

**METHODE VOOR HET BEPALEN VAN INTERFERENTIE
TUSSEN KLEINE GESLOTEN
BODEMENERGIESYSTEMEN**

Projectnummer: GHNL 011103
Uitgebracht aan: Ministerie van I&M
Opdrachtnummer:
Datum: 30-11-2011

© 2011 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
1.1	Vraagstelling.....	2
1.2	Beoogd resultaat	2
1.3	Opbouw van dit rapport	2
2	<i>ACHTERGROND EN UITGANGSPUNTEN</i>	3
2.1	Achtergrond.....	3
2.2	Uitgangspunten voor uitwerking van de methodiek	4
3	<i>TYPEN SYSTEMEN (SYSTEEMPARAMETERS)</i>	6
3.1	Gebouwtype, energievraagpatroon.....	6
3.2	Overige systeemparemeters.....	8
3.3	Specifieke hoeveelheid energie bodem.....	8
3.4	Gevoeligheid.....	12
4	<i>REKENMETHODE THERMISCHE INVLOEDSAFSTANDEN</i>	15
4.1	Validatie	17
4.2	Gevoeligheid en correctiefactoren	19
4.3	Effect grondwaterstroming	20
5	<i>RESULTAAT</i>	23
5.1	Bepalen interferentie tussen systemen.....	23
5.1.1	Voorbeeld bepalen interferentieafstand	23
6	<i>HANDLEIDING VOOR GEBRUIK</i>	27
6.1	Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem.....	28
6.2	Warmtevraag, koudevraag, omvang bodemwarmtewisselaar	29
6.2.1	Controle mogelijkheden	30
6.3	Bepalen interferentie.....	30
7	<i>REFERENTIES</i>	44

1 INLEIDING

Bodemenergiesystemen gebruiken de bodem als bron of buffer van warmte en koude. Lage temperatuur bodemenergiesystemen, geïnstalleerd op dieptes die variëren van circa 40 tot circa 200 meter, 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 systemen wordt warmte in de bodem getransporteerd door geleiding als gevolg van temperatuurverschillen.

Het voornemen van de overheid is het gebruik van deze vorm van bodemenergie te stimuleren, hiertoe is een ontwerpbesluit tot wijziging van het Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer, het Besluit bodemkwaliteit, het Besluit lozen buiten inrichtingen, het Besluit omgevingsrecht en het Waterbesluit gepubliceerd (Staatscourant 4830, 5 april 2011).

Een belangrijk uitgangspunt bij het op een bepaalde locatie toestaan van een bodemenergiesysteem is dat deze geen zodanige interferentie met eerder geïnstalleerde systemen heeft dat het doelmatig functioneren van betreffende systemen kan worden geschaad. Dit betekent dat ook de werking van het nieuwe systeem niet geschaad mag worden. De regelgeving voorziet op verschillende manieren in het voorkomen van negatieve interferentie:

1. Voor open systemen wordt de interferentie meegenomen bij de verlening van de watervergunning.
2. Voor gesloten systemen die binnen een interferentiegebied¹ worden geïnstalleerd of systemen met een vermogen van 70 kW of meer is een omgevingsvergunning vereist, ook daarbij wordt de interferentie meegenomen.

Voor grote open of gesloten systemen is het vaststellen en voorkomen van mogelijke interferentie onderdeel van de vergunningsprocedure.

Voor kleine open en gesloten systemen is het wenselijk om met standaardafstanden te werken. Als binnen die standaardafstand geen ander bodemenergiesysteem aanwezig is, is interferentie uitgesloten of zodanig klein dat het doelmatig gebruik en functioneren van de systemen niet in het geding is.

Voor kleine open systemen buiten interferentiegebieden wordt in principe uitgegaan van een minimale afstand tot andere bodemenergiesystemen en andere bij het bodembeheer betrokken belangen. Als er binnen die afstand een ander bodemenergiesysteem of belang aanwezig is, dient met een berekening bepaald te worden wat het hydrologische en thermische invloedsgebied is, en wat daarbinnen de effecten op de aanwezige belangen zijn.

Voor kleine gesloten systemen is de minimale afstand, die op theoretische gronden kan worden bepaald uit de bodemeigenschappen en tijd dat het systeem in bedrijf is (25-50 jaar), waarbinnen zeker geen interferentie kan optreden groot (> 80 - 125 meter). Het hanteren van een dergelijke minimale afstand om negatieve interferentie te voorkomen maakt de realisatie van kleinere projecten in elkaars nabijheid nagenoeg onmogelijk. Afhankelijk van het aantal systemen en de afstand daartussen zal in veel gevallen het temperatuureffect (interferentie) ook bij kleinere afstanden zo klein blijven dat de systemen toegestaan kunnen worden. Er dient dan

¹ Een interferentiegebied wordt als zodanig aangewezen door provincie of gemeente. Binnen interferentiegebieden worden extra eisen aan bodemenergiesystemen gesteld, of worden deze in plaats in de ruimte (horizontaal en/of verticaal) beperkt, om tot een doelmatig gebruik van de bodem te komen. Interferentiegebieden zullen vooral in drukke gebieden worden aangewezen, waar verschillende functies van de bodem elkaar in de weg kunnen zitten.

wel een (eenvoudige) methode beschikbaar te zijn om deze temperatuureffecten te bepalen en op basis daarvan een ontheffing te verlenen.

1.1 Vraagstelling

Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) heeft Groenholland Geo-Energiesystemen BV opdracht gegeven deze methodiek te ontwikkelen om de interferentieafstand voor kleine gesloten bodemenergiesystemen te bepalen. Voor deze opdracht is de vraagstelling als volgt:

Ontwikkel een methodiek waarmee het thermisch invloedsgebied van kleine gesloten systemen (met een ondergronds vermogen tot 70 kW) kan worden afgeleid in het kader van meldingen en aanvragen voor een omgevingsvergunning van deze systemen.

1.2 Beoogd resultaat

Eindresultaat is een methode om vast te stellen wat de temperatuureffecten tussen gesloten bodemenergiesystemen zijn. Op basis van een maximaal toegestaan (cumulatief) temperatuureffect kan dan bepaald worden of er sprake is van netagieve interferentie. Dit temperatuureffect is afhankelijk van:

- Aantal systemen in de nabijheid
- Totale (netto) energiebelasting van de bodem
- Bodemeigenschappen
- Grondwaterstroming

Het eindresultaat wordt weergegeven in een aantal figuren. Voor het gebruik van de methode wordt een korte handleiding bijgevoegd.

1.3 Opbouw van dit rapport

Dit rapport, met het resultaat van dit onderzoek, is als volgt opgebouwd:

1. Inhoudelijke achtergronden en de uitgangspunten die gesteld zijn voor de uitwerking van de methodiek zijn beschreven in hoofdstuk 2.
2. In hoofdstuk 3 wordt een globale omschrijving gegeven van verschillende typen systemen die voor kunnen komen. Het gaat daarbij om gebruiksfunctie (vooral met betrekking tot energievraagpatroon), bodemtypen en verschillende bodemwarmtewisselaar-systeemconcepten. Deze referentietypen zijn vooral bedoeld om een koppeling te leggen met in de praktijk voorkomende systemen. Of de gekozen referentietypen en de gekozen parameters representatief zijn voor de meest voorkomende situaties is bepaald door het uitvoeren van een beperkte gevoeligheidsanalyse.
3. Er volgt in hoofdstuk 4 een beschrijving van de gevolgde (reken-)methode en de aannames waarop deze gebaseerd is. De methode wordt globaal gevalideerd door de berekenende temperatuurverandering in de bodem te vergelijken met een standaard rekenmethode.
4. Effecten van grondwaterstroming worden bepaald en een grenswaarde voor grondwaterstroming wordt bepaald.
5. De resultaten van de berekeningen worden toegelicht en samengevat in één of meer tabellen, nomogrammen.
6. Er wordt een korte handleiding en toelichting voor het gebruik van de resultaten gegeven.

2 ACHTERGROND EN UITGANGSPUNTEN

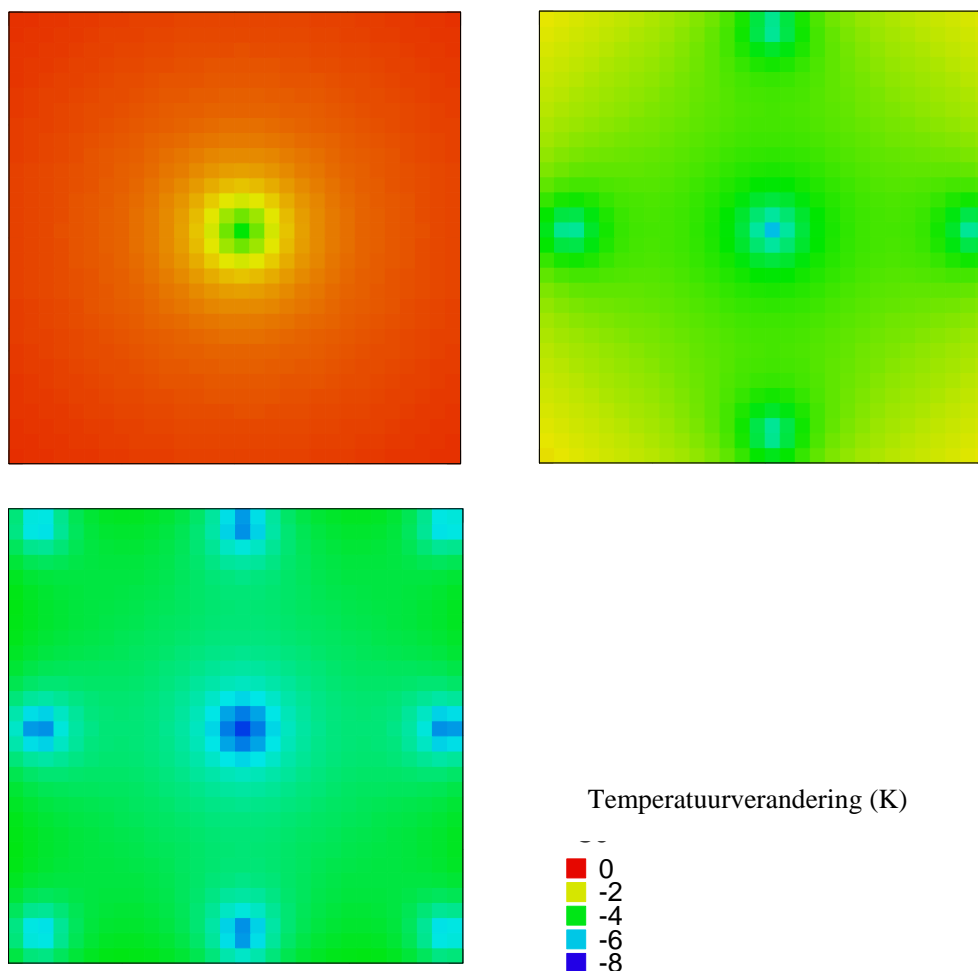
2.1 Achtergrond

Voor kleine gesloten systemen (met een maximaal bodemzijdig vermogen van 70 kW of minder) bestaat er op dit moment geen duidelijke en praktisch toepasbare eenvoudige grens aan de minimale afstand tussen systemen waarbij er geen sprake is van negatieve interferentie. Het blijkt niet eenvoudig te zijn om een standaardafstand vast te stellen, onder andere doordat:

1. De minimale afstand afhankelijk is van het totale aantal systemen in de omgeving. Hebben bijvoorbeeld twee systemen op een bepaalde afstand een verwaarloosbare onderlinge invloed, bij drie of meer systemen gaan de effecten sommeren waardoor de effecten niet meer verwaarloosbaar zijn.

Als voorbeeld geven we in figuur 1 de temperatuurverandering voor drie verschillende configuraties weer. Alle bodemwarmtewisselaars hebben dezelfde energievraag aan de bodem.

Figuur 1. Temperatuurverandering voor verschillende configuraties bodemwarmtewisselaars (gelijkblijvende energievraag): linksboven, een enkele bodemwarmtewisselaar; rechtsboven, een bodemwarmtewisselaar omgeven door vier andere bww; linksonder, een bodemwarmtewisselaar omgeven door acht bww.



In de situatie met vier omringende bodemwarmtewisselaars koelt de centrale bodemwarmtewisselaar 2,12 °C meer af dan in de uitgangssituatie, bij acht omringende warmtewisselaars bedraagt de extra afkoeling al 3,61 °C. De extra afkoeling op een willekeurige locatie hangt af van:

- a) Het aantal omringende bodemwarmtewisselaars en hun energievraag.
 - b) De afstand tot de locatie.
 - c) De eigenschappen (zoals warmtegeleidingscoëfficiënt) van de bodem.
2. Een conservatieve afstand zal zo groot kunnen zijn dat het de realisatie van systemen belemmert. Het is bijvoorbeeld mogelijk op eenvoudige wijze de afstand te bepalen waarop er, na een bepaalde tijd, zeker geen (meetbare) temperatuurverandering optreedt. Deze afstand, die alleen afhangt van de tijd en de warmtevereffeningscoëfficiënt van de bodem, is vrij groot: voor een goed geleidende bodem > 120 meter.
 4. De minimale afstand is sterk afhankelijk van de totale energie-uitwisseling en balans tussen warmte- en koudevraag: bij een eenzijdige vraag (alleen of voornamelijk verwarming, alleen of voornamelijk koeling) zal het gebruikte bodemvolume in de loop der jaren steeds groter worden terwijl bij een zekere energiebalans het bodemvolume meer constant blijft.
 5. De minimale afstand is afhankelijk van bodemeigenschappen, zoals warmtegeleidingscoëfficiënt, die sterk kunnen variëren.
 6. De systeemomvang "klein systeem" is gedefinieerd als een capaciteit (vermogen, kW). Voor de interferentie tussen gesloten systemen is juist de geleverde energiehoeveelheid (in Gigajoule [GJ] of kilowattuur [kWh]) bepalend. Uitgangspunt voor het bepalen van het temperatuureffect is de specifieke energiehoeveelheid per meter bodemwarmtewisselaar per jaar (kWh/meter/jaar).

Toch is het wenselijk over een zo eenvoudig mogelijke methode te beschikken waarmee zonder complexe berekeningen, voor kleine gesloten systemen (<70 kW capaciteit), bepaald kan worden of er sprake is van negatieve interferentie.

2.2 Uitgangspunten voor uitwerking van de methodiek

Verskillende uitgangspunten hebben een rol gespeeld bij de gekozen methode:

1. Alhoewel we veel verschillende gebruikstypen kunnen omschrijven is, in de basis, de totale verwarmings- en koellast aan de bodem (het energievraagpatroon) bepalend voor het thermisch invloedsgebied. De rekenmethode is gebaseerd op de *specifieke hoeveelheid energie: kWh per jaar per meter bodemkoppeling* van een systeem.
2. De opgestelde condensor- en verdampercapaciteit zijn voor het ontwerp van een BWW systeem van belang, maar spelen voor de interferentievraag geen rol. Dit betekent ook dat de keuze van type bodemwarmtewisselaar, boorgat en boorgatafvulling, opstellingsvorm etc. niet van belang is voor het berekenen van het thermische invloedsgebied.
3. De keuze voor het type bodemwarmtewisselaar, boorgat en boorgatafvulling etc. heeft wel een invloed op het ontwerp van het bodemwarmtewisselaarsysteem en daarom ook op de specifieke hoeveelheid energie die voor het berekenen van de interferentieafstand nodig is. Daarom is, bij het bepalen van de specifieke hoeveelheid energie die wordt uitgewisseld met de bodem door het maken van een aantal standaard ontwerpen van de referentiesystemen hier wel rekening mee gehouden.

4. Een bepaald energievraagpatroon kan nog altijd tot veel verschillende ontwerpen van bodemwarmtewisselaarsystemen leiden. Getracht is de hier beschreven methode onafhankelijk van het specifieke ontwerp van het bodemwarmtewisselaarsysteem te maken. De methode is gebaseerd op berekeningen voor een enkele bodemwarmtewisselaar. Alhoewel het gebruik van het centrum van een bodemwarmtewisselaarsysteem bij het bepalen van de onderlinge afstand een vereenvoudiging van de werkelijkheid is (eigenlijk zou men de kleinste afstand tussen twee aanpalende systemen moeten nemen) is ervan uitgegaan dat dit effect te verwaarlozen is. Hierbij is van de gedachte uitgegaan dat weliswaar bij de helft van de warmtewisselaars een groter effect optreedt, maar ook bij de andere helft een kleiner effect.
5. Voor verschillende parameters is door middel van een gevoeligheidsanalyse vastgesteld of zij een belangrijk effect hebben. Indien het effect belangrijk bleek is dit als een correctiefactor meegewogen.
6. De methodiek is alleen toepasbaar voor verticale bodemwarmtewisselaar systemen
7. Vooralsnog is de grondwaterstromingssnelheid niet geïntegreerd in de methodiek. Op basis van een beperkte gevoeligheidsanalyse met een grondwaterstromingsmodel zijn grenzen gesteld aan de grondwaterstromingssnelheid waarbij de methode toegepast kan worden.
9. Basis voor de rekenmethode voor het bepalen van de interferentieafstand is het lijnbronmodel.
10. De specifieke hoeveelheid energie voor het bodemwarmtewisselaarsysteem, onder diverse condities, is bepaald met behulp van een standaard ontwerpmethodiek. Hier zijn enkele referentiesystemen voor gedefiniëerd waarvoor het energievraagpatroon is bepaald. Voor verschillende condities (warmtegeleidingscoëfficiënt bodem, boorgatweerstand, ontwerp temperatuur) is vervolgens een bodemwarmtewisselaarsysteem ontworpen. Hieruit volgt een serie van verwarmings- en koelvragen die representatief zijn voor systemen tot een bodemzijdig vermogen van 70 kW.
11. De voor het standaardontwerp benodigde energiegegevens zijn afgeleid uit de energievraagpatronen van diverse projecten en referentiegegevens.
12. De energievraagpatronen zijn uitgedrukt in hoeveelheid warmteonttrekking (warmtevraag) en hoeveelheid warmtetoevoer (koelvraag). In principe maakt het echter niet uit of de warmte aan de bodem wordt onttrokken of toegevoerd, voor een systeem met meer koeling dan verwarming kan de koelvraag als verwarmingsvraag worden genomen en de warmtevraag als koelvraag, het resultaat wordt daardoor niet beïnvloed.

In werkelijkheid is dit iets ingewikkelder, voor een systeem wat de bodem vooral gebruikt om een gebouw te verwarmen is een extra afkoeling van de bodem een negatief effect. Voor een systeem wat de bodem vooral gebruikt om te koelen zal een hogere bodemtemperatuur een negatief effect zijn. In de praktijk zal de warmtevraag nagenoeg altijd overheersen (met name voor kleine systemen die onderwerp van deze studie zijn) en zal alleen afkoeling een negatief effect zijn.

Voor die gevallen dat een systeem toch vooral gebruikt wordt om te koelen kunnen de resultaten van deze studie toch gebruikt worden om een schatting van de effecten te maken door voor dat systeem de koelvraag als warmtevraag in te vullen en de warmtevraag als koelvraag, uiteraard moet dan het teken van de temperatuurverandering omgedraaid worden (temperatuurafname wordt temperatuurtoename). Of het temperatuureffect in dat geval als positief of negatief moet worden aangemerkt dient per geval bekeken te worden.

3 TYPEN SYSTEMEN (SYSTEEMPARAMETERS)

3.1 Gebouwtype, energievraagpatroon

Onder de definitie van "kleine gesloten systemen", dit wil zeggen systemen met een bodemzijdig vermogen kleiner dan 70 kW, vallen diverse gebouwtypen. Om een inzicht te krijgen in de energievraagpatronen voor de verschillende referentietypen is een inschatting gemaakt van a) het bereik van de opgestelde thermische vermogen voor verwarming, mechanische en passieve koeling en b) het bereik van het aantal vollasturen. Voor het vaststellen van het mechanische verwarmings of koelvermogen is een gemiddelde prestatiecoëfficiënt (SPF) van respectievelijk 4,2 en 3,8 toegepast, voor passieve koeling is een prestatiecoëfficiënt van 15 gebruikt.

Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende typen en belangrijkste kengetallen waarvan uitgegaan is. De totalen uit tabel 1b zijn berekend door de maximale capaciteit te vermenigvuldigen met het minimale aantal draaiuren en de minimale capaciteit met het maximale aantal draaiuren. Hieraan ligt de gedachte ten grondslag dat het aantal draaiuren omgekeerd evenredig is met de capaciteit (bij gelijkblijvende totale vraag).

Tabel 1a. 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	Gebouwtype	Toepassing			Verwarming Condensor kW	Koeling Verdamper 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 1b. 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	350	750
B2	12,5	14,0	1250	1750	0	0	350	750
B3	17,5	17,5	1250	1750	6,2	7	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	58,9	500	1000
D3	70,0	72,0	1000	1800	29,6	48	500	1000

De kengetallen zijn afkomstig uit de praktijk en de resultaten zijn vergeleken met enkele studies (bronnen: Groenholland 2005, Uitzinger, 2004).

Voor het berekenen van de interferentieafstand moeten we allereerst de totale warmte en koudevraag vertalen naar een bodemzijdige energievraag. Deze is afhankelijk van het rendement van het warmtepomp / koelsysteem. Op basis van de bovenomschreven referentietypen en de daarbij behorende minimale en maximale projectomvang, kunnen we de volgende bodemzijdige energievraag vaststellen, we nemen hier een prestatiefactor (SPF, seizoensmatige prestatie factor) die het vermogen aan de bodem vrij hoog inschat:

Tabel 2. Netto (aan de bodem) warmte en koudevraag berekend aan de hand van bereik uit tabel 1 en met conservatieve aanname voor SPF (voor koudevraag: zowel mechanisch [MK] als passief [PK]).

Warmtevraag MWh	5	10	25	50	75	100	125	
<i>SPF MV</i>	4,3	3,8	7,7	19,2	38,4	57,6	76,7	95,9
Koudevraag MWh	1	5	10	25	50	75		
<i>SPF MK</i>	3,5	1,3	6,4	12,9	32,1	64,3	96,4	
<i>SPF PK</i>	15	1,1	5,3	10,7	26,7	53,3	80,0	

Het is hier overigens niet zozeer van belang dat we deze bodemzijdige energievraag heel nauwkeurig bepalen (we kennen immers de werkelijke SPF getallen niet), maar vooral dat we uitkomen op een voldoende bereik (minimum en maximum waarde) die als invoer voor de berekeningen gaan dienen

3.2 Overige systeemparameters

- Warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit bodem. Deze ontwerpparameters zijn van belang voor het vaststellen van de interferentieafstand.
- Ongestoorde bodemtemperatuur, geothermische warmteflux. Dit zijn belangrijke ontwerpparameters, maar beïnvloeden de interferentieafstand niet. Alle resultaten worden gepresenteerd als temperatuurverandering en zijn daarmee bij elke locatiespecifieke bodemtemperatuur toe te passen.
- Bodemwarmtewisselaar, boorgatspecificatie, onderlinge afstand, diepte debieten, circulatiemedium. Voor de werking van het systeem zeer relevant, maar voor de interferentieafstand niet. De keuzes die door de ontwerper/bouwer van het systeem gemaakt worden vertalen zich naar een specifieke energievraag van de bodemwarmtewisselaar, dit is samen met de bodemeigenschappen bepalend voor de interferentieafstand.
- Bodemwarmtewisselaar, opstellingsvorm. Dit is uiteraard van belang. Echter, uit oogpunt van praktische toepasbaarheid worden de berekeningen uitgevoerd vanuit het centrum van het bodemwarmtewisselaarsysteem. De verschillen op individuele wisselaars middelen daarbij uit (sommigen hebben een groter, andere een kleiner, temperatuureffect).
- Tijdstip in bedrijf stellen: kan effect hebben op het systeemontwerp, maar is voor interferentieafstand niet van belang.
- Grondwaterstroming kan van groot belang zijn voor interferentieafstand, maar transporteert warmte door een heel ander mechanisme (massatransport in plaats van geleiding). Effecten van grondwaterstroming zijn niet in een vereenvoudigde standaardmethode op te nemen. Tenminste wordt een maximale grondwaterstroming (en hoe deze te bepalen) opgenomen waaronder de hier gepresenteerde methode toepasbaar is.

3.3 Specifieke hoeveelheid energie bodem

De specifieke energievraag aan de bodem vormt de basis voor de berekening, hiermee wordt het hele ontwerp van een systeem vertaald naar een waarde die in een algemene rekenmethode gebruikt kan worden voor het bepalen van de interferentieafstand. De specifieke energievraag aan de bodem is gedefinieerd als:

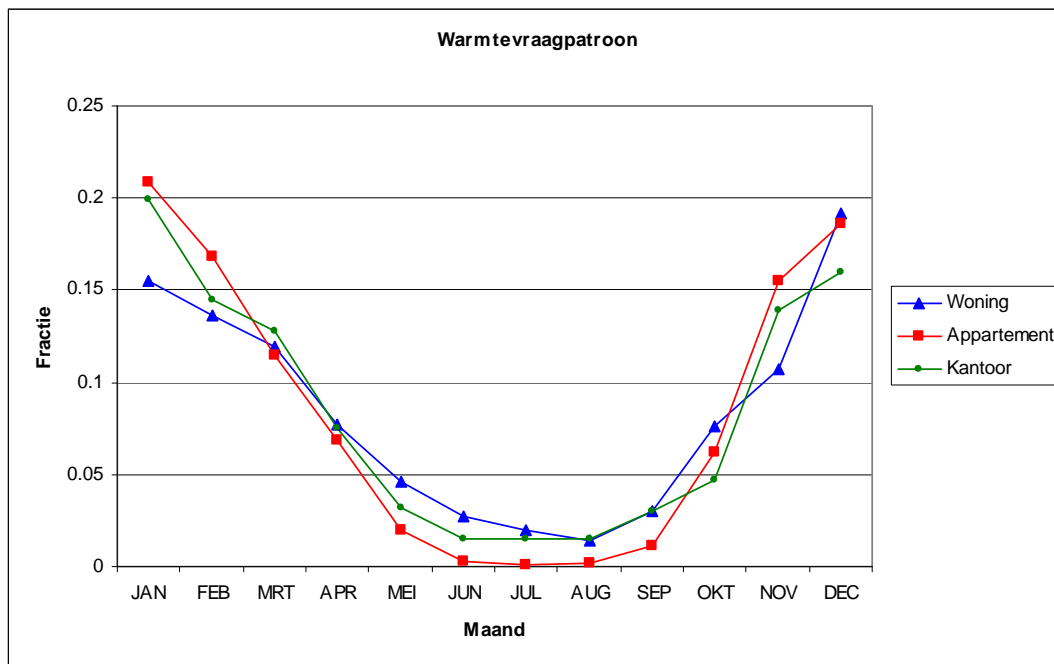
De per tijdseenheid uitgewisselde hoeveelheid energie per meter bodemwarmtewisselaar.

In § 3.1 zijn de totale verwarmings- en koellasten gegeven voor een aantal referentietypen en is daarmee de bodemzijdige energievraag bepaald voor gesloten bodemenergiesystemen met een maximale capaciteit van 70 kW bodemzijdig.

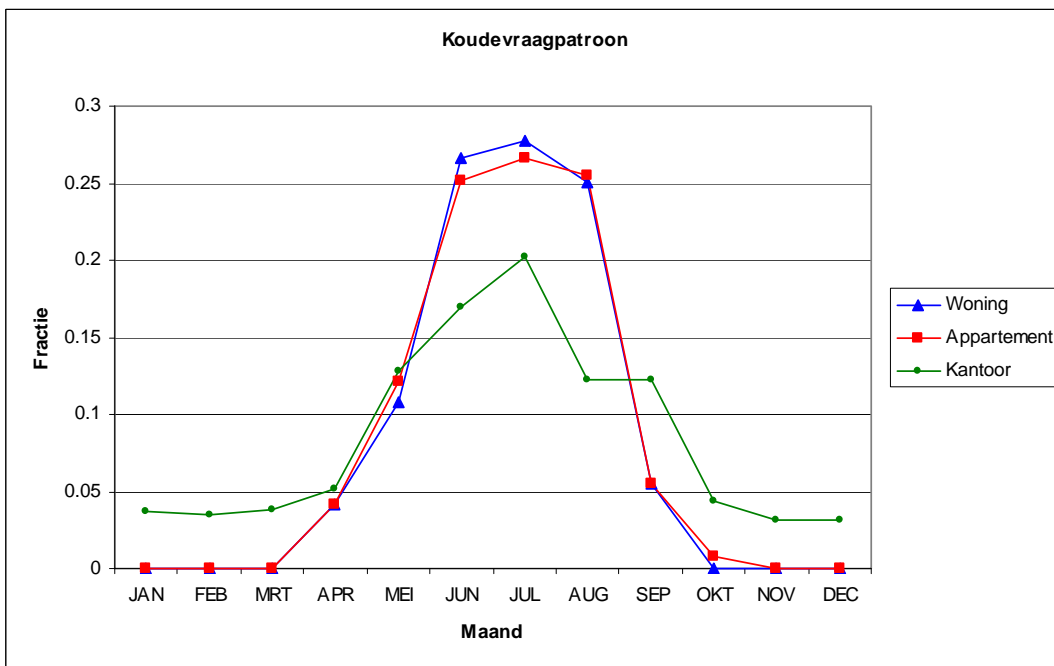
Voor het berekenen van de interferentieafstanden moeten de energievraagpatronen vertaald worden naar een specifieke hoeveelheid energie in kWh/meter/jaar. Om dit te bepalen zijn standaard ontwerpberoeeningen uitgevoerd met het ontwerpprogramma EED (Earth Energy Designer, Eskilson et al 2000). Daarbij worden de energietotalen (verwarmingsvraag en koelvraag in kWh/jaar) verkregen uit de referentietypen in § 3.1. Deze worden verdeeld over de maanden op basis van een synthetisch energieprofiel.

Voorbeelden voor een verwarmings-energieprofiel en koel-energieprofiel worden in figuur 2 en figuur 3 gegeven. De verschillen in verwarmingsvraag voor de referentietypen "woning", "appartement" en "kantoor" zijn klein, daarom wordt voor de verwarmingsvraag een gemiddeld profiel gebruikt. Voor de koelvraag is duidelijk dat met name het referentietype "kantoor" een afwijkend patroon heeft: meer koelvraag gedurende de wintermaanden en daardoor relatief minder in de zomer: de koelvraag is meer gelijkmatig verdeeld.

Figuur 2. Referentietypen warmtevraagpatroon.



Figuur 3. Referentietypen koudevraagpatroon



Voor het bepalen van de specifieke hoeveelheid energie en het bijbehorende ontwerp van het bodemwarmtewisselaarsysteem is niet zozeer het gebouwtype maar de totale energievraag (uitgesplitst in verwarming en koeling) en hoe deze over het jaar verdeeld is van belang. Op basis van de referentietypen uit 3.1 kunnen we afleiden dat voor alle systemen de warmtevraag varieert tussen 5 MWh en 125 MWh per jaar en de koelvraag tussen 0 MWh en 75 MWh per jaar. Houden we rekening met de prestatiecoëfficiënten van de systemen (SPF) dan varieert de netto vraag aan de bodem van 0 tot 100 MWh/jaar (verwarming en koeling). Voor de utiliteit kunnen ook energiescenario's voorzien worden waar de koudevraag de warmtevraag overtreft, maar aangezien niet zozeer het injecteren of onttrekken van warmte van belang is, maar alleen de verhouding, kunnen we volstaan met het berekenen van één reeks.

Belangrijke invloed op het ontwerp van een BWW systeem, en daarmee op het specifieke vermogen, hebben:

- Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem: deze is gevarieerd tussen 1,5; 2,0 en 2,5 W/mK. Deze bandbreedte is representatief voor nagenoeg alle locaties in Nederland.
- Boorgatweerstand (Rb): deze is ingevoerd als effectieve boorgatweerstand van 0,1 respectievelijk 0,2 K/(W/m). Deze twee waarden zijn representatief voor bodemwarmtewisselaars met een goede thermische karakteristiek (Rb 0,1) en een slechte thermische karakteristiek (Rb 0,2).
- Ontwerp temperatuur (gemiddelde mediumtemperatuur bij basislast), deze is in eerste instantie bepaald op 0 °C voor verwarming, 20 °C voor passieve koeling en 27 °C voor mechanische koeling. Met name voor de kleine clusters in de woningbouw is een aanvullende berekening uitgevoerd met een ontwerp temperatuur van -2 °C.
- Opstellingsvorm van de bodemwarmtewisselaar: deze is gevarieerd van 1 enkele BWW tot een opstelling van 2 x 20 en 8 x 10 (maximale interactie).

Andere ontwerp parameters zijn als volgt ingesteld:

- Warmtecapaciteit bodem: 2,25 MJ/m³K.
- Bodemtemperatuur: 10 °C.
- Geothermische flux : 0 W/m².
- Tussenafstand warmtewisselaars : 6 meter.
- Pieklast, deze wordt berekend op basis van de basislast en 1750 draaiuren verwarming, 750 draaiuren koeling. Maximale theoretische warmtevraag voor een systeem met een bodemzijdig vermogen van 70 kW bedraagt dan 122,5 MWh. Als maximale systeemomvang is naar boven afgerond 150 MWh (85,7 kW capaciteit bij 1750 draaiuren).
- Simulatietijd : 25 jaar.

Tabel 3a en tabel 3b geven voor de warmtevraag en koudevraag de gemiddelde specifieke warmtestroom (W/m) weer voor verschillende scenario's. Figuur 4, 5 en 6 geven de seizoensverdeling van de specifieke warmtestromen weer.

Een gedetailleerde analyse van de resultaten voert voor deze studie te ver. Er kunnen wel een aantal globale conclusies getrokken worden:

- De specifieke warmtevraag varieert tussen de 0,2 en 18 W/m.
- De specifieke koudevraag varieert tussen de 0,1 en 27 W/m.
- De specifieke energiestroom is kleiner voor de grotere systemen (door interactie tussen de bodemwarmtewisselaars).
- De specifieke energieonttrekking is groter bij systemen met een energiebalans.
- De specifieke energiestroom is groter bij een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem.
- De specifieke energiestroom is groter bij een lagere boorgatweerstand.

In totaal zijn zo'n 90 ontwerpberekeningen uitgevoerd, die allemaal een ander patroon van seizoensvraag aan de bodem hebben opgeleverd. Deze verzameling specifieke energievraagpatronen vormen de basis voor de met het ontwikkelde simulatiemodel te berekenen interferentieafstanden.

Tabel 3a. Warmtevraag, specifieke warmtestroom bodemwarmtewisselaars (gemiddeld over verwarmingsseizoen) voor diverse scenario's. W: totale warmtevraag (MWh/jaar), K: totale koudevraag (MWh/jaar), OT: ontwerptemperatuur (°C), OV: opstellingsvorm, λ : warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK), Rb: boorgatweerstand (K/(W/m)).

				Warmtevraag					
				Specifieke gemiddelde warmtestroom (W/m)					
				λ	1,5		2,0		2,5
W	K	OT	Rb	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
			5	0	0	1x1	4,7	3,8	5,6
5	2,5	0	1x1	7,5	6,0	8,9	6,9	10,2	7,6
5	5	0	1x1	7,7	6,1	9,2	7,0	10,4	7,7
5	0	-2	1x1	5,6	4,5	6,8	5,3	7,8	5,8
5	2,5	-2	1x1	9,0	7,2	10,8	8,3	12,3	9,1
5	5	-2	1x1	9,4	7,4	11,2	7,4	12,6	9,2
35	0	0	2x6	3,2	2,7	4,0	3,2	4,7	3,7
35	17,5	0	2x6	6,1	5,0	7,5	5,9	8,8	6,6
35	35	0	2x6	7,9	6,1	9,4	7,1	10,5	7,7
150	0	0	2x20	2,0	1,8	2,4	2,1	3,0	2,4
150	75	0	2x20	2,7	2,3	3,3	2,7	3,8	3,1
150	150	0	2x20	4,6	3,9	6,0	4,7	7,3	5,6
150	0	0	8x10	5,6	4,6	6,8	5,4	6,6	6,0
150	75	0	8x10	8,2	6,3	9,5	7,2	10,8	7,8
150	150	0	8x10	7,7	6,2	9,3	6,9	10,6	7,7

Tabel 3b. Koudevraag, specifieke warmtestroom bodemwarmtewisselaars (gemiddeld over koelseizoen) voor diverse scenario's. W: totale warmtevraag (MWh/jaar), K: totale koudevraag (MWh/jaar), OT: ontwerptemperatuur (°C), OV: opstellingsvorm, λ : warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK), Rb: boorgatweerstand (K/(W/m)).

				Koudevraag							
				Specifieke gemiddelde warmtestroom (W/m)							
				λ	1,5		2,0		2,5		
W	K	OT	OV	Rb	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	
5	0	0	1x1								
5	2,5	0	1x1		4,55	3,64	5,43	4,19	6,20	4,63	
5	5	0	1x1		10,83	8,58	12,81	9,78	14,50	10,73	
5	0	-2	1x1								
5	2,5	-2	1x1		5,47	4,38	6,54	5,04	7,46	5,56	
5	5	-2	1x1		13,18	10,30	15,61	10,30	17,68	12,89	
35	0	0	2x6								
35	17,5	0	2x6		-3,69	-3,06	-4,57	-3,58	-5,36	-4,03	
35	35	0	2x6		-11,08	-8,54	-13,09	-9,87	-14,74	-10,82	
150	0	0	2x20								
150	75	0	2x20								
150	150	0	2x20		-2,80	-2,34	-3,67	-2,88	-4,44	-3,42	
150	0	0	8x10		-3,39	-2,79	-4,11	-3,30	-3,99	-3,65	
150	75	0	8x10		-11,45	-8,74	-13,29	-10,13	-15,06	-10,87	
150	150	0	8x10		-10,74	-8,67	-12,95	-9,72	-14,77	-10,80	

3.4 Gevoeligheid

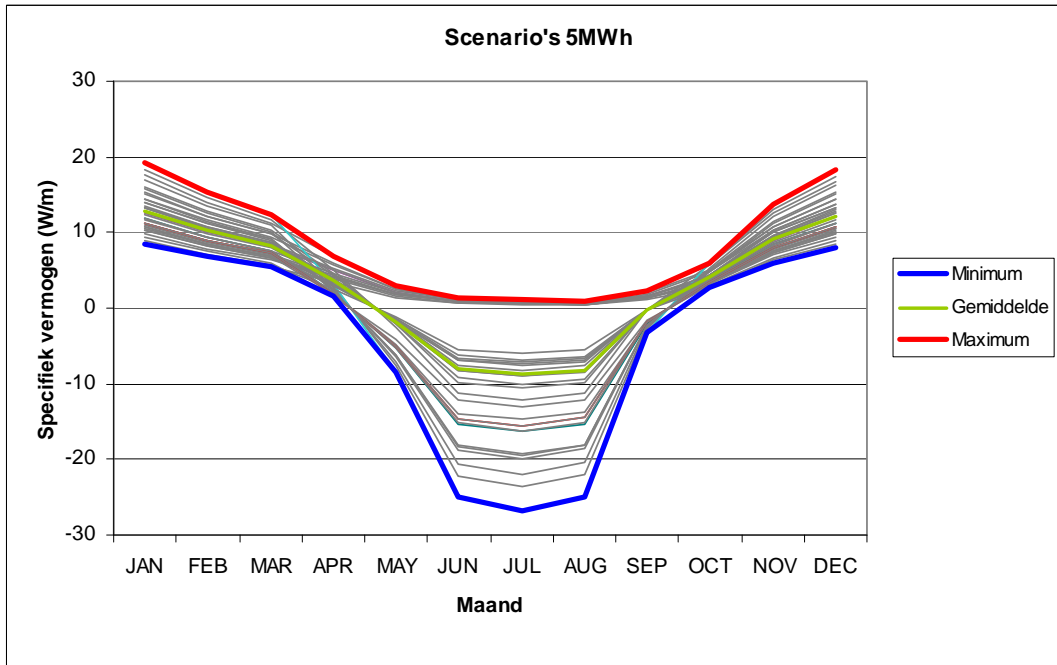
Bij de diverse scenario's zijn alleen twee boorgatweerstand en slechts één waarde voor de tussenafstand en warmtecapaciteit van de bodem gebruikt. Voor een energieprofiel (warmtevraag 35 MWh, geen koelvraag, opstelling 2x6) zijn deze parameters en voor de warmtegeleidingscoëfficiënt $\pm 20\%$ gevarieerd en is vastgesteld wat het effect is op de specifieke warmteonttrekking (figuur 7).

Voor de boorgatweerstand van 0,1 K/(W/m) is het effect van een 20% lagere of hogere weerstand 4 à 6% hogere of lagere specifieke warmtestroom. Voor de boorgatweerstand van 0,2 K/(W/m) is het effect iets groter: 6 à 8%.

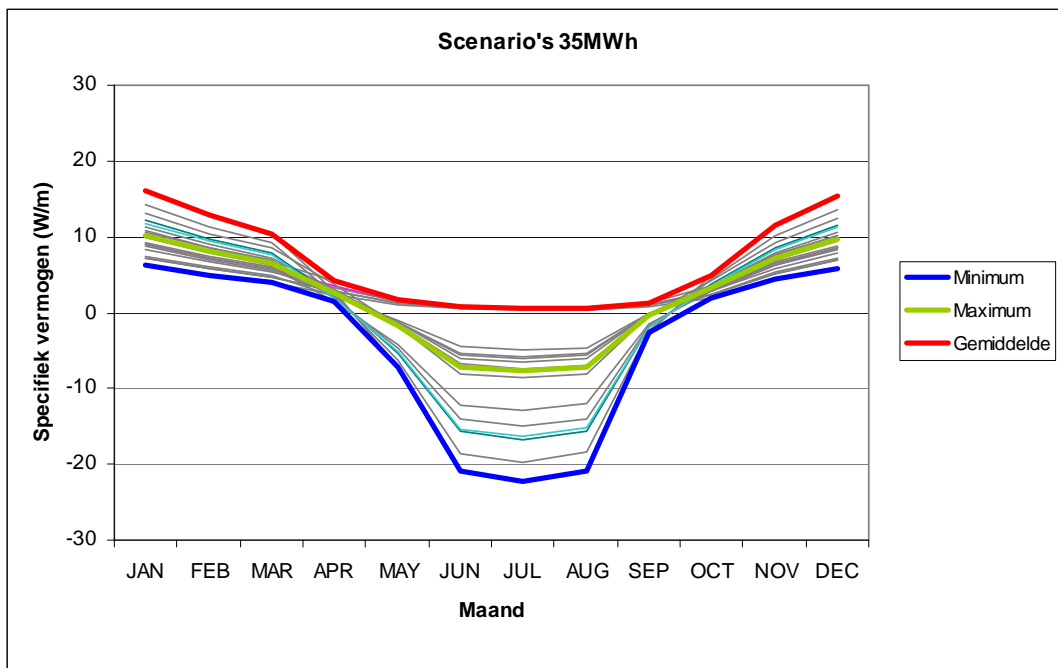
Het effect van tussenafstand is 5 à 6% terwijl voor de warmtecapaciteit het effect kleiner is dan 4%.

Omdat in de hierboven omschreven scenario's zowel de warmtegeleidingscoëfficiënt als het contrast tussen hoge en lage boorgatweerstand zijn beschouwd, terwijl de gevoeligheid voor variatie in de andere parameters relatief klein is, is de conclusie dat de referentiegegevens representatief zijn.

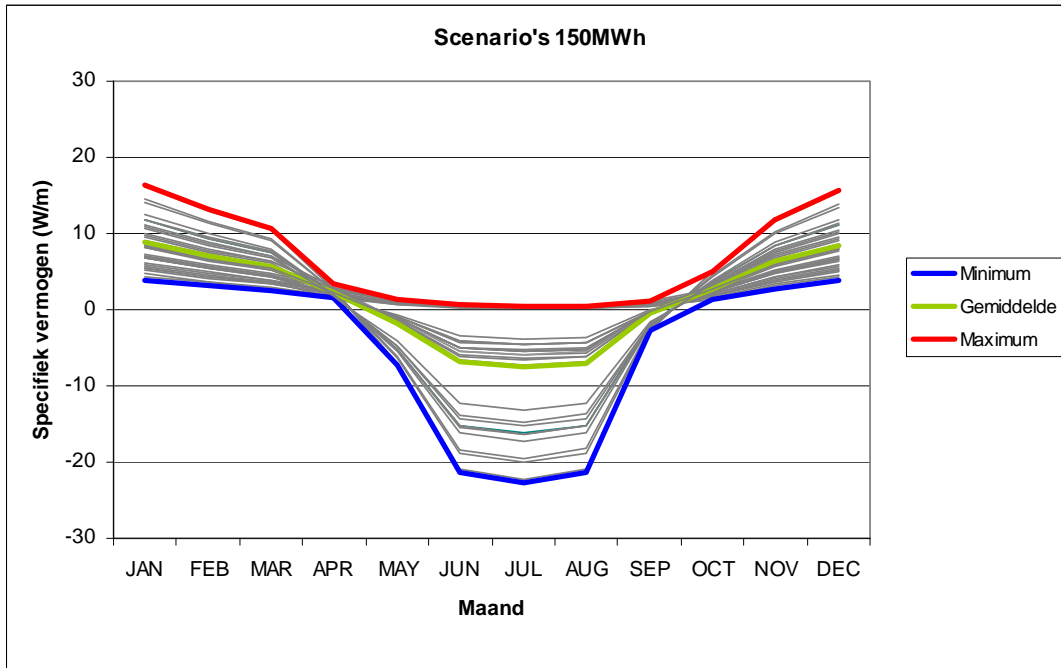
Figuur 4. Seizoensverdeling specifieke energiestroom (W/m) voor de scenario's met een totale warmtevraag van 5 MWh. Ook is weergegeven het minimum (blauw), gemiddelde (groen) en maximum (rood) van alle series.



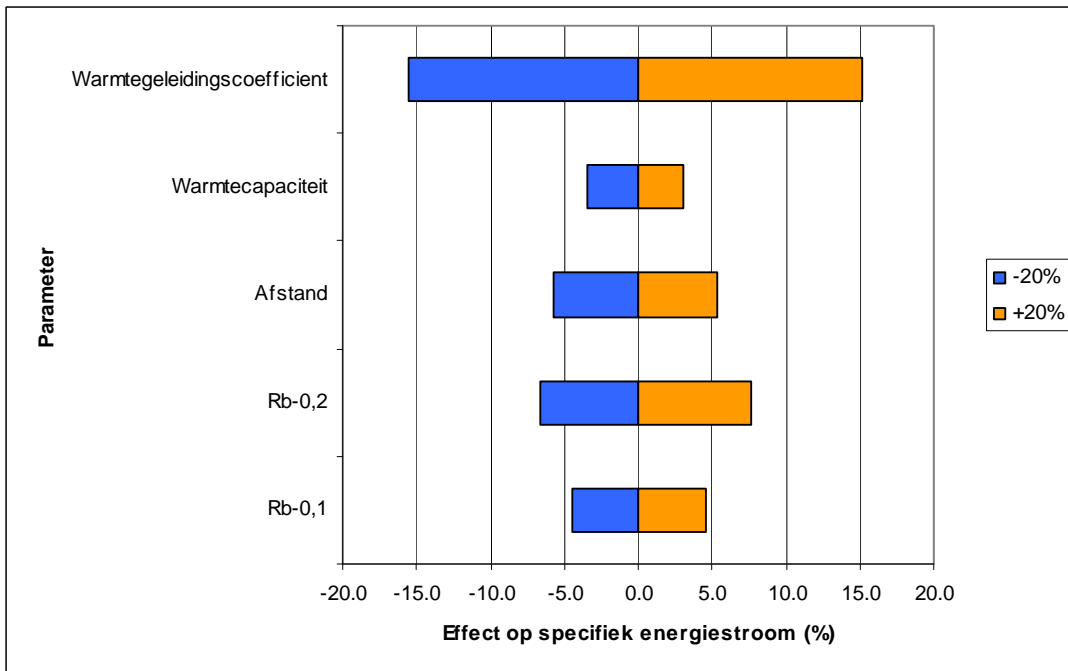
Figuur 5. Seizoensverdeling specifieke energiestroom (W/m) voor de scenario's met een totale warmtevraag van 35 MWh. Ook is weergegeven het minimum (blauw), gemiddelde (groen) en maximum (rood) van alle series.



Figuur 6. Seizoensverdeling specifieke energiestroom (W/m) voor de scenario's met een totale warmtevraag van 150 MWh. Ook is weergegeven het minimum (blauw), gemiddelde (groen) en maximum (rood) van alle series.



Figuur 7. Resultaat gevoeligheidsanalyse voor de warmtegeleidingscoëfficiënt bodem, warmtecapaciteit bodem, tussenafstand individuele bodemwarmtewisselaars en bij variatie boorgatweerstand voor hoge (Rb-0,2) en lage (Rb-01) algemene boorgatweerstand.



4 REKENMETHODE THERMISCHE INVLOEDSAFSTANDEN

Er bestaan verschillende analytische methoden om het probleem van warmtetransport rond een bodemwarmtewisselaar in de ruimte en tijd op te lossen (onder andere: Zeng et. al. 2002, Lamarche & Beauchamp 2007a, 2007b, Marcotte & Pasquier, 2008, Bandos et al 2009). De basis voor de meeste analytische methoden is het lijnbronmodel, wat in praktische vorm werd ontwikkeld door Ingersoll (1948, 1954) die zich baseerde op Kelvin's (1861) lijnbronmethode. Alternatieve methoden zijn ontwikkeld gebruik makend van een cilinder-bron oplossing, gebaseerd op Carslaw en Jaeger (1947, 1959) en Ingersoll (1948, 1954).

Voor deze studie zijn we vooral geïnteresseerd in de temperatuurontwikkeling op enige afstand van de bodemwarmtewisselaar. De verschillende parameters die te maken hebben met het boorgat spelen dan geen rol. Daarom gebruiken wij het standaard lijnbronmodel², met een aanpassing van Hart en Couvillion (1986). Deze aanpassing beperkt de berekende temperatuurverandering van het lijnbronmodel tot een zogenaamde verre-veldradius of verre-veldafstand (de afstand waarbuiten geen temperatuureffect optreedt) die afhangt van de tijd en van de temperatuurvereffeningscoëfficiënt. Op een bepaald tijdstip verandert alleen de temperatuur van punten die binnen die afstand vallen (bij het oorspronkelijke lijnbronmodel verandert de temperatuur van alle punten onafhankelijk van hoe ver die van de lijnbron af gelegen zijn).

De basisformule voor de lijnbronoplossing is (Carslaw & Jaeger 1947,1959; Ingersoll et al 1954):

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \int_y^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

waar:

$$y = \frac{r^2}{4\alpha t} \quad (2)$$

$$u = \frac{r^2}{4\alpha(t-t')} \quad (3)$$

ΔT : Temperatuurverandering (K), op afstand (r) en tijdstip (t). De temperatuurverandering is het verschil met de ongestoorde achtergrondtemperatuur ($\Delta T=(T-T_0)$).

q : Warmtestroom (W/m).

k : Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK).

α : temperatuurvereffeningscoëfficiënt (m^2/s).

r : afstand tot lijnbron (m).

t : tijd sinds aanvang energiepuls (s).

² Er zijn door diverse auteurs allerlei verbeteringen voorgesteld, deze hebben met name te maken met het nauwkeuriger berekenen van zeer korte tijdstappen, het nauwkeuriger berekenen van hele korte bodemwarmtewisselaars of andere speciale geometrieën of zijn bedoeld om sneller te kunnen rekenen aan meer complexe systemen. Deze verbeteringen zijn voor het onderhavige probleem niet relevant.

De vergelijking geldt wanneer de straal r kleiner is dan de verre-veldafstand :

$$r \leq r_{\infty}; r_{\infty} = 4\sqrt{\alpha t} \quad (4)$$

De oplossing van de integraal uit (1) wordt gegeven door de volgende expansie (Carslaw & Jaeger 1959, Yavuzturk 1999):

$$\int_y^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \left[y - \ln(y) - \gamma + \sum_1^n \frac{(-1)^{n+1} y^n}{n(n!)} \right] \quad (5)$$

Met:

- γ : Eulers constante (0,5772157)
 n : aantal termen in reeksontwikkeling

De basisberekingsmethode berust op drie belangrijke principes:

1. De evenwichtstoestand bij een constante thermische belasting volgens een lijnbron (bodemwarmtewisselaar) van een materiaal (bodem) wordt beschreven door het (on)eindige lijnbronmodel.
2. Voor een in de tijd wisselend energievraagpatroon kan de oplossing gevonden worden door het ontbinden van het energievraagpatroon in een reeks van constante thermische pulsen en voor elke puls de lijnbron-oplossing te berekenen, de eindoplossing wordt gevonden door superpositie (optellen individuele oplossingen).
3. Voor het bepalen van de interactie tussen verschillende lijnbronnen in de ruimte kunnen de effecten van de verschillende lijnbronnen in de ruimte gesuperponeerd worden.

Enkele van de belangrijkste vereenvoudigingen en aannames die voor deze studie gedaan zijn:

1. Er wordt, binnen het bodemwarmtewisselaarsysteem van het te beoordelen systeem, geen rekening gehouden met de onderlinge interactie (dat is een ontwerpprobleem van de leverancier).
 - o Er wordt met een gemiddeld totale energievraag per meter bodemkoppeling gerekend, In een groter bodemwarmtewisselaarsysteem zullen niet alle individuele bodemwarmtewisselaars hetzelfde vermogen leveren, maar die verschillen zullen geen belangrijk effect hebben op de interferentie met andere systemen.
2. Bodemopbouw: de bodemopbouw wordt homogeen verondersteld, er wordt geen rekening gehouden met geothermische gradiënt of seizoensmatige temperatuurwisselingen nabij het oppervlak (± 10 m -mv), uitgangspunt is uniforme temperatuurverdeling.
3. Er wordt geen rekening gehouden met al aanwezige bodemenergiesystemen (open of gesloten).
4. Er wordt geen rekening gehouden met fase-veranderingen (bevrozing) in de ondergrond.
5. Warmtetransport is alleen radiaal, axiaal transport is verwaarloosd (in overeenstemming met aanname 2).
6. Er wordt geen rekening gehouden met effecten van grondwaterstroming.

4.1 Validatie

De oneindige lijnbronmethode is reeds lang bekend en wordt tot op de dag van vandaag toegepast bij het berekenen van temperaturen in bodemwarmtewisselaarsystemen. De validatie richt zich dan ook niet op validatie van de fundamentele methode, maar alleen op het controleren van het algoritme dat door Groenholland geïmplementeerd is.

Voor de validatie worden de berekeningen met het door Groenholland geïmplementeerde algoritme vergeleken met de oplossing die gegeven wordt door het programma EED (Earth Energy Designer, Eskilson et al 2000) EED is een zeer veel gebruikt ontwerpprogramma wat is gebaseerd op het numerieke model "Superposition Borehole Model" (Eskilson 1986, 1987). EED is onder andere gevalideerd door Shonder et al (1999).

Het programma EED berekent de temperatuur van de vloeistof die door de bodemwarmtewisselaar stroomt, de lijnbronmethode berekent de temperatuur op verschillende afstanden in de bodem. Met het EED resultaat kan de temperatuur aan de boorgatwand worden afgeleid door de volgende relatie:

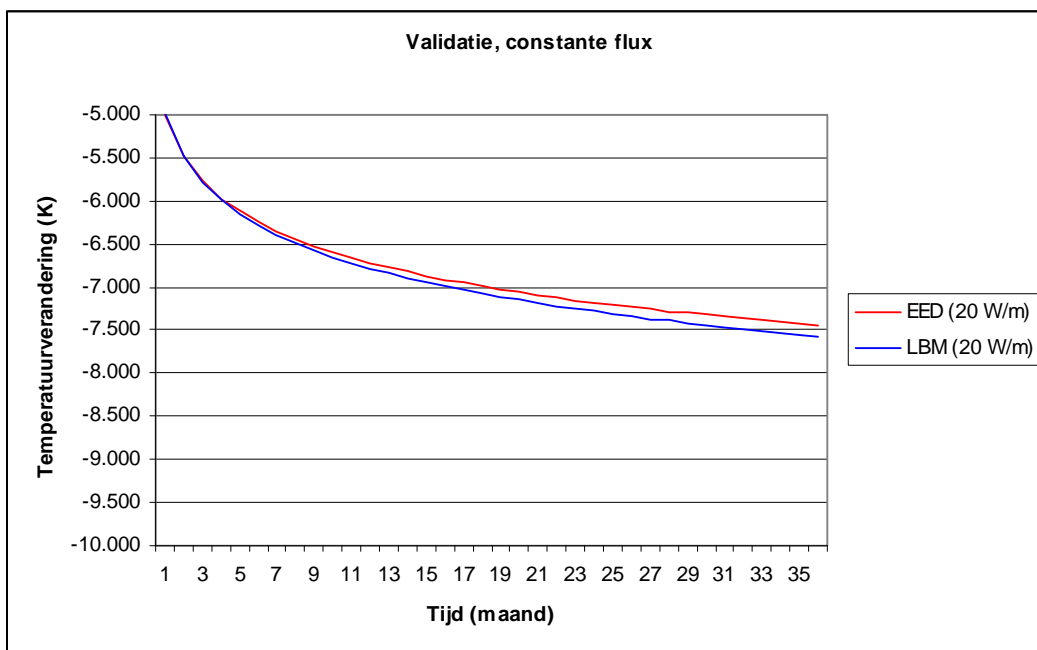
$$T_{bg} = T_{eed} - (q * R_b) \quad (6)$$

Waar:

- T_{bg} : Temperatuur boorgatwand (°C)
- T_{eed} : Temperatuur berekend door EED (vloeistoftemperatuur) (°C)
- R_b : Boorgatweerstand (K/(W/m)), uit resultaat EED.

De eerste validatie is uitgevoerd door voor verschillende constante warmte-fluxen te simuleren. Figuur 8 geeft als voorbeeld de temperatuurverandering weer voor een constante warmteontdekking van 20 W/m gedurende 36 maanden op een enkele bodemwarmtewisselaar. De afwijking aan het einde van de simulatieperiode bedraagt in dit geval 0,016K.

Figuur 8. Temperatuurverandering als gevolg van constante warmteonttrekking (20 W/m) berekend met EED en met lijnbronmethode (LBM).



Deze berekening is uitgevoerd voor diverse warmtefluxen, voor elke berekening is de totale fout berekend door:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(T_{eed} - T_{LBM})^2}{n}} \quad (7)$$

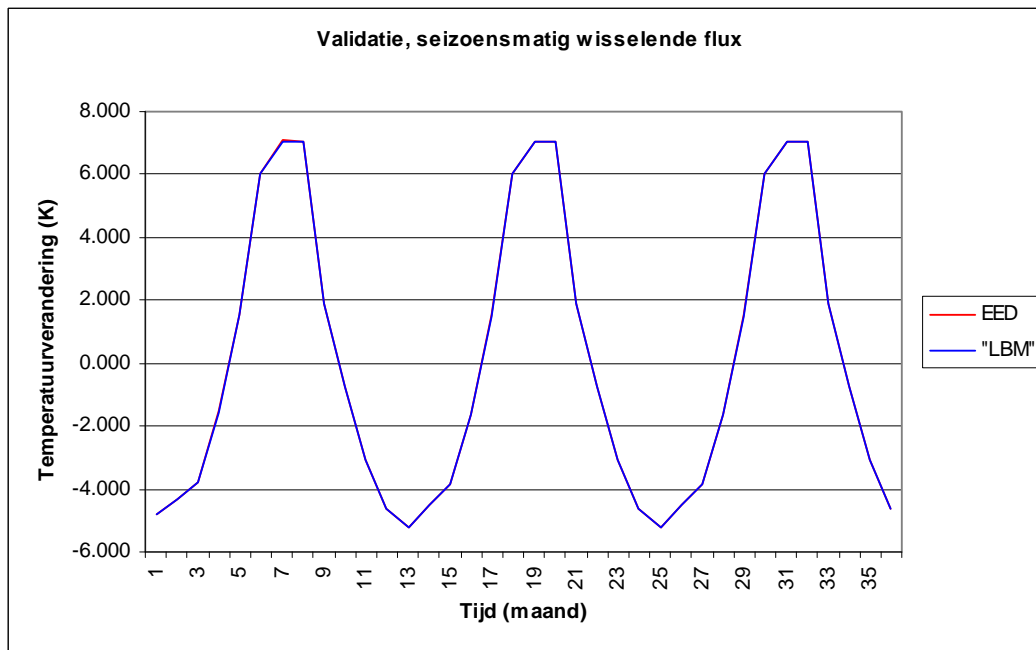
Deze totale fout bedraagt voor de warmteflux van 5 W/m 0,022; 10 W/m 0,044; 20 W/m 0,087; 40 W/m 0,17 en voor de warmteflux van 80 W/m 0,29.

Een tweede validatie is uitgevoerd voor een seizoensmatig variërend energievraagpatroon. Hierbij zijn de verwarmings- en koellasten verdeeld volgens de gemiddelde verdelingen uit figuur 1 en figuur 2. In totaal zijn 4 verschillende energiescenario's beschouwd (totale energievraag op een enkele bodemwarmtewisselaar):

1. Een lage warmtevraag (3 MWh/jaar), geen koelvraag
2. Een gemiddelde warmtevraag (7,5 MWh/jaar), geen koelvraag
3. Een hoge warmtevraag (15 MWh/jaar), geen koelvraag
4. Een gemiddelde warmtevraag (7,5 MWh/jaar) en een gebalanceerde koelvraag (7,5 MWh/jaar).

Voor het scenario met de gebalanceerde energievraag is de temperatuur-respons voor de eerste drie jaar uitgezet in figuur 9.

Figuur 9. Temperatuurverandering als gevolg van seizoensmatig variërende warmteonttrekking/warmtetoevoer berekend met EED en met lijnbronmethode (LBM).



Deze simulaties zijn uitgevoerd voor een periode van 25 jaar. In tabel 4 wordt de totale fout voor de verschillende scenario's gegeven voor jaar 1 t/m 3, jaar 10 en jaar 25 (berekenen van tussenliggende jaren in EED is erg tijdrovend).

Tabel 4. RMSE ("Root Mean Square Error") voor de scenario's met verschillende seizoensmatig wisselende energieprofielen.

	S1 (3 MWh)	S2 (7,5 MWh)	S3 (15 MWh)	S4 (7,5/7,5 MWh)
Jaar 1 t/m3	0,014	0,036	0,074	0,0156
Jaar 10	0,051	0,126	0,255	0,0156
Jaar 25	0,091	0,229	0,461	0,0156

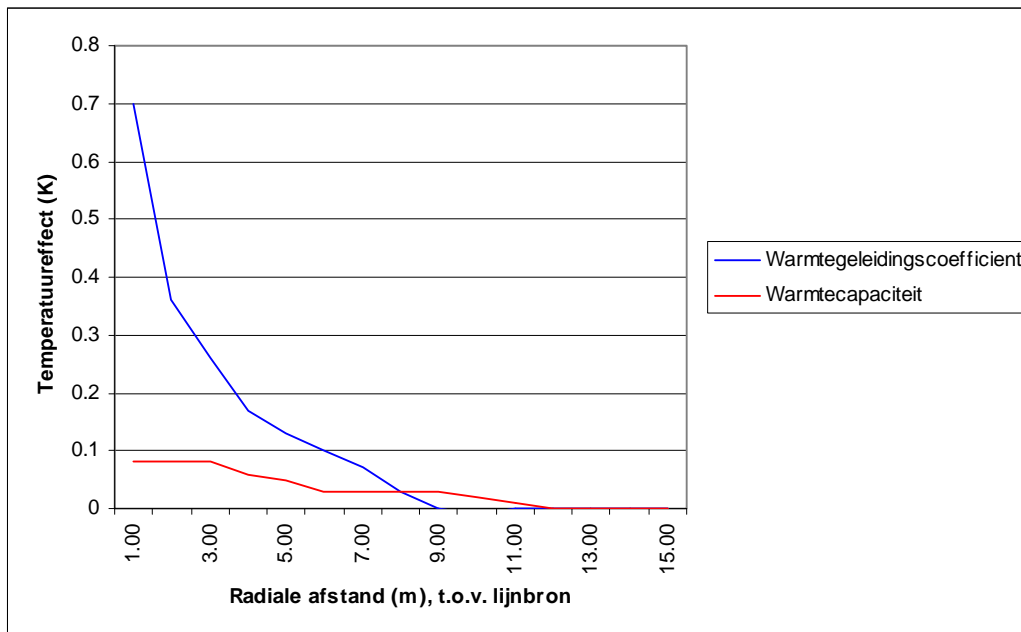
Samenvattend kunnen we stellen dat:

1. De verschillen tussen de lijnbronmethode (LBM) en EED klein zijn.
2. De verschillen groter worden bij grotere warmte-fluxen, maar bij de warmtestromen zoals die in de praktijk optreden voldoende klein blijven.
3. De LBM methode grotere temperatuurveranderingen voorspelt en daarmee conservatief (veilig) is ten opzichte van de EED methode.
4. Door de keuze van energiescenario's voor de validatie omvatten deze, in vergelijking met wat in werkelijkheid verwacht mag worden, zowel scenario's met een kleine warmtestroom als scenario's met een grote warmtestroom. De validatie is daarmee geldig voor alle te beschouwen energiescenario's.

4.2 Gevoeligheid en correctiefactoren

Bepalend voor het gedrag van het lijnbronmodel zijn, naast de energievraag, de warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van de bodem. In figuur 10 is uitgezet hoe de temperatuurgradiënt rond een lijnbron verandert als gevolg van het veranderen van deze twee parameters. De warmtegeleidingscoëfficiënt heeft duidelijk een effect, het effect van de warmtecapaciteit van de bodem is echter gering. Het is daarom niet nodig hier nog additionele correctiefactoren voor te berekenen.

Figuur 10. Gevoeligheid lijnbronmethode voor warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van de bodem.



4.3 Effect grondwaterstroming

De methode die in dit rapport toegepast wordt is gebaseerd op het lijnbronmodel waarbij warmtetransport plaatsvindt door geleiding. In Nederland staan de bodemwarmtewisselaars vrijwel altijd in de met water verzadigde zone en kan warmtetransport door grondwaterstroming een rol spelen. In deze paragraaf wordt bepaald tot welke grootte van grondwaterstroming de gepresenteerde methode toepasbaar is.

De effecten van grondwaterstroming op een bodemwarmtewisselaar worden bepaald door:

1. De hydraulische doorlatendheid van de bodem
2. De gradiënt van stijghoogte in het grondwater
3. Het verschil in temperatuur tussen het grondwater en de bodemwarmtewisselaar

De Darcy vergelijking wordt gebruikt als maat voor de grondwaterstromingssnelheid:

$$q = -K\nabla P$$

waar:

- q : Darcy stromingssnelheid (m³/jaar)
 K : Doorlaatendheid (m/jaar)
 ∇P : Drukgradiënt grondwater

Naast de Darcy grondwaterstroming kan ook een effectieve grondwaterstromingssnelheid worden bepaald, door de Darcy snelheid te delen door de porositeit. De effectieve grondwaterstromingssnelheid is een betere maat voor de werkelijke afstand die een deeltje grondwater aflegt. De Darcy snelheid is echter een goede maat voor de totale hoeveelheid grondwater die een bepaalde doorsnede doorstroomt. Omdat vooral bepaald wordt wanneer de lijnbronmethode geen goede beschrijving van het proces is, wordt de Darcy grondwaterstromingssnelheid gebruikt.

Over het algemeen zal de grondwaterstroming niet in alle bodemlagen waarin de bodemwarmtewisselaar geplaatst is gelijk zijn. Veelal zal er sprake zijn van één of meer lagen met minder of nagenoeg geen grondwaterstroming (deklaag, scheidende lagen, kleiige of lemige pakketten) en lagen waarin wel grondwaterstroming op kan treden (watervoerende lagen zoals zandige pakketten). Om daarmee rekening te houden worden de effecten onderzocht voor bodemwarmtewisselaars die met verschillende totale lengtes in een watervoerend pakket staan.

Het verschil in temperatuur tussen de bodemwarmtewisselaar en het grondwater heeft ook een effect. Om een conservatief effect te bepalen wordt de maximale warmtestroom (130 kWh/m/jaar) gebruikt (in een scenario zonder, met 50% en met 100% energiebalans).

De temperatuureffecten zijn onderzocht met het model HST3D (Kipp, 1986). Voor verschillende Darcy grondwaterstromingssnelheden en verschillende verhoudingen watervoerend/niet-watervoerende lengte bodemwarmtewisselaar zijn modelberekeningen uitgevoerd. Om te bepalen of het lijnbronmodel geldig is wordt uit het modelresultaat het maximale temperatuureffect (verschil tussen model zonder grondwaterstroming en model met grondwaterstroming) berekend. De resultaten zijn weergegeven in figuur 11 (scenario met maximale energieonttrekking 130 kWh/m/jaar), figuur 12 (50% energiebalans) en figuur 13 (volledige energiebalans).

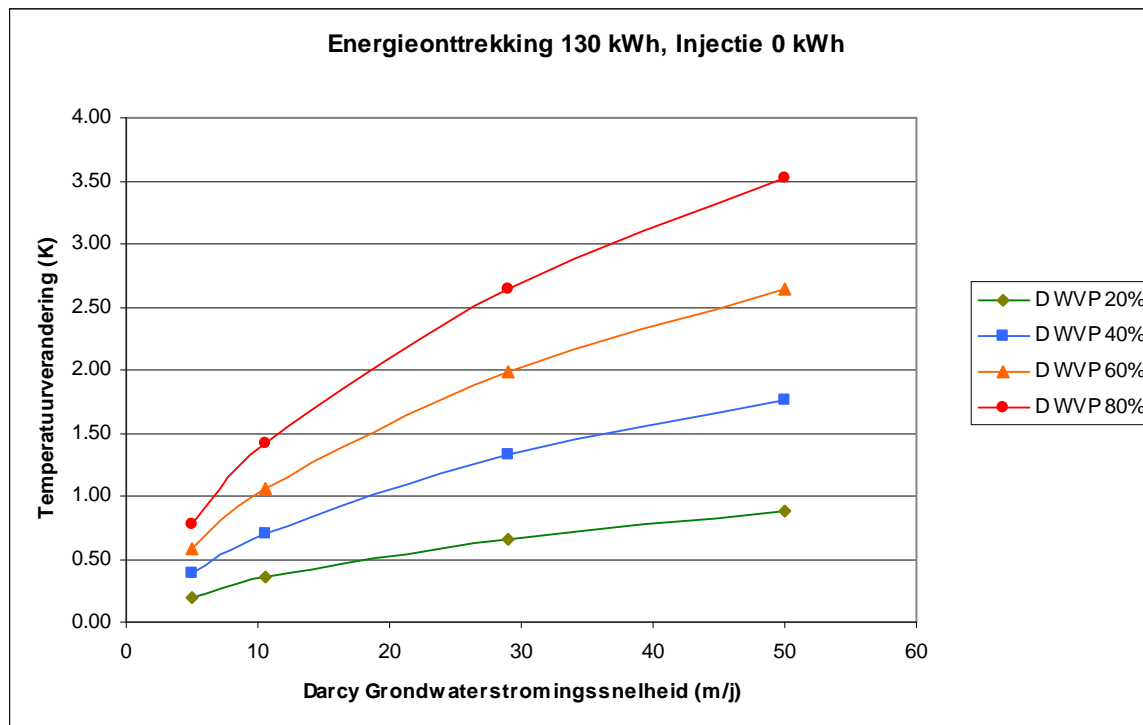
Als grens om te bepalen of de lijnbronmethode toegepast kan worden nemen we een temperatuureffect van 1K (ordegrootte effect op bodemwarmtewisselaar 10%). In tabel 5 wordt aangegeven tot welke Darcy grondwaterstromingssnelheid de lijnbronmethode toegepast kan

worden. In het algemeen kan gesteld worden dat de lijnbronmethode zoals in dit rapport toegepast representatief is voor 70-80% van alle in Nederland voorkomende situaties.

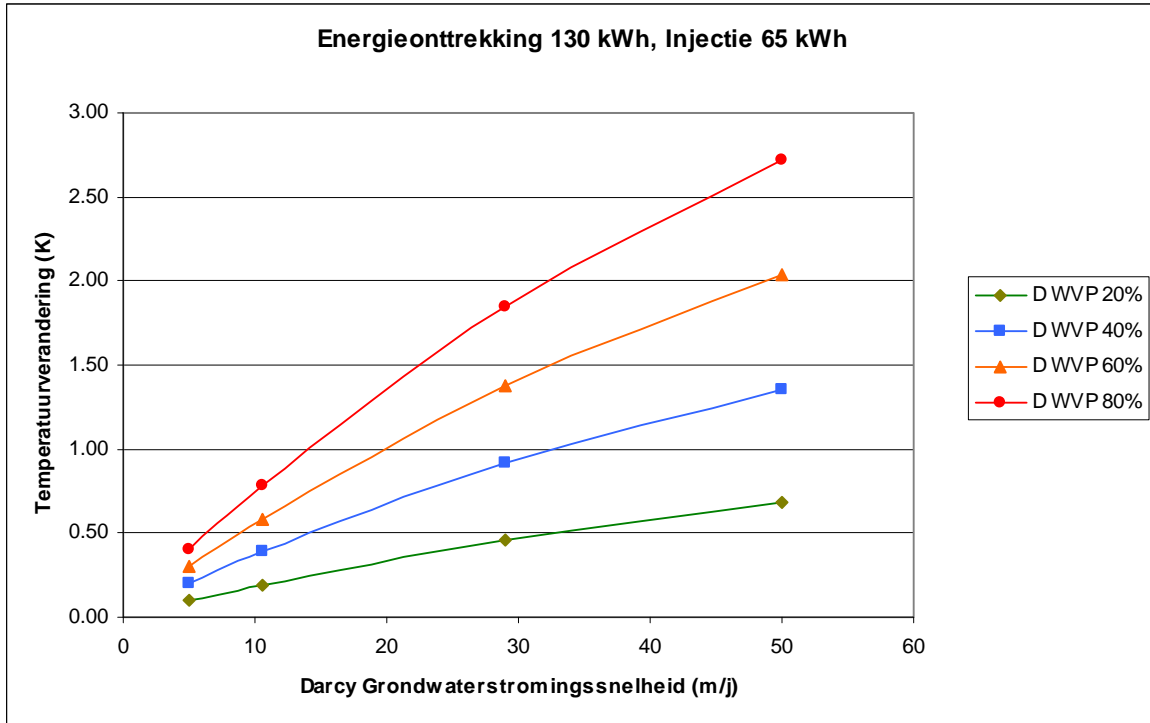
Tabel 5. Grens toepassen lijnbronmethode (Darcy grondwaterstromingssnelheid (meter per jaar)) voor verschillende verhoudingen energieonttrekking / energieinjectie en verhouding lengte watervoerend / niet-watervoerende lengte bodemwarmtewisselaar.

	Percentage lengte bodemwarmtewisselaar in watervoerende laag			
	20%	40%	60%	80%
Geen energiebalans	> 60	≤ 20	≤ 10	≤ 7
Energiebalans 50%	> 60	≤ 33	≤ 20	≤ 15
Energiebalans 100%	> 60	≤ 50	≤ 32	≤ 27

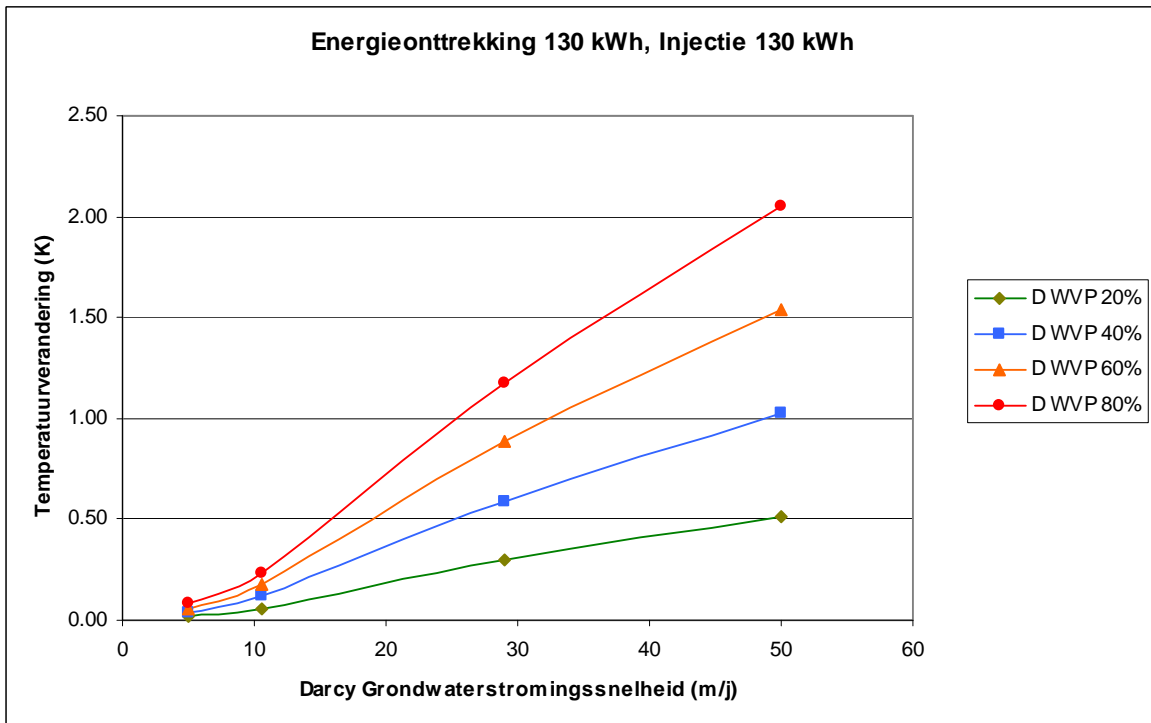
Figuur 11. Scenario 130 kWh/m/jaar energieonttrekking. Temperatureffect grondwaterstroming (K) voor verschillende Darcy grondwaterstromingssnelheden en verhouding watervoerend/niet-watervoerend deel bodemwarmtewisselaar (D WVP).



Figuur 12. Scenario 130 kWh/m/jaar energieonttrekking, 65 kWh/m/jaar energieinjectie. Temperatuureffect grondwaterstroming (K) voor verschillende Darcy grondwaterstromingssnelheden en verhouding watervoerend/niet-watervoerend deel bodemwarmtewisselaar (D WVP).



Figuur 13. Scenario 130 kWh/m/jaar energieonttrekking, 130 kWh/m/jaar energieinjectie. Temperatuureffect grondwaterstroming (K) voor verschillende Darcy grondwaterstromingssnelheden en verhouding watervoerend/niet-watervoerend deel bodemwarmtewisselaar (D WVP).



5 RESULTAAT

Met de gepresenteerde uitgangspunten en gegevens zijn een groot aantal lijnbronoplossingen berekend. De resultaten van de lijnbronmethode zijn, voor een bepaalde verwarmings- en koelvraag en voor een bepaalde warmtegeleidingscoëfficiënt, de temperatuurontwikkeling als functie van tijd en afstand. Uit deze resultaten zijn grafieken (nomogrammen) samengesteld waarmee de temperatuurverandering bepaald kan worden wanneer de warmtegeleidingscoëfficiënt en warmte- en koudevraag bekend zijn.

Elk nomogram geeft, voor een bepaalde warmtegeleidingscoëfficiënt en een bepaalde specifieke warmtetoevoer, de isothermen (lijnen van gelijke temperatuur) weer als functie van afstand (X-as) en specifieke onttrekking (Y-as). De isothermen zijn berekend door een lineaire interpolatie op de onderliggende berekeningen.

Om de methode hanteerbaar te maken zijn enkele vereenvoudigingen doorgevoerd. De uitkomsten uit de modelberekeningen zijn namelijk op zich niet linear, om de nomogrammen eenvoudig toepasbaar te maken is er toch voor gekozen ze door lineaire interpolatie samen te stellen. Hierbij wordt een fout gemaakt, maar deze is klein gehouden door:

1. De grafieken pas vanaf een minimale afstand van vijf meter te bepalen.
2. Alleen de temperatuurverlaging te beschouwen. In de praktijk zijn negatieve effecten bij kleine systemen beperkt tot mogelijke afkoeling. Voor die gevallen dat er sprake is van meer koelvraag dan verwarmingsvraag (waar er sprake zou zijn van temperatuurtoename) kan de koudevraag als warmtevraag worden ingevuld.

5.1 *Bepalen interferentie tussen systemen*

Om te bepalen of er tussen twee (of meer) systemen negatieve interferentie op kan treden moeten er twee vragen beantwoord worden:

- 2) Beïnvloedt het te plaatsen systeem andere aanwezige systemen?
- 3) Wordt het te plaatsen systeem door andere aanwezige systemen beïnvloedt?

In beide gevallen gaat het om het cumulatieve effect (het effect van alle in de omgeving aanwezige systemen bij elkaar opgeteld). Welke systemen beschouwd dienen te worden hangt af van de verre veldafstand (de afstand waarbuiten geen temperatureffect optreed) af. Allereerst wordt deze verre veldafstand bepaald, die alleen van de warmtegeleidingscoëfficiënt en tijd (25 jaar) afhangt.

Er is geen kans op negatieve interferentie indien er geen andere systemen binnen de afstand gegeven door de verre veldafstand aangetroffen worden.

Bevinden zich binnen de verre veldafstand andere systemen, dan moet worden nagegaan of tussen deze systemen een negatieve beïnvloeding mogelijk is. Om dat vast te stellen moeten alle onderlinge effecten bepaald worden. De cumulatieve onderlinge effecten van de bestaande systemen bepalen hoeveel temperatureffect het te plaatsen systeem nog kan hebben.

5.1.1 Voorbeeld bepalen interferentieafstand

We geven een voorbeeld met drie bestaande vrijstaande woningen op een rij. Hier wordt in een nog te bouwen vrijstaande woning een nieuw warmtepompsysteem aangelegd.

De noodzakelijke gegevens worden uit het registratiesysteem opgevraagd. Dit betreft de X- en Y-coördinaten, de totale lengte van het bodemwarmtewisselaarsysteem en de totale hoeveelheid aan de bodem onttrokken en toegevoerde warmte. De gegevens zijn in tabel 5 samengevat.

Tabel 5. Basisgegevens nodig voor bepalen mogelijke negatieve interferentie. Object (en type conform tabel 1a/1b); X- en Y-coördinaat (rijkstdriehoekstelsel); totale lengte bodemwarmtewisselaarsysteem (m); totale hoeveelheid aan de bodem onttrokken warmte en totale hoeveelheid aan de bodem toegevoerde warmte (MWh/jaar).

Systeem	X-coördinaat (m)	Y-coördinaat (m)	Lengte BWW (m)	Onttrokken warmte (MWh/jaar)	Toegevoerde warmte (MWh/jaar)
A3-1 vrijstaand	142 488	459 500	285	8,25	3,20
A3-2 vrijstaand	142 500	459 500	245	9,00	3,41
A3-3 vrijstaand	142 512	459 500	350	10,90	3,84
Nieuw object	142 495	459 492	350	10,7	3,30

Met deze gegevens worden de volgende parameters berekend:

1) Afstanden tussen de objecten en voor elk object de specifieke warmteonttrekking en warmtetoevoer in kWh/m/j. Tussen de objecten moet de afstand tussen de bodemwarmtewisselaars-systemen bepaald worden.

Afstanden volgen eenvoudig uit de volgende formule:

$$\text{Afstand (D, m)} = \sqrt{(X1 - X2)^2 + (Y1 - Y2)^2}$$

Waar X1 en Y1 de coördinaten van object 1 en X2 en Y2 de coördinaten van object 2 zijn.

2) De specifieke warmteonttrekking wordt berekend door de totale hoeveelheid warmte te delen door de totale lengte van het BWW systeem.

Tabel 6 geeft de resultaten van deze berekeningen weer.

Tabel 6. Afstanden tussen de objecten (m) en specifieke warmteonttrekking / warmtetoevoer.

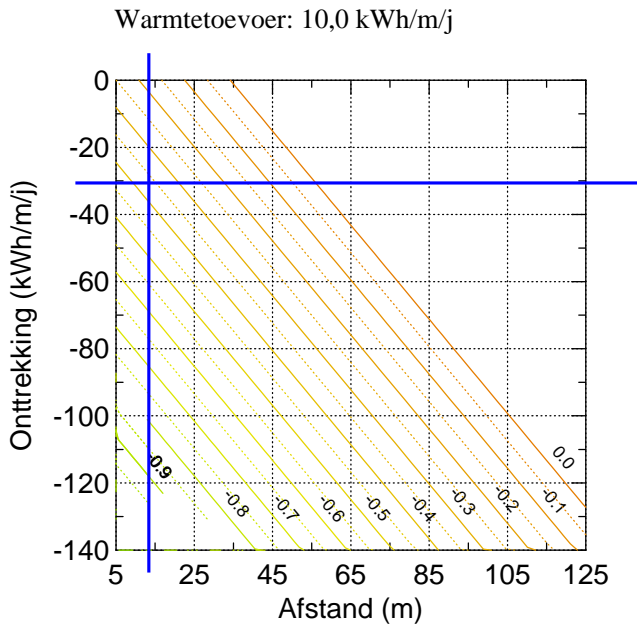
	A3-1	A3-2	A3-3	Nieuw
A3-1	-	12	24	11
A3-2	12	-	12	9
A3-3	24	12	-	19
Nieuw	11	9	19	-
Specifieke onttrokken warmte (kWh/m/j)	29	37	31	30
Specifieke toegevoerde warmte (kWh/m/j)	10	14	11	9

We nemen een warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem aan van 2,0 W/mK en zoeken in de bijbehorende nomogrammen de temperatureffecten voor de objecten op. Vervolgens bepalen we de cumulatieve effecten en stellen vast of het nieuwe object mogelijk is. De verre veldafstand bedraagt 105 meter.

We bepalen de temperatuureffecten tussen de bestaande objecten onderling en tussen de bestaande objecten en de nieuwbouw.

Het effect van object A3-1 op A3-2: Object A3-1 heeft een specifieke warmteonttrekking van 28,9 kWh/m/j (tabel 5: $8,25 * 1000 / 285$) en een specifieke warmtetoevoer van 11,2 kWh/m/j (tabel 5: $3,2 * 1000 / 285$). In de grafieken van nomogrammen B (warmtegeleidingscoëfficiënt bodem 2,0 W/mK) kijken we bij een specifieke warmteonttrekking van 28,9 kWh/m/j en bij een afstand van 12 meter, het temperatuureffect is daar -0,36K. Figuur 11 toont het relevante nomogram en hulplijnen.

Figuur 11. Voorbeeld bepalen temperatuureffect tussen twee systemen (nomogram B).



Het effect van object A3-1 op A3-3: de afstand tussen deze objecten bedraagt 24 meter, het temperatuureffect is -0,28K.

Het effect van object A3-2 op A3-1: Object A3-2 heeft een warmtetoevoer van 14 kWh/m/j, daarvoor is er geen aparte grafiek. In dit geval lezen we het temperatuureffect af uit de grafieken bij 10 kWh/m/jaer en 20 kWh/m/j warmtetoevoer en interpoleren om de uiteindelijke waarde te krijgen: $(-0,43 + -0,35)/2 = -0,39K$.

In tabel 7 zijn alle temperatuureffecten berekend en opgeteld. Wanneer we een maximaal effect van $\pm 1,5K$ accepteren blijkt het nieuwe systeem mogelijk te zijn, alle bij elkaar opgetelde effecten zijn kleiner dan 1,5K.

Tabel 7. Bepaalde temperatuureffecten.

		Effect Op Object			
		A3-1	A3-2	A3-3	Nieuw
Effect Van Object	A3-1	-	-0,36	-0,28	-0,36
	A3-2	-0,39	-	-0,39	-0,40
	A3-3	-0,28	-0,36	-	-0,30
CUMULATIEF EFFECT		-0,67	-0,72	-0,67	-1,06
Nieuw		-0,36	-0,38	-0,30	-
CUMULATIEF EFFECT NIEUW SYSTEEM		-1,03	-1,10	-0,97	

6 HANDLEIDING VOOR GEBRUIK

Een belangrijk uitgangspunt bij het op een bepaalde locatie toestaan van een bodemenergiesysteem is dat deze geen zodanige interferentie met eerder geïnstalleerde systemen heeft dat het doelmatig functioneren van betreffende systemen kan worden geschaad. Dit betekent dat ook de werking van het nieuwe systeem niet geschaad mag worden. De regelgeving voorziet op verschillende manieren in het voorkomen van negatieve interferentie:

1. Voor open systemen wordt de interferentie meegenomen bij de verlening van de watervergunning.
2. Voor gesloten systemen met een bodemzijdig vermogen tot ten hoogste 70 kW buiten interferentiegebieden geldt een meldingsplicht. Bij het toezicht op gemelde systemen wordt de algemene regel met betrekking tot interferentie gehandhaafd.
3. Voor gesloten voor systemen met een bodemzijdig vermogen hoger dan 70 kW en voor systemen met een bodemzijdig vermogen tot ten hoogste 70 kW binnen interferentiegebieden wordt interferentie meegenomen bij de verlening van de omgevingsvergunning.

In opdracht van het ministerie van I&M is een methode ontwikkeld waarmee op basis van een beperkte hoeveelheid gegevens bepaald kan worden of er sprake kan zijn van negatieve interferentie. Deze methode is bruikbaar voor kleine gesloten systemen (< 70 kW vermogen bodemzijdig) indien deze niet als één geheel ontworpen zijn³. Indien de aanvrager van een systeem op andere wijze, door ontwerp, aan kan tonen dat er geen negatieve interferentie tussen de bodemwarmtewisselaarsystemen optreedt dan kan het bevoegd gezag op basis daarvan ontheffing verlenen, ook als uit berekeningen met de hier gepresenteerde methode zou blijken dat er wel sprake is van negatieve interferentie.

De achtergronden en validatie van de hier gepresenteerde methode zijn beschreven in rapport GHNLO11103, "Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen" (Groenholland, 2011).

De afstand tussen twee gesloten bodemenergiesystemen wordt gedefinieerd als de afstand tussen de centrale coördinaten van de systemen.

Voor de berekening zijn nodig:

- Warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem, ingedeeld in slecht geleidend (1,5 W/mK); normaal geleidend (2,0 W/mK) en goed geleidend (2,5 W/mK).
- Informatie over de locatie, warmtevraag en koudevraag en omvang (totale lengte) van het bodemwarmtewisselaarsysteem van het object waarvoor de ontheffing aangevraagd wordt.
- Informatie over de in de omgeving aanwezige systemen: locatie, warmtevraag en koudevraag en omvang van het bodemwarmtewisselaarsysteem.

Met deze gegevens worden alle onderlinge temperatuureffecten bepaald en wordt vastgesteld of het nieuwe systeem een overschrijding van het toegestane temperatuureffect zou kunnen veroorzaken.

³ Bijvoorbeeld, een systeem bestaande uit verschillende woningen met elk een individuele warmtepomp kan als heel blok ontworpen zijn. Alhoewel de bodemwarmtewisselaar individueel is aangesloten is bij het thermische ontwerp dan al rekening gehouden (en gecompenseerd voor) de onderlinge beïnvloeding. De aanvrager/melder zal dit ontwerp dan kunnen overleggen. Indien de individuele warmtepompsystemen ontworpen zijn alsof er geen naburige systemen zijn, dan wordt de in dit rapport beschreven methode toegepast om vast te stellen of er sprake is van negatieve effecten.

Het toegestane cumulatieve absolute temperatuureffect bedraagt 1,5K.

De keuze voor deze waarde is binnen de Begeleidingscommissie gemaakt op basis van twee overwegingen:

1. Effect op rendement, bij dit maximale temperatuureffect zal de prestatie van een systeem met ten hoogste 5% afnemen. Dit wordt acceptabel geacht.
2. Bij een groter toegestaan effect zou ook het technisch functioneren van naburige systemen in het geding kunnen komen (door bijvoorbeeld bevrozing). In het algemeen worden systemen ontworpen met een veiligheidsmarge van $\pm 3K$, indien een effect groter dan 1,5K wordt toegestaan zou de resterende veiligheidsmarge zeer klein worden.

6.1 Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem

De warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem bepaalt welke set temperatuur-nomogrammen moet worden gebruikt. Ook wordt hiermee bepaald wat de verre veld afstand is, alleen objecten die binnen deze afstand vallen moeten worden geëvalueerd.

De warmtegeleidingscoëfficiënt kan op basis van een bodemopbouwbeschrijving worden bepaald (zie 2DEN 0324 "Kwaliteitsrichtlijn verticale bodemwarmtewisselaars" of de ISSO73).

De indeling die hier gehanteerd wordt is:

A. Slecht geleidende bodem **1,5 W/mK** (bijvoorbeeld: relatief dikke deklaag, veel kleig en/of venige lagen, zeer fijn zandig/lemige afzettingen, lage grondwaterstand).

B. Normaal geleidende bodem **2,0 W/mK** (bijvoorbeeld: relatief dunne deklaag, overwegend matig fijne tot matig grove zanden, hoge grondwaterstand).

C. Hoog geleidende bodem **2,5 W/mK** (bijvoorbeeld: voornamelijk bestaande uit matig grove tot zeer grove zanden of grind, hoge grondwaterstand, matige grondwaterstroming).

Stap 1. Geef aan welk bodemtype op de locatie wordt aangetroffen.

Bodemtype	Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)	Verre veldafstand (m)
<input type="checkbox"/> Slecht geleidend (A)	1,5	92
<input type="checkbox"/> Normaal geleidend (B)	2,0	105
<input type="checkbox"/> Zeer goed geleidend (C)	2,5	120

6.2 Warmtevraag, koudevraag, omvang bodemwarmtewisselaar

De warmte en koudevraag van het nieuwe object zijn bij het ontwerp bepaald. Het gaat hierbij om de totale warmte- en koudevraag in MWh/jaar.

Stap 2. Geef /bepaal de relevante gegevens over de energievraag en bodemwarmtewisselaar.

Parameter	Waarde
Condensorvermogen warmtepomp (kW) <i>Bij B0/W35</i>	
Elektrisch opgenomen vermogen compressor (kW) <i>Bij B0/W35</i>	
Verdampervermogen warmtepomp (kW) <i>= Condensorvermogen - elektrisch. vermogen compressor</i>	
SPF-V (Seizoens Prestatie Factor) verwarming <i>= Condensorvermogen / elektrisch opgenomen vermogen, bij B0/W35</i>	
SPF-K (Seizoens Prestatie Factor) koeling <i>= Verdampervermogen / elektrisch opgenomen vermogen, bij B30/W10</i> <i>Passieve koeling: 15</i>	
Jaarlijkse warmtevraag (MWh/jaar) <i>Dit is wat de warmtepomp levert aan het object</i>	
Jaarlijkse netto warmteonttrekking (MWh/jaar) <i>= (Jaarlijkse warmtevraag) - (Jaarlijkse warmtevraag / SPF-V)</i>	
Jaarlijkse koudevraag (MWh/jaar) <i>Dit is wat het bww systeem of de warmtepomp levert aan het object</i>	
Jaarlijkse netto warmtetoevoer (MWh/jaar) <i>= (Jaarlijkse koudevraag) + (Jaarlijkse koudevraag / SPF-K)</i>	
Totale lengte bodemwarmtewisselaarsysteem (m) <i>Aantal BWW x geplaatste diepte (dubbele wisselaars tellen slechts 1x!)</i>	
Specifieke warmteonttrekking (kWh/m/j) <i>= (Jaarlijkse netto warmteonttrekking * 1000) / (Lengte BWW)</i>	
Specifieke warmtetoevoer (kWh/m/j) <i>= (Jaarlijkse netto warmtetoevoer * 1000) / (Lengte BWW)</i>	

Alleen voor al bestaande systemen die voor de eerste keer gemeld gaan worden kunnen deze waarden, indien niet bekend, als volgt worden bepaald:

Verwarmingsvraag geschakelde nieuwbouw: Condensorvermogen (kW) x 1800 (draaiuren)

Verwarmingsvraag geschakelde bestaande bouw: Condensorvermogen (kW) x 1750 (draaiuren)

Verwarmingsvraag appartementencomplex: Condensorvermogen (kW) x 2200 (draaiuren)

Verwarmingsvraag kantoor: Condensorvermogen (kW) x 1800 (draaiuren)

Verwarmingsvraag school: Condensorvermogen (kW) x 1800 (draaiuren)

Koelvraag systemen met passieve koeling: 30% van de verwarmingsvraag

Koelvraag systemen met actieve koeling: Verdampervermogen (kW) x 750 (draaiuren)

6.2.1 Controle mogelijkheden

De bij een melding aangeleverde gegevens kunnen door het bevoegde gezag in eerste instantie worden beoordeeld aan de hand van enkele kengetallen:

1. Jaarlijkse warmtevraag (kW) / condensorvermogen (kW) geeft het aantal vollasturen verwarming, moet tussen 1500 en 2200 liggen
2. Rendement (SPF) dient globaal tussen 3,8 en 4,5 te liggen.
3. Jaarlijkse koudevraag (kW) / verdampervermogen (kW) (bij mechanische verwarming) geeft aantal vollasturen koeling, moet tussen 500 en 1200 liggen.
4. Jaarlijkse koudevraag bij passieve koeling \pm 30% van de warmtevraag.
5. Verdampervermogen warmtepomp (W) / totale lengte BWW systeem (m) geeft specifieke onttrekking bij pieklast, moet tussen 15 W/m en 35 W/m liggen.
6. Opgegeven vermogens en totale energievraag kunnen per type vergeleken worden met tabel 1.

6.3 Bepalen interferentie

Doel is de cumulatieve temperatuureffecten tussen de systemen te bepalen. Dit gebeurt in enkele stappen.

1. Bepaal de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem (6.1)
2. Bepaal de specifieke warmteonttrekking en warmtetoevoer (kWh/meter/jaar) (6.2)

Stap 3. Neem over uit stap 1 en stap 2:

Parameter	Waarde
Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)	
Verre veldafstand (m)	
Specifieke warmteonttrekking (kWh/m/j)	
Specifieke warmtetoevoer (kWh/m/j)	

Stap 4. Zoek alle objecten binnen de verre veldafstand in het registratiesysteem op.

System	X-coördinaat (m)	Y-coördinaat (m)	Lengte BWW (m)	Onttrokken warmte (MWh/jaar)	Toegevoerde warmte (MWh/jaar)
O1	XO1	YO1	L1	VV1	KV1
O2	XO2	YO2	L2	VV2	KV2

Stap 5. Bepaal de onderlinge temperatuureffecten en cumulatieve effecten van alle objecten

1. Bereken de afstanden tussen alle bestaande objecten en van alle objecten met het nieuwe object. De afstand wordt berekend door:

$$\text{Afstand (D, m)} = \sqrt{(XO1 - XO2)^2 + (YO1 - YO2)^2}$$

2. Zoek voor alle combinaties van objecten in de grafiek met de juiste warmtegeleidingscoëfficiënt en specifieke toegevoerde warmte het temperatuureffect op bij de warmteonttrekking en afstand tussen de systemen.
3. Sommeer alle temperatuureffecten, bepaal of het nieuwe object een overschrijding veroorzaakt bij een van de bestaande objecten en of de bestaande objecten een overschrijding veroorzaken bij het nieuwe object.

Punt 2 en 3 worden uitgevoerd met een kruistabel van alle objecten, bijvoorbeeld (-> betekent effect van object op object, bv: O1->O2 is het effect wat object 1 heeft op object2). De bestaande objecten horen uiteraard de toegestane temperatuurgrens niet te overschrijden (cumulatief effect 1).

In de kolom "nieuw" worden alle effecten van de bestaande objecten op het nieuwe object opgeteld, de som moet kleiner zijn dan de toegestane temperatuurgrens.

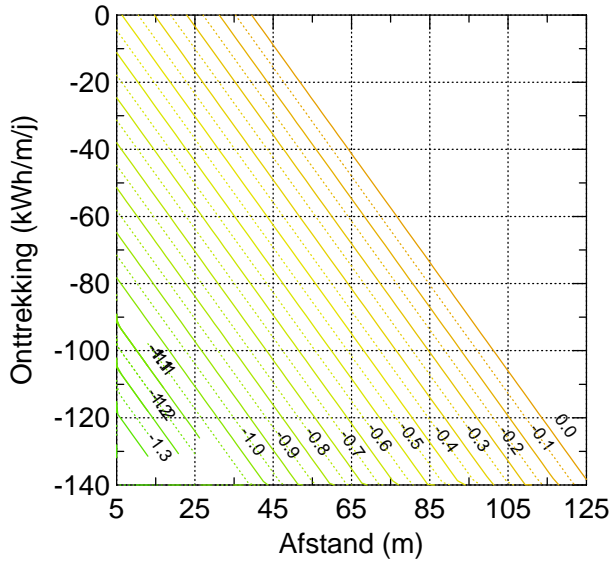
In de rij "cumulatief effect 2" word het effect van het nieuwe object en de bestaande objecten bij elkaar opgeteld. Geen van deze effecten mag groter zijn dan het toegestane temperatuureffect.

	O1	O2	O3	Nieuw
O1	-	O1->O2	O1->O3	O1->Nieuw
O2	O2->O1	-	O2->O3	O2->Nieuw
O3	O3->O1	O3->O2	-	O3->Nieuw
CUMULATIEF EFFECT 1	som	som	som	SOM1
Nieuw	Nieuw -> O1	Nieuw -> O2	Nieuw -> O3	-
CUMULATIEF EFFECT 2	SOM2	SOM3	SOM4	

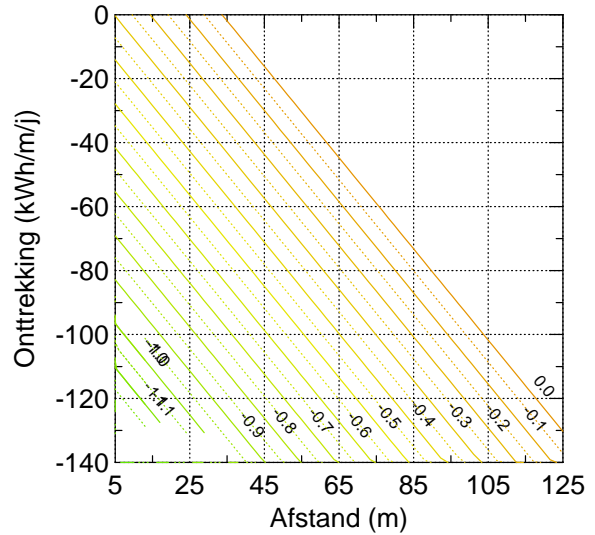
A: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 1,5 W/MK
 verre veldafstand: 92 meter

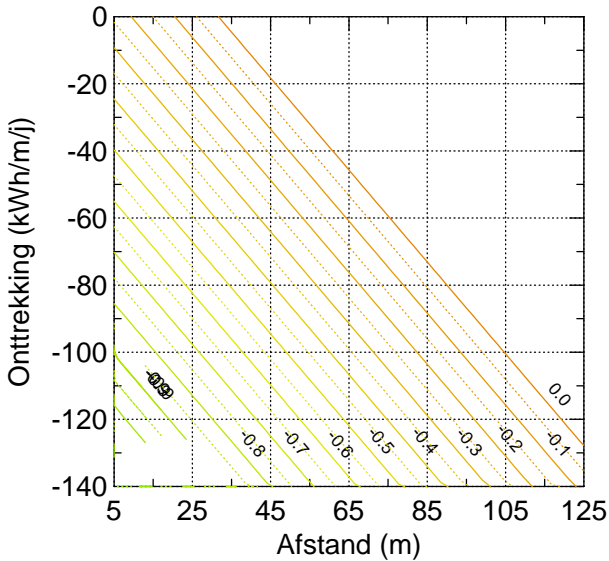
Warmtetoevoer: 0,0 kWh/m/j



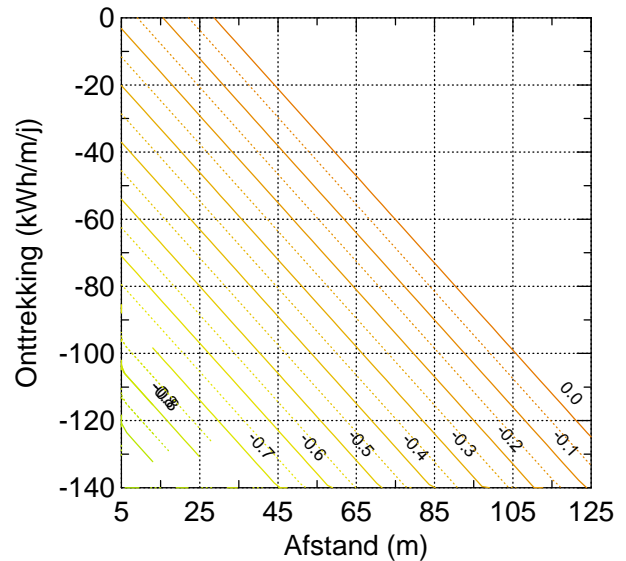
Warmtetoevoer: 10,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 200 kWh/m/j



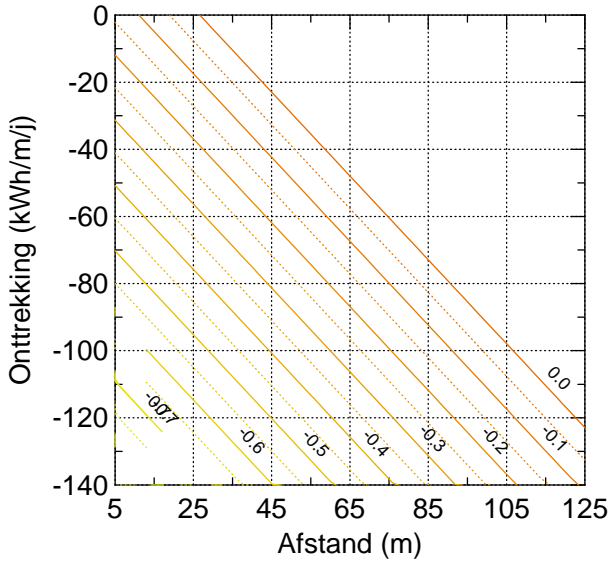
Warmtetoevoer: 30,0 kWh/m/j



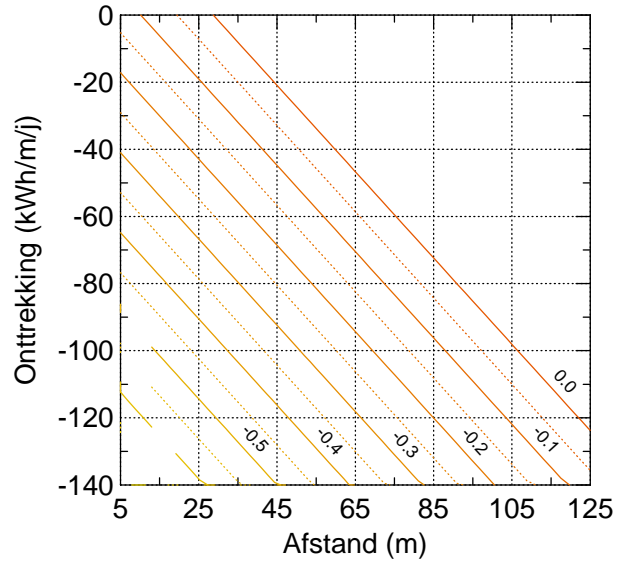
A: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 1,5 W/MK
 verre veldafstand: 92 meter

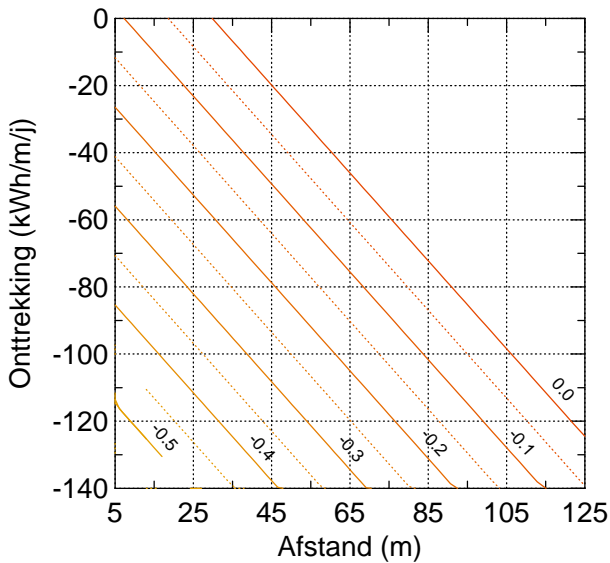
Warmtetoevoer: 40,0 kWh/m/j



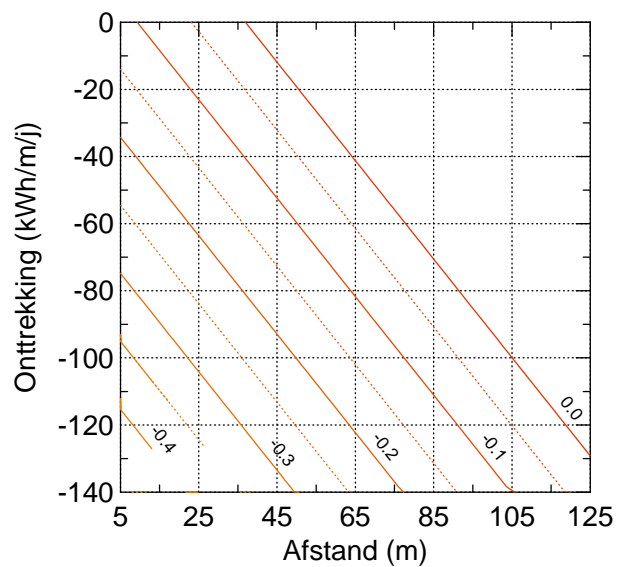
Warmtetoevoer: 50,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 60,0 kWh/m/j



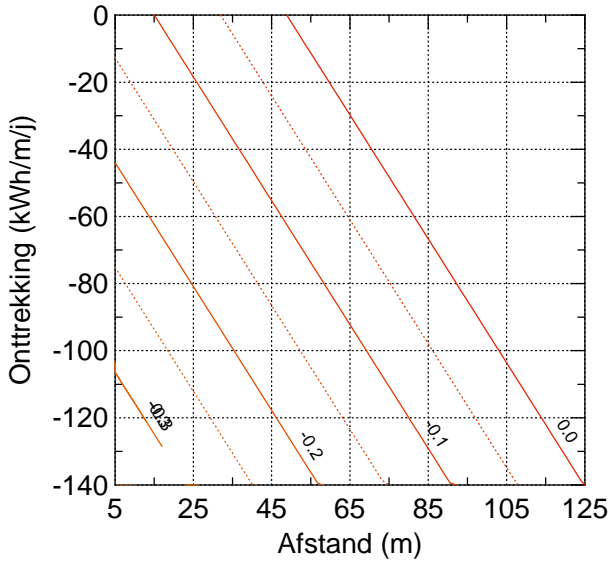
Warmtetoevoer 70,0 kWh/m/j



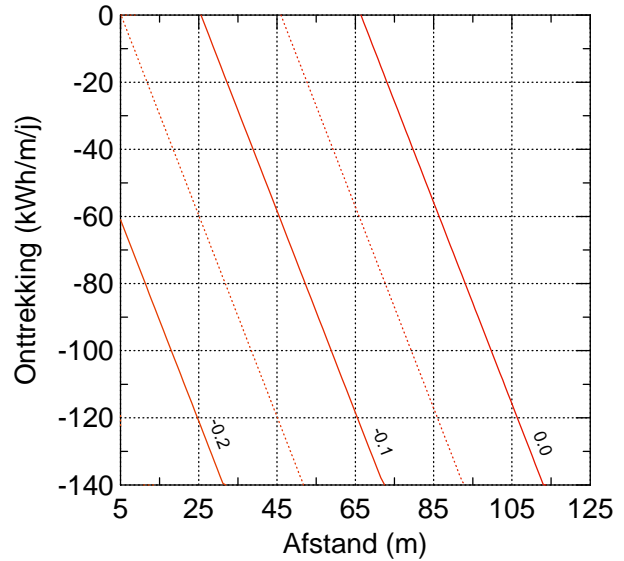
A: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 1,5 W/MK
 verre veldafstand: 92 meter

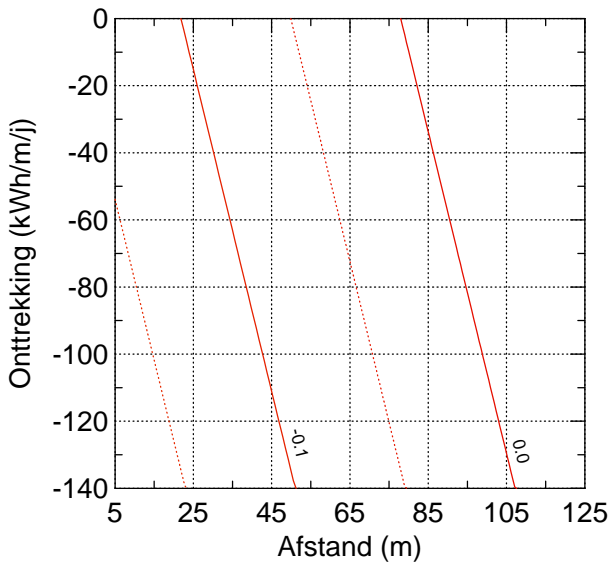
Warmtetoevoer: 80,0 kWh/m/j



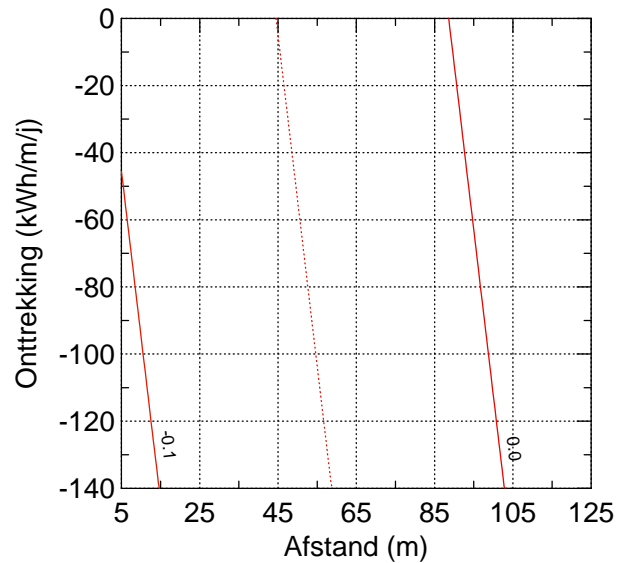
Warmtetoevoer: 90,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 100,0 kWh/m/j



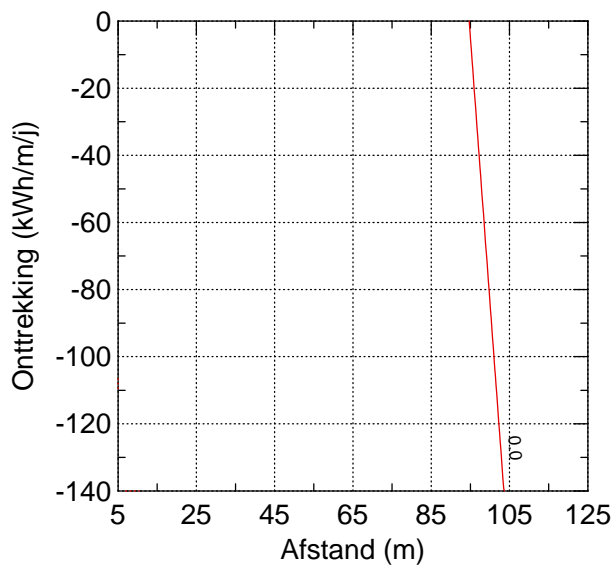
Warmtetoevoer 110,0 kWh/m/j



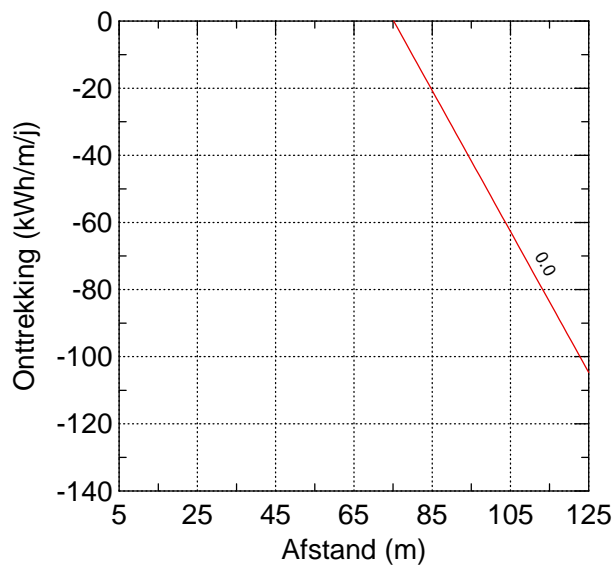
A: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 1,5 W/MK
 verre veldafstand: 92 meter

Warmtetoevoer: 120,0 kWh/m/j



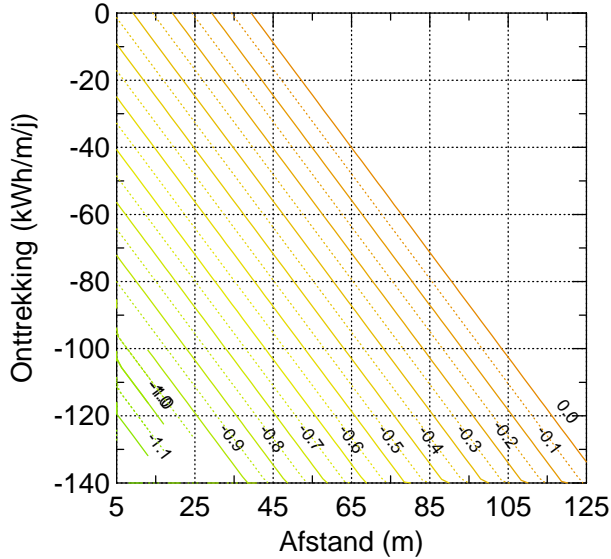
Warmtetoevoer: 130,0 kWh/m/j



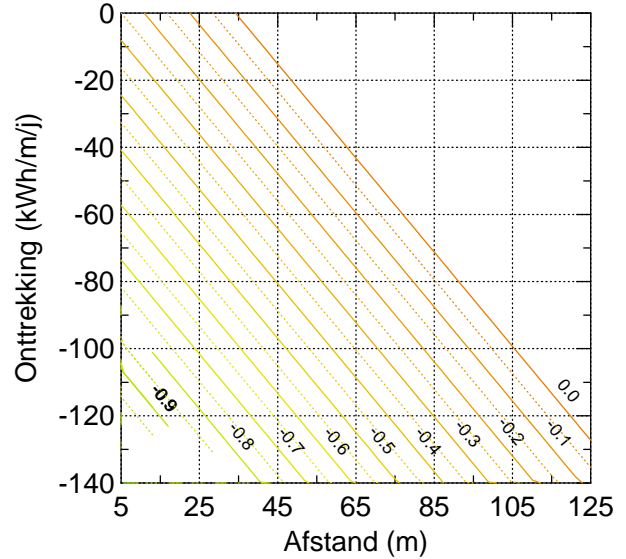
B: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,0 W/MK
 verre veldafstand: 105 meter

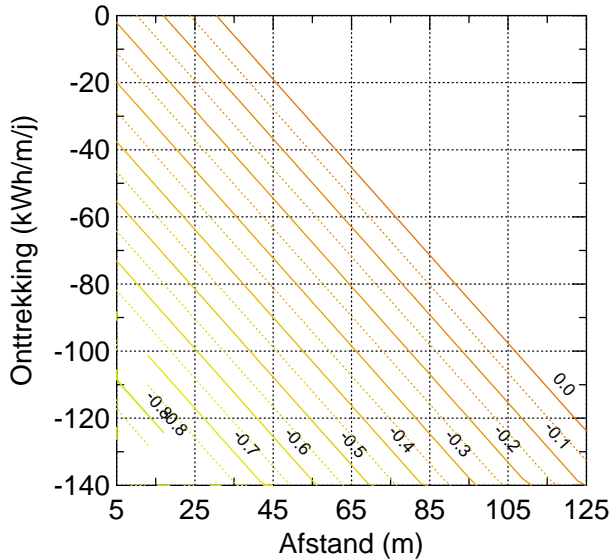
Warmtetoevoer: 0,0 kWh/m/j



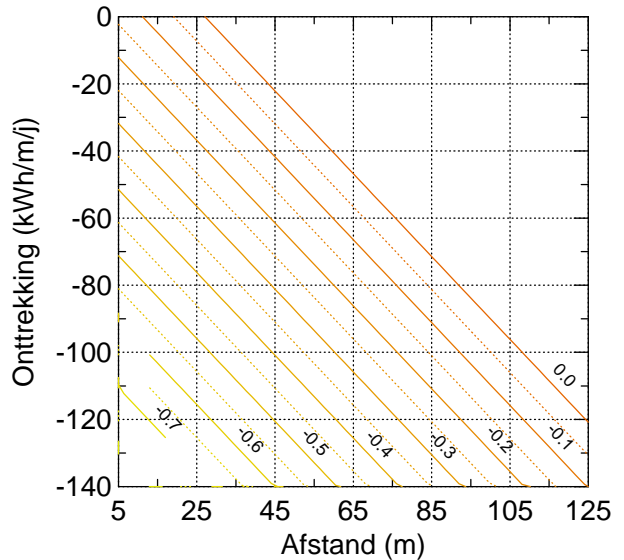
Warmtetoevoer: 10,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 20,0 kWh/m/j



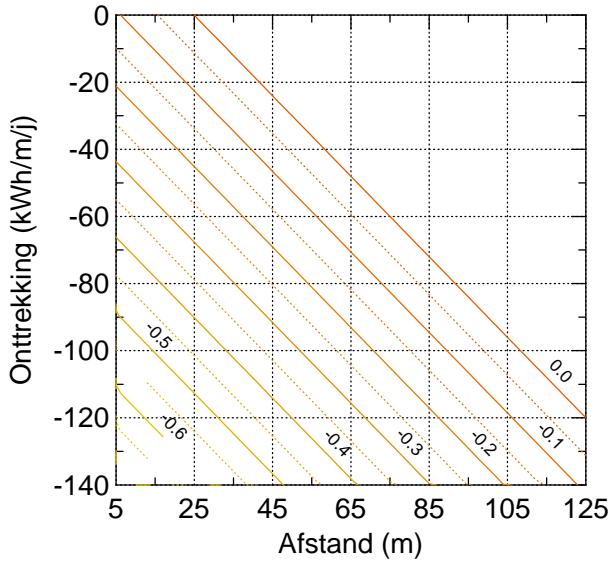
Warmtetoevoer: 30,0 kWh/m/j



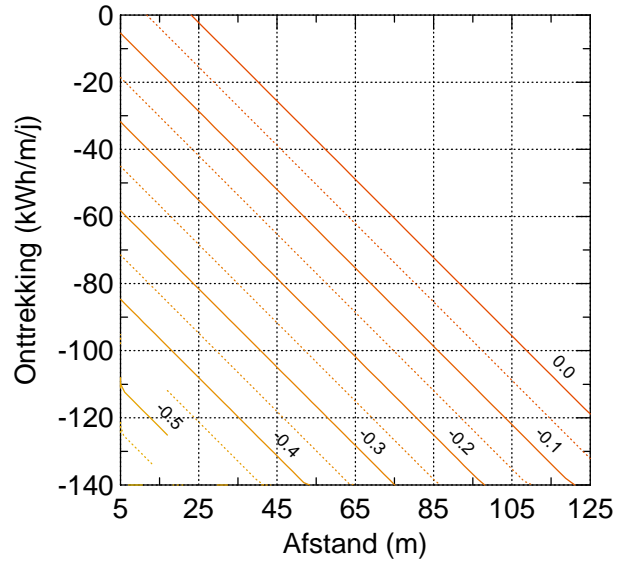
B: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,0 W/MK
 verre veldafstand: 105 meter

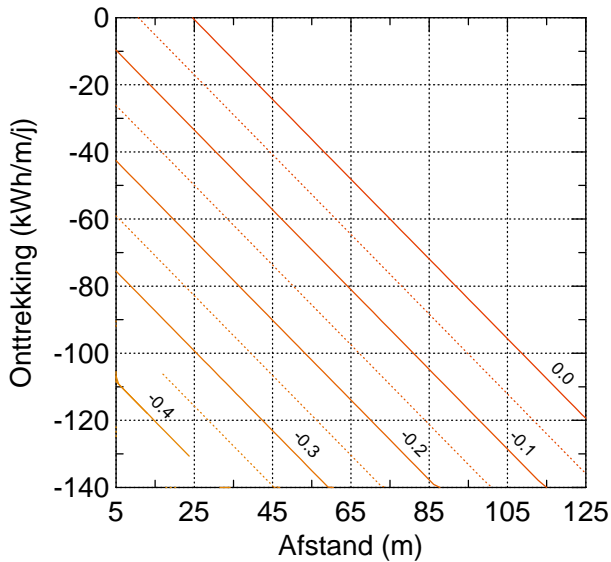
Warmtetoevoer: 40,0 kWh/m/j



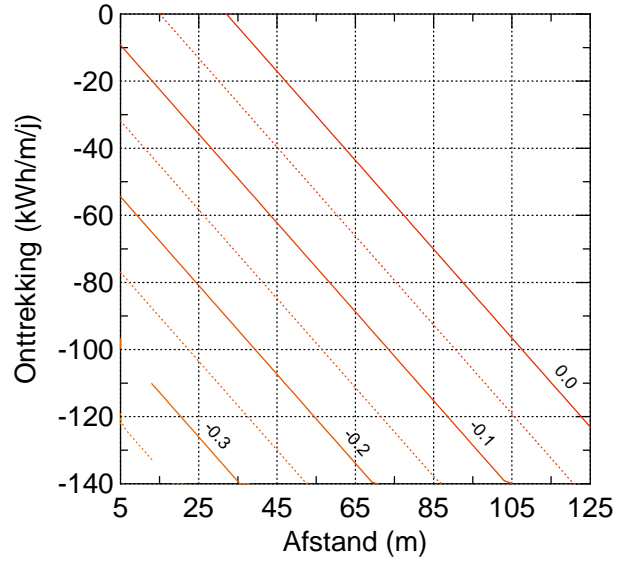
Warmtetoevoer: 50,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 60,0 kWh/m/j



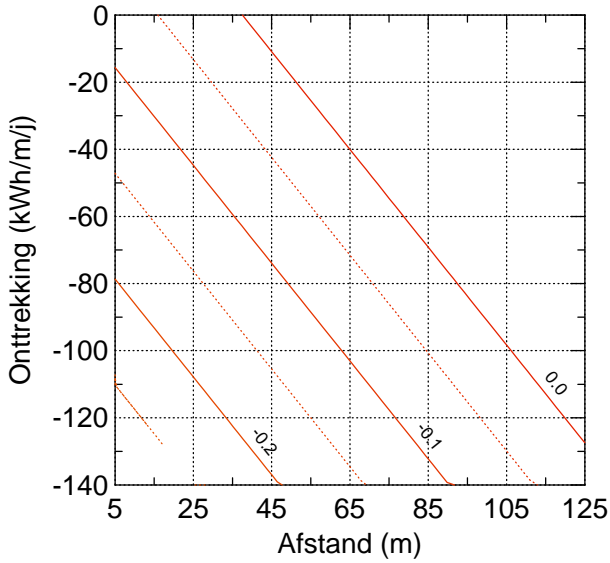
Warmtetoevoer: 70,0 kWh/m/j



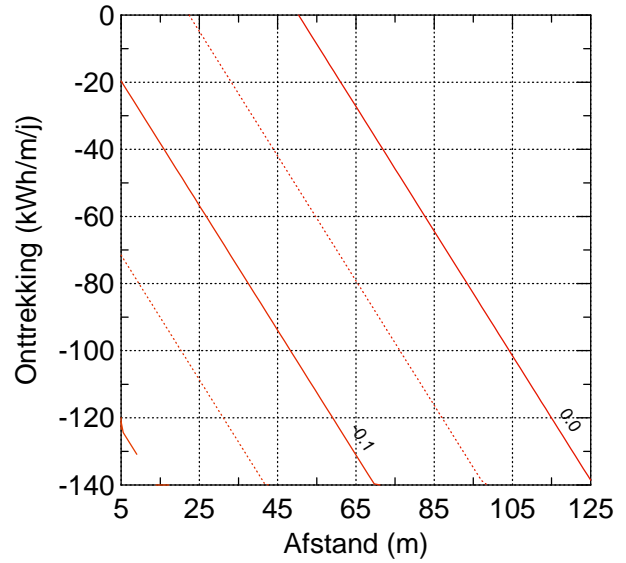
B: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,0 W/MK
 verre veldafstand: 105 meter

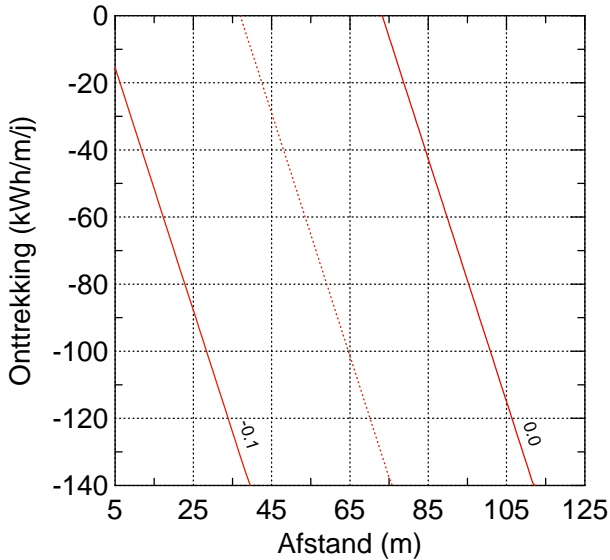
Warmtetoevoer: 80,0 kWh/m/j



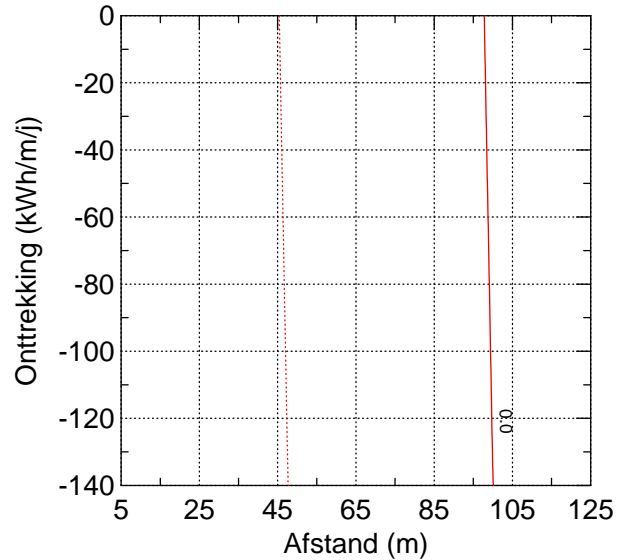
Warmtetoevoer: 90,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 100,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 110,0 kWh/m/j

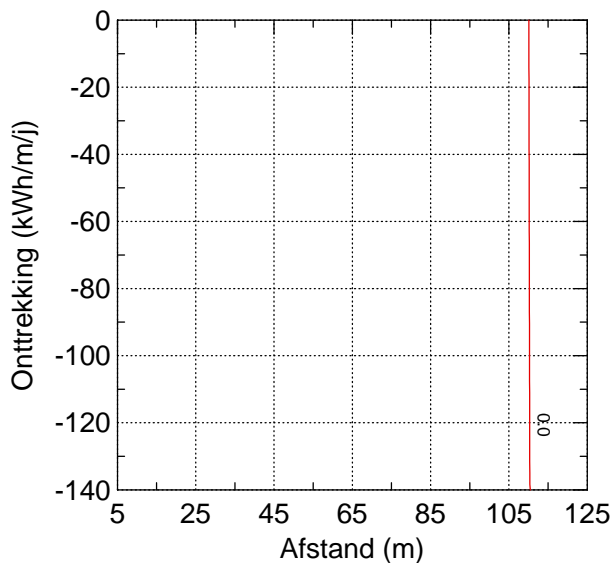
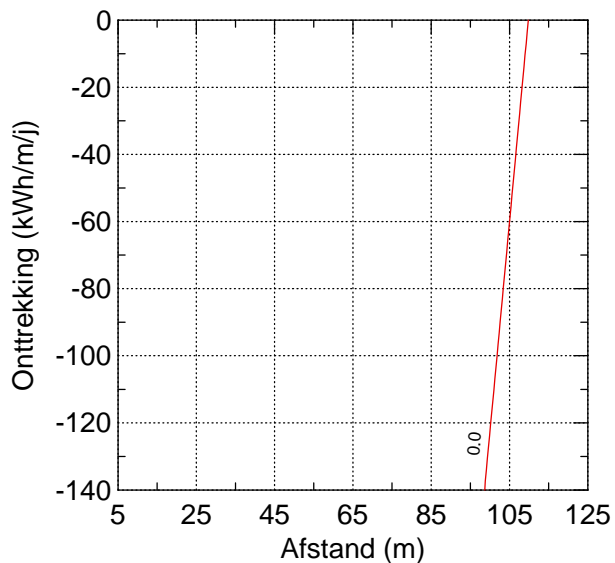


B: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,0 W/MK
 verre veldafstand: 105 meter

Warmtetoevoer: 120,0 kWh/m/j

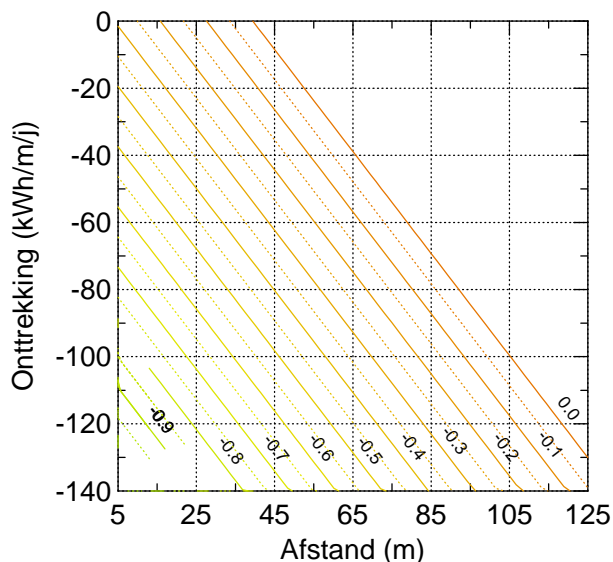
Warmtetoevoer: 130,0 kWh/m/j



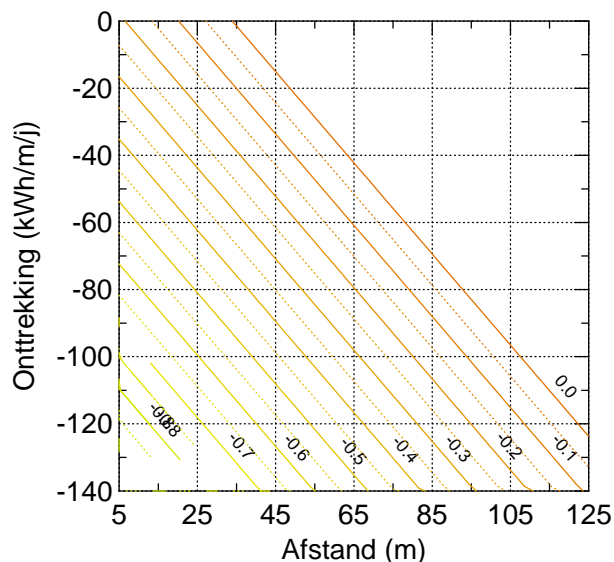
C: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,5 W/MK
 verre veldafstand: 120 meter

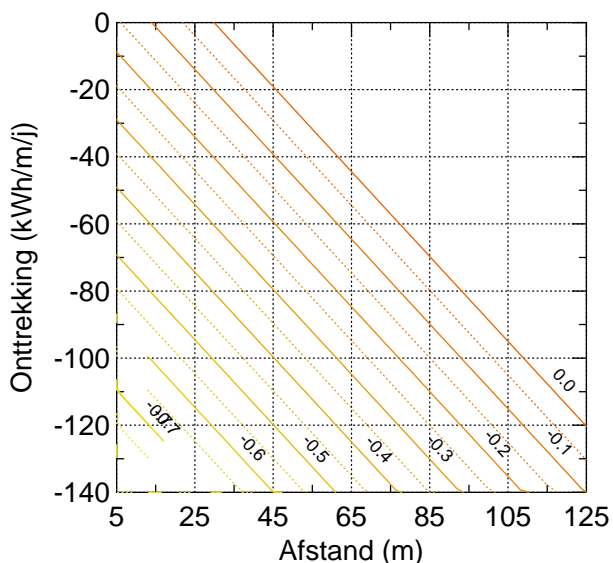
Warmtetoevoer: 0,0 kWh/m/j



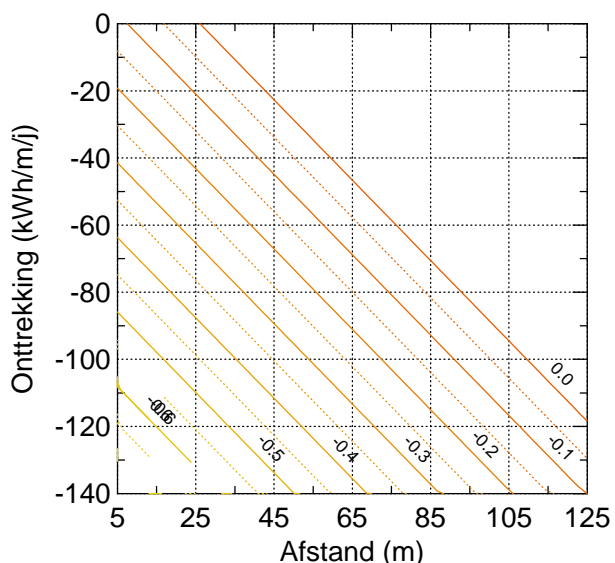
Warmtetoevoer: 10,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 20,0 kWh/m/j



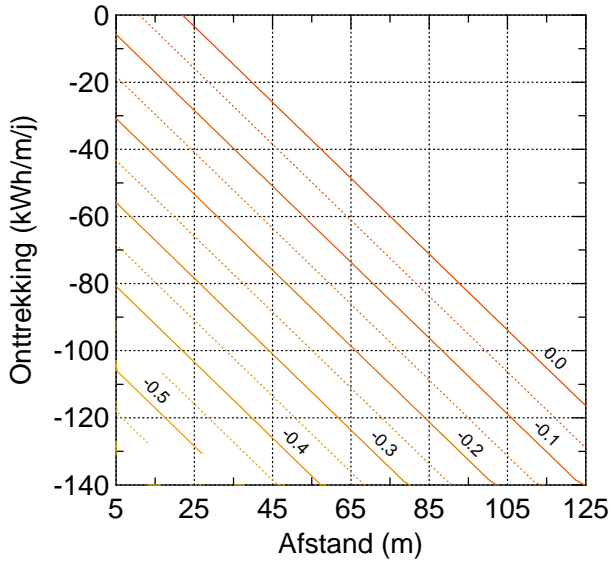
Warmtetoevoer: 30,0 kWh/m/j



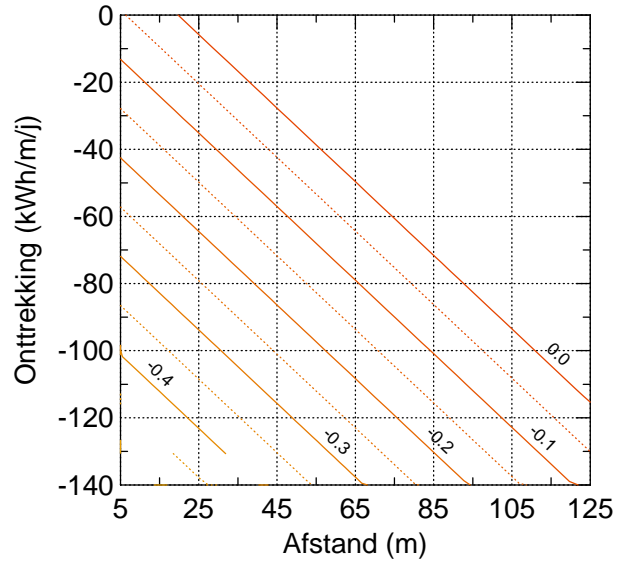
C: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,5 W/MK
 verre veldafstand: 120 meter

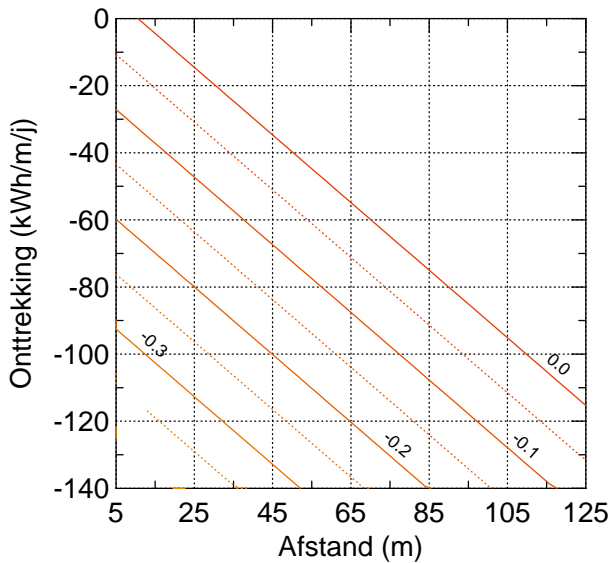
Warmtetoevoer: 40,0 kWh/m/j



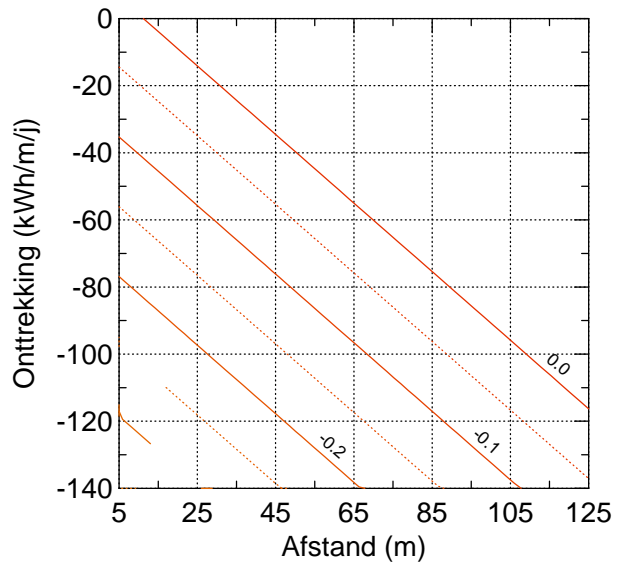
Warmtetoevoer: 50,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 60,0 kWh/m/j



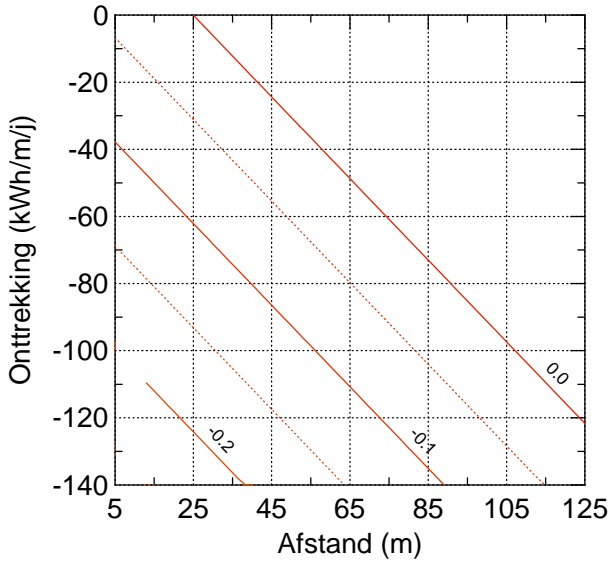
Warmtetoevoer: 70,0 kWh/m/j



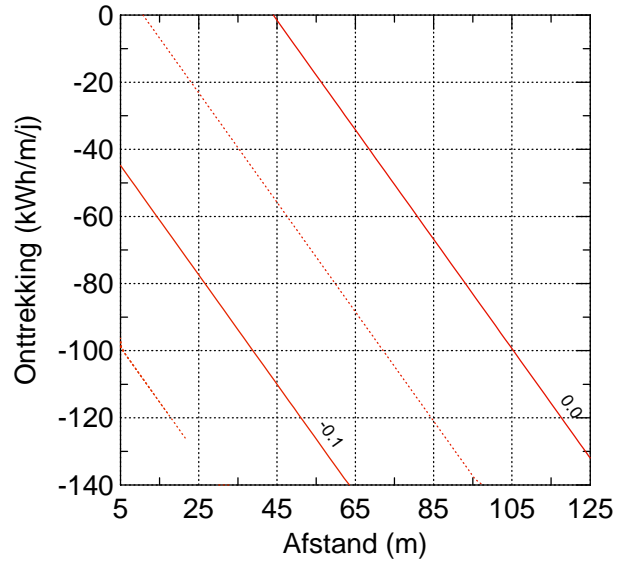
C: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,5 W/MK
 verre veldafstand: 120 meter

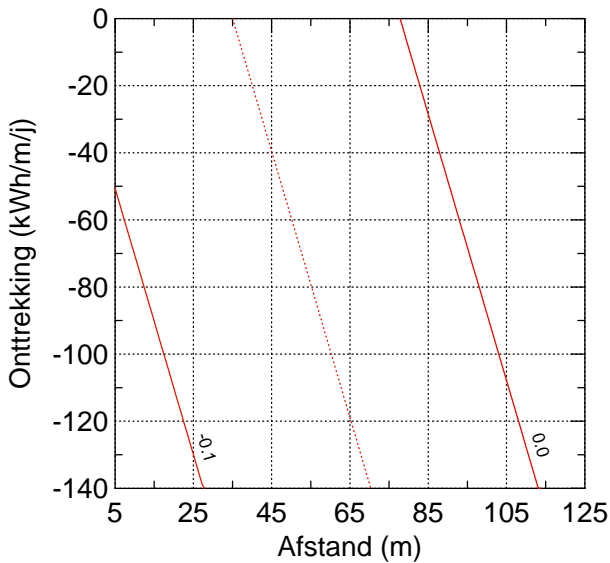
Warmtetoevoer: 80,0 kWh/m/j



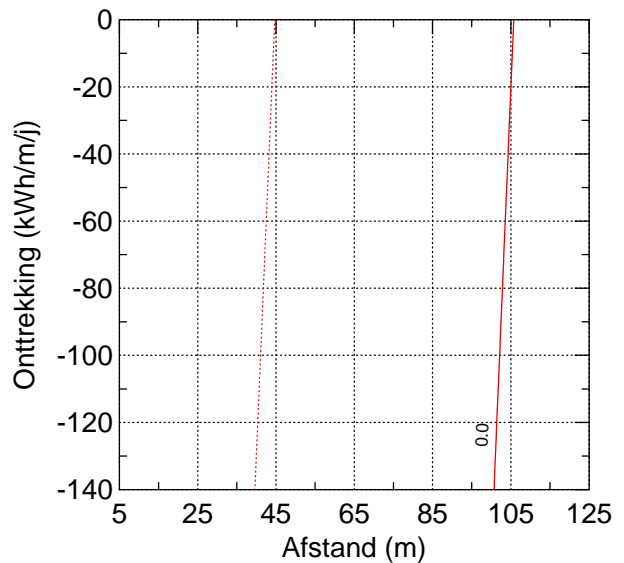
Warmtetoevoer: 90,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer 100,0 kWh/m/j



Warmtetoevoer: 110,0 kWh/m/j

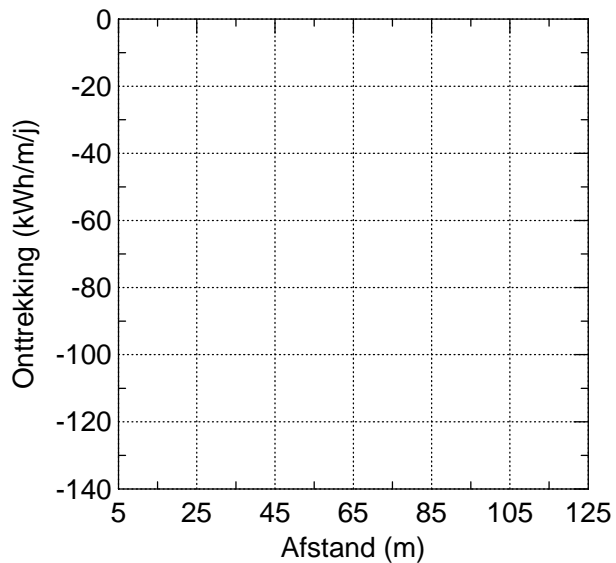
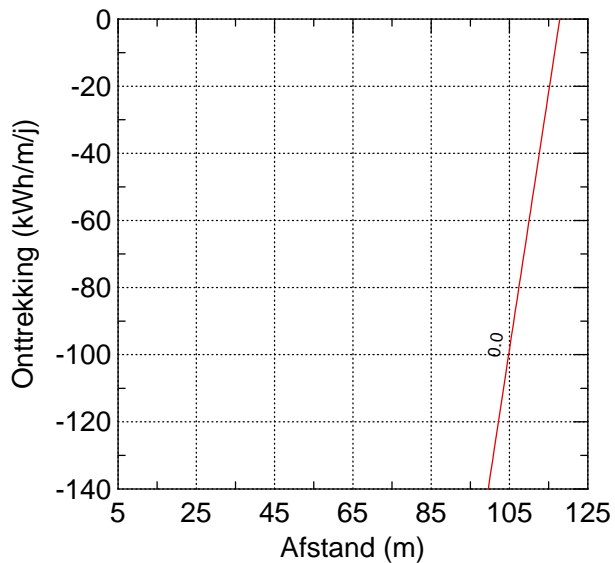


C: Temperatuurverandering (K) als functie van afstand en warmte-onttrekking

warmtegeleidingscoëfficiënt: 2,5 W/MK
 verre veldafstand: 120 meter

Warmtetoevoer: 120,0 kWh/m/j

Warmtetoevoer: 130,0 kWh/m/j



7 REFERENTIES

- Bandos, T.V., Montero, A., Fernandez, E., Santander, J.L.G., Isidro, J.M., Perez, J., Cordoba, P.J.F, de, Urchueguia, J.F. 2009. Finite line source models for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics* 38.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1947. *Conduction of heat in solids*, first edition. Oxford University Press, New York.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of heat in solids*, second edition. Clarendon Press, Oxford.
- Eskilson, P. 1986. Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code.
- Eskilson, P., Hellström, G., Claesson, J., Bolomberg, T. & Sanner, B. 2000. *Earth Energy Designer - EED* version 2.0.
- Eskilson, P.E., 1987. *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. PhD Thesis University of Lund, Sweden.
- Groenholland, 2005. *Haalbaarheidsonderzoek Geo-Energie Schoenmakershoek, Etten-Leur*. GH04067.
- Hart, D., Couvillion, R., 1986. *Earth Coupled Heat Transfer*. Publication of the National Water Well Association.
- Ingersoll, L., Zobel, O., & Ingersoll, A., 1954. *Heat conduction with engineering, geological and other applications*. McGraw-Hill, New York.
- Ingersoll, L.R., & Plass, H.J., 1948. *Theory of the ground pipe heat source for the heat pump*. Heating, Piping & Air Conditioning.
- ISSO 2005. *ISSO 73: Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars*.
- Kipp, K.L., 1986. *HST3D : A Computer Code for Simulation of Heat and Solute Transport in Three-Dimensional Ground-Water Flow Systems*. United States Geological Survey, Water Resources Investigations Report 86-4095.
- Lamarche, L. & Beauchamp, B. 2007a. New solutions for the short time analysis of geothermal vertical boreholes. *Heat and Mass Transfer*. 50.
- Lamarche, L. & Beauchamp, B. 2007b. A new contribution to the finite line-source for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*. 39.
- Marcotte, D. & Pasquier, P. 2008. Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems. *Geothermics*. 37.
- Shonder, J.A., Baxter, V., Thornton, J. & Hughes, P., 1999. A new comparison of vertical ground heat exchanger design methods for residential applications. In: *ASHRAE Transactions: Technical and symposium papers presented at the 1999 annual meeting in Seattle, Washington of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*; Volume 105, Part 2, by Geshwiler, M.; Harrell, D.; Roberson, T.
- Uitzinger, J. 2004. *Analyse EPC en energieverbruik bij woningen*. PRC Bouwcentrum / Novem 2004.
- Witte, H.J.L., 2003. *Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaars (NOVEM, 2DEN-0324)*
- Yavuzturk, C., 1999. *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems*. PHD Thesis, Stillwater, Oklahoma State University.
- Zeng, H.Y., Diao, N.R., Fang, Z.H.. 2002. A finite line source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*. 31(7).