemperatuur

Een lagere bodemtemperatuur heeft een toename van de lengte van het bodemwarmtewisselaarsysteem tot gevolg. In beide scenario's is bij een bodemtemperatuur van 7,9 °C 40% meer lengte nodig. Een hogere bodemtemperatuur leidt tot een kleinere omvang van de bodemwarmtewisselaar: een 22% kleiner systeem voldoet voor scenario 2. Bij een systeem met energiebalans is het effect omgekeerd: omdat de koudevraag een groter effect heeft neemt de ontwerplengte juist toe bij een hogere van bodemtemperatuur.

5.2 Warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van de bodem

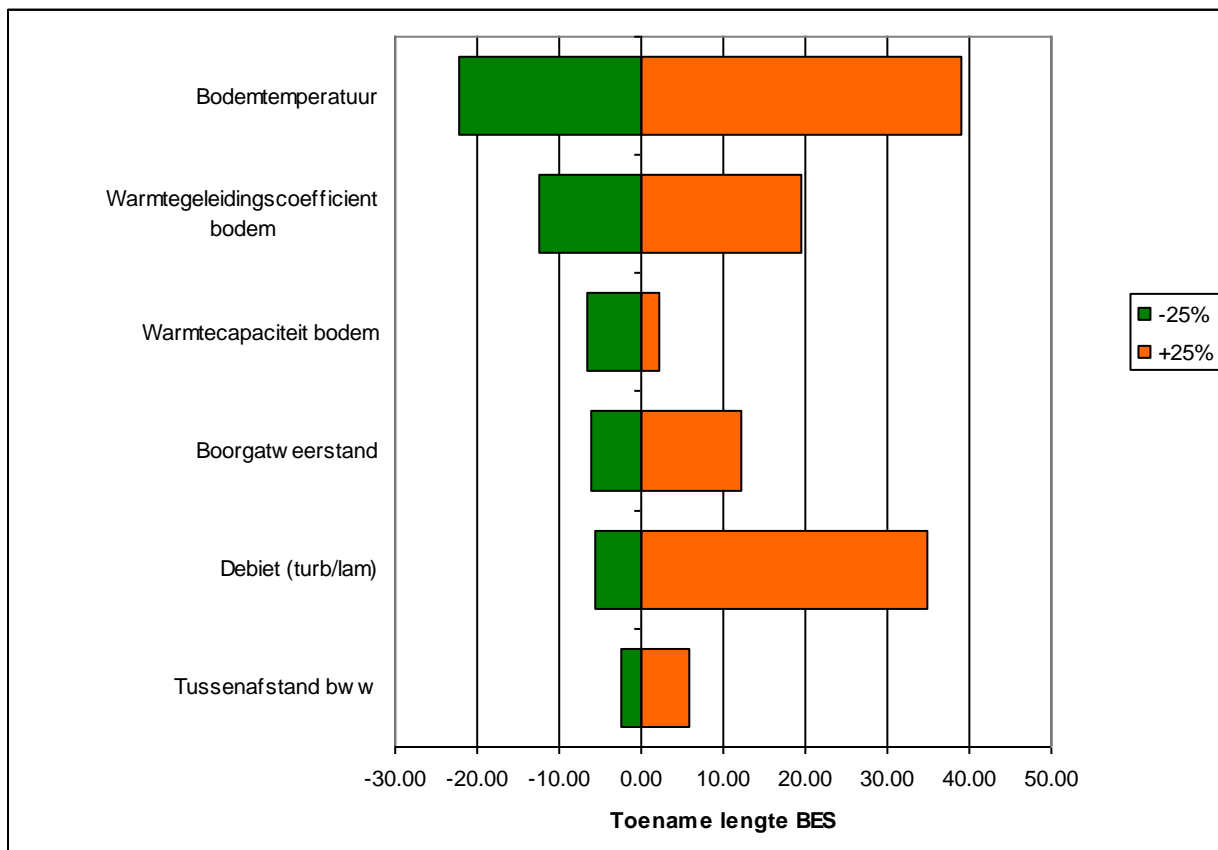
Een hogere bodem-warmtegeleidingscoëfficiënt vermindert de omvang van het systeem met 10 – 12% terwijl een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt tot een 20% grotere bodemwarmtewisselaar leidt. Het effect van warmtecapaciteit is veel kleiner.

5.3 Boorgatweerstand

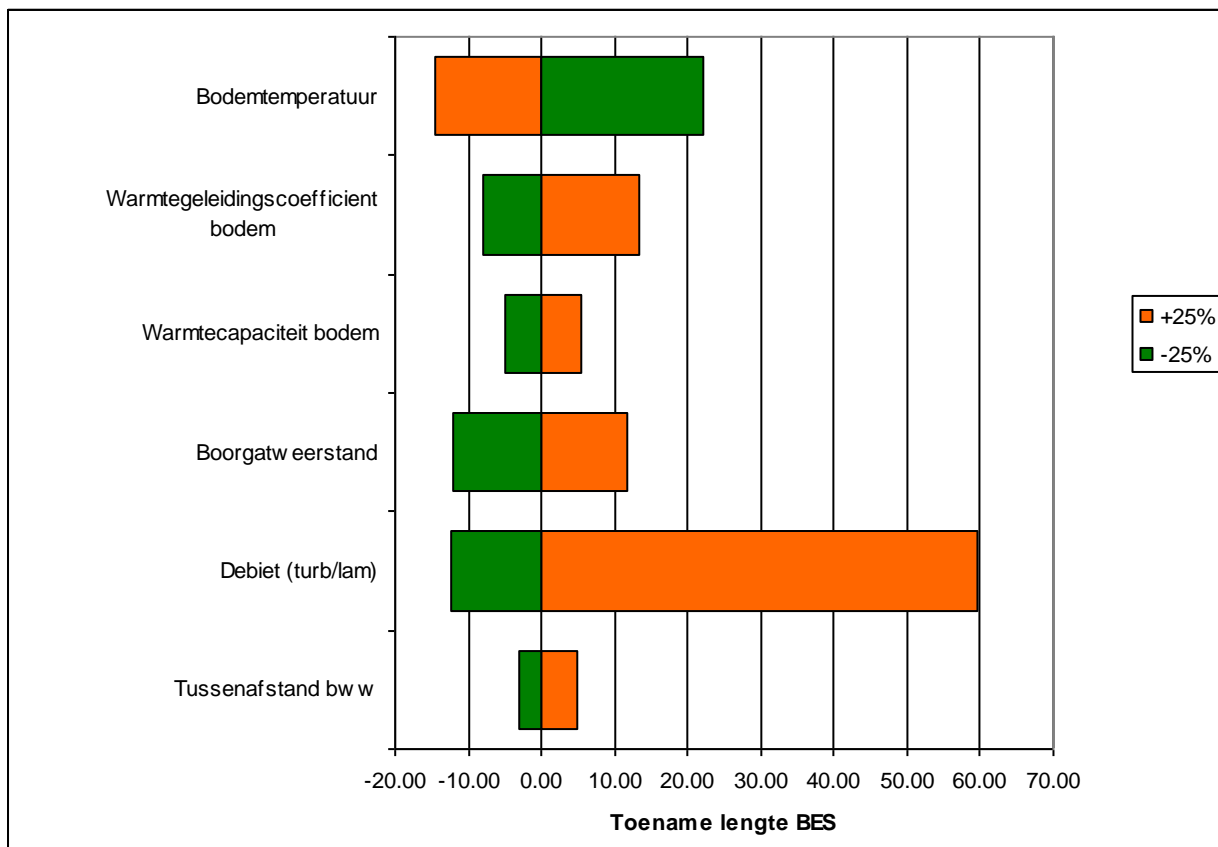
De boorgatweerstand heeft wel een effect (circa 10%), maar vooral het verschil tussen turbulent (Reynolds \gg 2300) en laminair (Re \ll 2300) is groot. Een laminaire stroming vergroot de noodzakelijke lengte met 35 – 40%. Het effect van de afstand ten opzichte van de bodemwarmtewisselaars heeft in deze scenario's een gering effect.

Afgezien van het stromingsprofiel (turbulent / laminair), wat door de ontwerper beïnvloed kan worden, zijn vooral de ongestoorde bodemtemperatuur en warmtegeleidingscoëfficiënt van belang. Andere parameters kunnen in een specifieke situatie belangrijk zijn, maar hebben op de in deze studie gepresenteerde resultaten minder invloed

Figuur 13. Gevoeligheid, effect op ontwerplengte bij veranderen van ontwerpparameter. Scenario 2.



Figuur 14. Gevoeligheid, effect op ontwerplengte bij veranderen van ontwerpparameter. Scenario 7b.



6 Samenvatting

In dit werkpakket zijn de referentietypen en rekenmethode beschreven die als uitgangspunten dienen voor met name de werkpakketten “positieve effecten” en “energiebalans en rendement”.

De referentietypen beschrijven de gekozen bodemparameters (temperatuur, warmtegeleidingscoëfficiënt, warmtecapaciteit), bodemwarmtewisselaar eigenschappen (boorgatweerstand) en circulatiemedium. Daarnaast worden verschillende gebruikstypen (woningbouw, utiliteit) en energievraagpatronen (ruimteverwarming, tapwater en ruimtekoeling) gegeven. Deze referentietypen geven een representatief beeld van de in Nederland voorkomende systemen.

Er is een rekenmethode ontwikkeld waarmee het rendement van de bodemenergiesystemen als functie van warmtepompeigenschappen en brontemperatuur kan worden bepaald. Deze methode houdt rekening met de in de tijd variërende brontemperaturen. In combinatie met een standaard ontwerpprogramma voor gesloten bodemenergiesystemen is vervolgens voor elk referentiesysteem een specifiek ontwerp van het bodemenergiesysteem opgesteld.

De berekende rendementen (seizoensprestatiefactor, SPF) van de woningbouw referenties voor verwarmingsbedrijf ligt tussen de 3,8 en 4,0 (verwarming inclusief tapwater en inclusief bronpomp). Voor de utiliteit (zonder tapwater) ligt de SPF tussen de 4,5 en 4,8.

Voor passief koelbedrijf is de SPF zeer hoog (> 100) door de huidige generatie efficiënte pompen. In de utiliteit, waar de warmtepomp voor koelbedrijf kan worden ingezet, is de SPF nog altijd 4,6 – 5,7.

De beperkte gevoeligheidsanalyse laat zien dat met name de ongestoorde bodemtemperatuur, warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem en boorgatweerstand een belangrijk effect op het ontwerp zullen hebben.