

# ITGBES InterferentieTool Gesloten BodemenergieSystemen

ITGBES  
InterferentieTool Gesloten BodemenergieSystemen



Projectnummer : 180760

Uitgebracht aan : Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat / SIKB

Kenmerk :

Datum : 04/05/2020

---

## Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	2
2.	Verbeteren methode bepalen interferentie GBES .....	3
2.1.	Basisvergelijking lijnbronmethode.....	4
2.2.	Analyse oorspronkelijke BUM BE Bijlage 2 methode (lineaire nomogrammen) .....	5
2.3.	Verbeteren methode schatten temperatuureffecten .....	9
2.4.	Validatie .....	10
2.4.1.	Validatie lijnbronmethode .....	10
2.4.2.	Validatie benadering met regressievergelijking t.o.v. lijnbronresultaat .....	13
3.	Analyse en advies verbeteren procedure BUM BE bijlage 2 voor selectie systemen en gegevensverwerking .....	15
3.1.	Evaluatie beslisschema en selectieprocedure .....	15
3.1.1.	Keuze referentiesysteem "worst case" benadering.....	15
3.1.2.	Evaluatie van toe te passen zoekstraal .....	16
3.1.3.	Evaluatie "worst case afstand" bij klein aantal systemen. ....	18
3.1.4.	Mogelijk aanscherpen selectie systemen als functie van specifieke energieonttrekking (energiebalans).....	18
3.1.5.	Evaluatie begrenzing van bodemzijdig vermogen tot 70 kW .....	19
3.1.6.	Evaluatie toegepaste rekentijd van 25 jaar in relatie tot het maximale aantal systemen waarbij de ITGBES toegepast kan worden.....	21
3.1.7.	Evaluatie uitgangspunt voor specifieke warmte-onttrekking: totale lengte of einddiepte van het systeem.....	23
3.2.	Conclusies verbeteren lineaire nomogrammen en validatie.....	27
3.3.	Voorzet selectie en verwerkingsprocedure .....	28
4.	Gebruik van de tool.....	31
4.1.	Uitgangspunten en opzet.....	31
4.2.	Handleiding gebruik van de ITGBES .....	31
4.3.	Invoerscherm .....	32
4.4.	Excel werkboek .....	35
4.5.	Projectgegevens, gegevensinvoer .....	36
4.6.	Berekening interferentie.....	38
	Bijlage I: Verantwoording .....	41



## 1. Inleiding

*revisie 04/05/2020*

Tijdens de evaluatie van de laatste versie van de ontwikkelde geautomatiseerde ITGBES tool (eind 2019) is in overleg met de klankbordgroep besloten dat in de huidige situatie en met de vernieuwde methode de specifieke energievraag bepaald wordt op basis van de einddiepte van de bodemwarmtewisselaars. Aansluitend zijn de gegevens uit het Landelijk Grondwater Register (LGR) geëvalueerd op basis van dat gewijzigde uitgangspunt. Hierbij bleek dat de maximale onttrekking die voor de oorspronkelijke nomogrammen als grens is gebruikt (130 kWh/m/j) beperkend te worden. Eind 2019 is door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat een aanvullende opdracht verstrekt om de referentiegegevens uit te breiden tot een maximale energieonttrekking van 240 kWh/m/j. Omdat tegelijk een nieuw, verbeterd, model ter beschikking is gekomen zijn alle referentiegegevens opnieuw berekend. De ITGBES tool gebruikt deze nieuwe modelberekeningen en correlaties voor een nauwkeurigere bepaling van de temperatureffecten tussen gesloten bodemenergiesystemen.

Dit rapport is in Mei 2020, na het beschikbaar komen van de ITGBES tool en terugkoppeling uit de markt, aangevuld.

In juli 2013 is het wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen van kracht geworden waarmee een aantal zaken met betrekking tot het aanleggen en in bedrijf hebben van bodemenergiesystemen geregeld wordt. Wijzigingen zijn hiermee aangebracht het Activiteitenbesluit milieubeheer, het Besluit bodemkwaliteit, het Besluit hernieuwbare energie vervoer, het Besluit lozen buiten inrichtingen, het Besluit lozing afvalwater huishoudens, het Besluit omgevingsrecht en het Waterbesluit (Staatscourant 112, 25 maart 2013). Eén van de uitgangspunten bij een toenemend gebruik van de ondergrond voor warmte- en koudevoorziening is dat de bodem doelmatig gebruikt wordt voor bodemenergie en dat een aan te leggen systeem geen zodanige interferentie met eerder geïnstalleerde systemen heeft dat het doelmatig functioneren van betreffende systemen kan worden geschaad.

Aangezien het energetische rendement (verhouding tussen geleverde en verbruikte energie) in belangrijke mate van de brontemperatuur afhangt, kan worden gesteld dat negatieve interferentie neerkomt op het zodanig beïnvloeden van de brontemperatuur dat dit tot een lager rendement leidt. In deze context wordt "lager rendement" opgevat als: lager dan het beoogde ontwerpendement. In extreme gevallen zou de brontemperatuur zodanig beïnvloed kunnen worden door omliggende systemen dat de systemen niet meer kunnen functioneren. Met de gebruikelijke ontwerpmethoden worden collectieve bodemenergiesystemen ontworpen, maar is het niet mogelijk om temperatureffecten tussen verschillende individuele gesloten bodemenergiesystemen te bepalen. Berekeningen met geschikte numerieke methoden zijn complex, tijdrovend en moeilijk te beoordelen. Er is dan ook behoefte aan een voldoende nauwkeurige maar eenvoudig toe te passen

methode voor het bepalen van thermische interacties tussen gesloten bodemenergiesystemen.

In 2011 is een eenvoudige methode ontwikkeld waarmee temperatureffecten die tussen gesloten bodemenergiesystemen kunnen optreden bepaald worden (Witte, 2011). Deze methode is uitgewerkt in de "Methode toetsen interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen " (BUM BE Bijlage 2, versie 2.3; 11-12-2014). Vanaf 2013 is deze methode in gebruik.

De basis van de ontwikkelde methode is een berekening van optredende temperatureffecten als functie van energie-onttrekking aan de bodem, afstand en tijd, gebaseerd op de welbekende lijnbronmethode (Ingersoll et al 1948, 1954). Om de resultaten zo eenvoudig mogelijk toe te kunnen passen zijn de niet-lineaire resultaten vertaald naar lineaire nomogrammen (grafieken van temperatureffect als functie van afstand en energieonttrekking). Daarbij is een beslisschema opgesteld waarmee kan worden vastgesteld óf en wanneer de methode toegepast moet worden.

Door Buro38 is in 2016 een "Evaluatie wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen" (Buro38, <https://www.bodemplus.nl/actueel/nieuwsberichten/2016/evaluatie-0/>) uitgevoerd. In die evaluatie is één van de gesignaleerde knelpunten dat de methode voor het bepalen van negatieve interferentie als relatief complex en mogelijk conservatief wordt beschouwd. De vraag is derhalve of, op basis van de ervaring met het bepalen van interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen, de methode uit de BUM BE Bijlage 2 verbeterd kan worden. Groenholland heeft van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de SIKB opdracht gekregen om deze mogelijkheden tot verbetering in kaart te brengen en te implementeren. Concreet is het doel van dit project:

- Te komen tot een eenvoudiger toepasbaar en geautomatiseerde rekentool.
- De rekenmethode te valideren en waar mogelijk te verbeteren.
- De procedure voor het selecteren en verwerken van de gegevens te actualiseren.

## **2. Verbeteren methode bepalen interferentie GBES**

De procedure voor het bepalen van negatieve interferentie die in de BUM/HUM Bijlage 2 "Methode toetsen interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen" (SIKB, versie 2.3; 11-12-2014) is beschreven, is gebaseerd op de bekende lijnbronmethode. Met behulp van deze rekenmethode zijn temperatureffecten als functie van energievraag en afstand tot een lijnbron, na een operationele periode van 25 jaar, bepaald. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor een aantal energiescenario's die representatief waren voor kleine (eensgezinswoningen, kleine utiliteit) gesloten bodemenergiesystemen en voor drie verschillende bodemtypen. Deze resultaten zijn daarna verder vereenvoudigd tot lineaire nomogrammen waarmee op eenvoudige wijze onderlinge temperatureffecten bepaald kunnen worden.

Kracht van de methode is dat deze nagenoeg met de hand uitgevoerd kan worden met relatief beperkte gegevens zoals die bij de reguliere melding van een gesloten

bodemenergiesysteem aangeleverd worden (totale hoeveelheid ruimteverwarming, tapwatervraag, ruimtekoeling; totaal rendement en totale lengte bodemwarmtewisselaar, X- en Y-coördinaat centrum systeem).

Echter, de effecten van de vereenvoudigingen die zijn gedaan en de randvoorwaarden voor het mogen toepassen van de methode zijn indertijd, gezien de beperkte opdracht, niet uitgebreid geanalyseerd. Alhoewel verondersteld wordt dat de nomogrammen een conservatieve (overschatting) geven van de interferentie is dit niet gekwantificeerd.

De belangrijkste vereenvoudigingen en aannames van de BUM BE Bijlage 2 (versie 2.3; 11-12-2014) op een rij:

- Lijnbronmethode is inherent in enige mate conservatief (geen axiaal warmtetransport).
- Er wordt geen rekening gehouden met mogelijke effecten van grondwaterstroming.
- De eigenschappen van de bodem worden verondersteld homogeen te zijn.
- Rekenen met specifieke energieonttrekking en toevoer in kWh/m/j: maakt het mogelijk diverse systemen eenvoudig en direct met elkaar te vergelijken maar overschat effecten op diepere systemen.
- Rekenen vanuit middelpunt van het systeem aangezien alleen één X- en Y-coördinaat uit de melding bekend is.

Voor het automatiseren en verbeteren van de methode voor het bepalen van interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen zijn de volgende stappen doorlopen:

- Automatiseren van het bepalen van de temperatuureffecten tussen naburige systemen op basis van de bestaande uitgewerkte energiescenario's.
- Nader valideren van de resultaten van de oorspronkelijke lijnbronmethode en resultaten geautomatiseerde rekentool.
- Bepalen binnen welke randvoorwaarden en beperkingen de vereenvoudigde methode die in de rekentool geïmplementeerd is toegepast kan worden.
- Advies opstellen voor het actualiseren en waar mogelijk vereenvoudigen van de procedure voor het uitvoeren van de interferentietoets zoals die momenteel opgenomen is in de BUM BE Bijlage 2.

## 2.1. Basisvergelijking lijnbronmethode

Met de lijnbronmethode wordt de temperatuurverandering als functie van energievraag, afstand en tijd bepaald rond een lijnbron (die representatief is voor een individuele bodemwarmtewisselaar). Deze functie is niet lineair en wordt beschreven door de volgende vergelijking:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_i(x) \left( \frac{r^2}{4\alpha t} \right)$$

Hier is  $E_i(x)$  de exponentiële integraal:

$$E_i(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Deze vergelijking is geldig wanneer de straal  $r$  kleiner is dan de verre-veld afstand:

$$r \leq 4\sqrt{\alpha t}$$

Hart and Couvillion (1986) geven een oplossing voor deze exponentiële integraal:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln \frac{r_{\infty}}{r} - 0.9818 + \sum_1^n \frac{(-1)^{n+1} y^n}{n(n!)} \right]$$

De vergelijking lost de temperatuurverandering rond een lijnbron op voor een constante energie-puls. Om meerdere verschillende energiepulsen in de tijd te verwerken worden deze ontbonden in reeksen van meerdere constante energiepulsen die vervolgens in de tijd bij elkaar opgeteld worden. Om meerdere lijnbronnen met elkaar in de ruimte te combineren worden de resultaten van de individuele lijnbronnen bij elkaar opgeteld.

### *revisie 04/05/2020*

Voor de berekening van temperatuureffecten als functie van afstand is de oneindige lijnbronmethode geschikt maar conservatief omdat axiaal (verticaal) warmtetransport niet wordt beschouwd. Bij het uitbreiden van de basisberekeningen naar grotere specifieke energieonttrekking is een ander, meer nauwkeurig, model toegepast: het eindige lijnbronmodel. Het eindige lijnbron model is samengesteld uit de integraal over een serie puntbronnen, waarbij de randvoorwaarde dat de temperatuur aan het oppervlak niet verandert wordt gerealiseerd met behulp van de methode van gespiegelde puntbronnen (zie bijvoorbeeld Al-Khoury, 2011, voor een recent overzicht en wiskundige achtergrond van de methode).

## **2.2. Analyse oorspronkelijke BUM BE Bijlage 2 methode (lineaire nomogrammen)**

Een belangrijke vereenvoudiging die in de BUM BE Bijlage 2 methode geïntroduceerd is maakt het mogelijk om de temperatuureffecten van meerdere bodemenergiesystemen met diverse energievraag, verschillende aantallen en dieptes van de bodemwarmtewisselaar, met elkaar te vergelijken. In plaats van de totale energievraag per systeem wordt namelijk gerekend met de energievraag in kWh per meter per jaar (kWh/m/j). Daarbij is wel onderscheid gemaakt in de warmte- en koudevraag en wordt de specifieke energieonttrekking en specifieke energietoevoer gebruikt om de temperatuureffecten op afstand te bepalen.

In totaal zijn (voor het opstellen van de nomogrammen uit de BUM BE Bijlage 2) met de lijnbronmethode voor 600 verschillende scenario's (energieonttrekking, energietoevoer en warmtegeleidingscoëfficiënt bodem) de temperatuureffecten na een bedrijfstijd van 25 jaar bepaald. De lijnbronmethode geeft de temperatuurverandering als functie van de afstand



als een kromme (voorbeeld figuur 2.1.1). Omdat deze krommen, voor grotere afstanden, zeer lastig af te lezen zijn, is in de BUM BE Bijlage 2 een vereenvoudiging doorgevoerd door te vertalen naar een lineaire relatie, waarbij een afstand van minimaal 5 meter tot de lijnbron is aangehouden. Hiermee werd het mogelijk goed bruikbare figuren (nomogrammen) te ontwikkelen die voor een bepaalde energietoevoer de temperatuurverandering geven als functie van afstand voor alle beschouwde energieonttrekkingen.

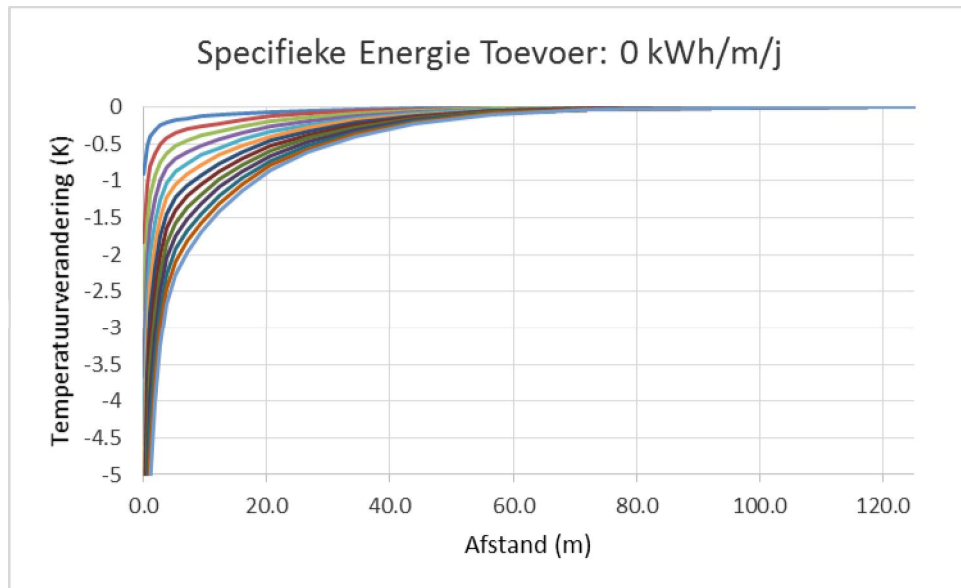
In figuur 2.1.1 is een voorbeeld gegeven van de resultaten van de lijnbronoplossingen voor een specifieke energieonttrekking die varieert tussen -10 en -130 kWh/m/j, een warmtetoevoer van 0 kWh/m/j en het bodemtype met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 2,0 W/mK.

Een voorbeeld van het bijbehorende lineaire nomogram uit de BUM BE Bijlage 2 wordt in figuur 2.1.2 gegeven.

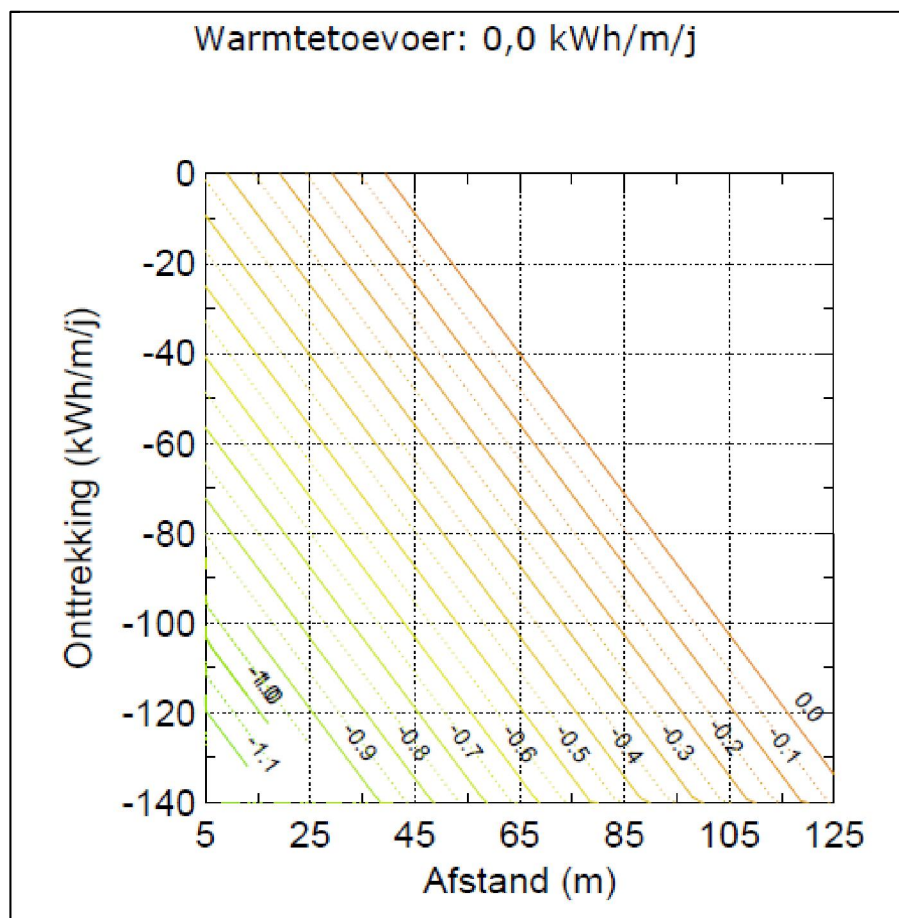
Met de gelineariseerde nomogrammen wordt een fout geïntroduceerd: op enige afstand van de lijnbron zal met het lineaire nomogram het temperatuureffect overschat worden (conservatieve benadering). Door met het centrale X- en Y-coördinaat te rekenen (waardoor de afstand tot naburige systemen groter wordt ingeschat dan in werkelijkheid het geval is voor een deel van de betrokken bodemwarmtewisselaars) én door te delen door de totale lengte van het bodemwarmtewisselaarsysteem wordt voor de conservatieve benadering gecompenseerd.

Figuur 2.1.3 geeft een voorbeeld van de temperatuureffecten voor een energiescenario met een onttrekking van -80 kWh/m/j en een energietoevoer van 20 kWh/m/j. Dezelfde vergelijking is gemaakt voor een specifieke energieonttrekking van -40 kWh/m/j en -130 kWh/m/j

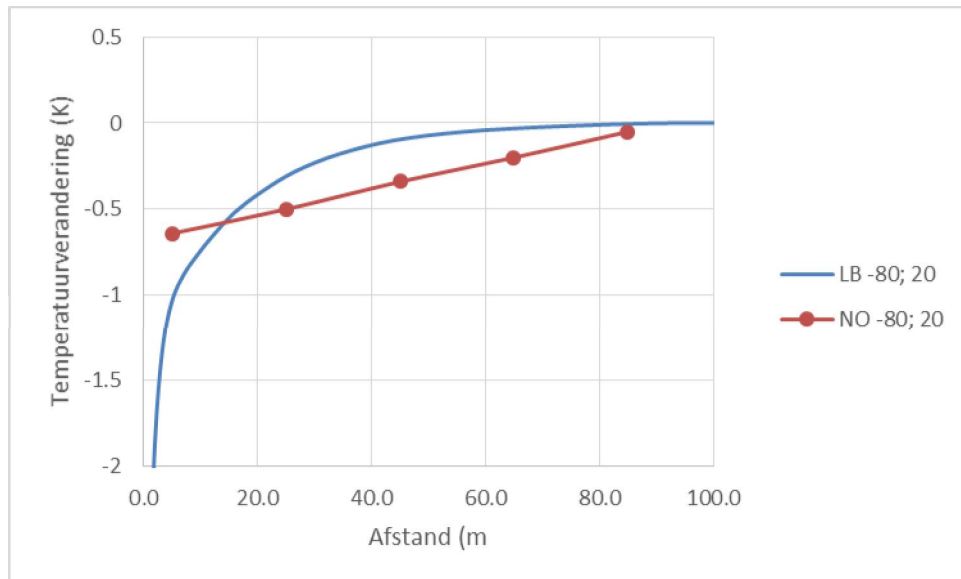
Figuur 2.1.1. Voorbeeld van de lijnbronoplossingen: temperatuurverandering als functie van afstand voor een energieonttrekking die varieert tussen -10 en -130 kWh/m/j en geen energietoevoer, warmtegeleidingscoëfficiënt bodem: 2,0 W/mK



Figuur 2.1.2. Met resultaat lijnbronmethode corresponderende lineaire nomogram van de energiescenario's uit figuur 2.1.1, beperkt tot een minimale afstand van vijf meter.



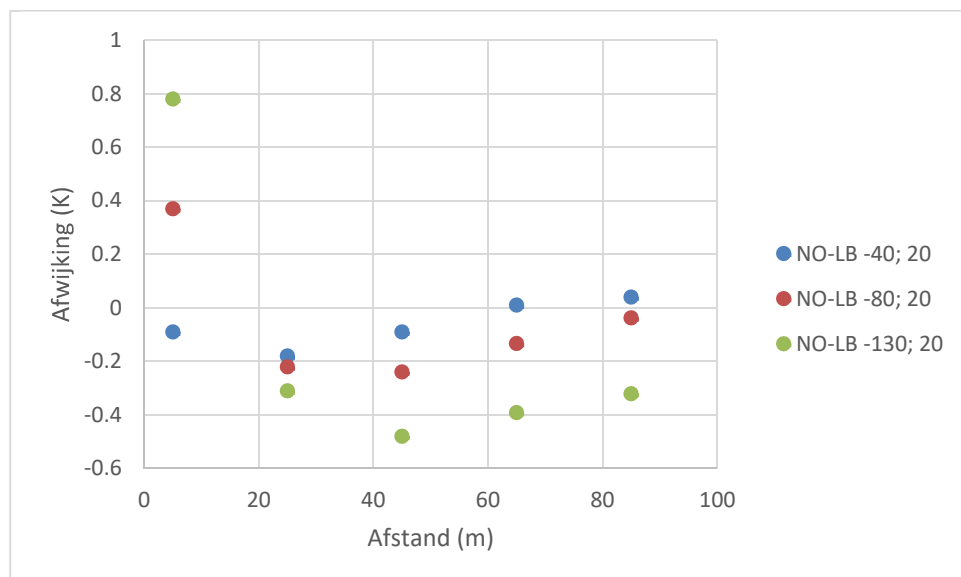
Figuur 2.1.3. Temperatuureffect volgens lijnbronmethode (LB) en nomogram (NO) voor een energiescenario met een specifieke warmteonttrekking van  $-80 \text{ kWh/m/j}$  en een warmtetoevoer van  $20 \text{ kWh/m/j}$  (warmtegeleidingscoëfficiënt bodem  $2,0 \text{ W/mK}$ ).



Wat in deze figuur duidelijk opvalt is dat op kleine afstanden de temperatuureffecten met de nomogrammen onderschat worden. Vanaf een afstand groter dan circa 10 meter worden de temperatuureffecten (afname) te groot ingeschat (overschat), waarbij de fout met toenemende afstand kleiner wordt. Op zich is dit wat verwacht mag worden bij de lineaire benadering van de lijnbron-krommen.

Voor drie verschillende energievraagpatronen is het verschil tussen de lineaire nomogrammen en de lijnbronoplossing uitgezet (figuur 2.1.4). De afwijking is in alle gevallen aanzienlijk, met name voor systemen met een relatief grote specifieke warmteonttrekking en voor systemen op een afstand kleiner dan 10 meter.

Figuur 2.1.4. Afwijking tussen schatting op basis lineaire nomogram (NO) en lijnbronmethode (LB) (warmtegeleidingscoëfficiënt bodem  $2,0 \text{ W/mK}$ ).

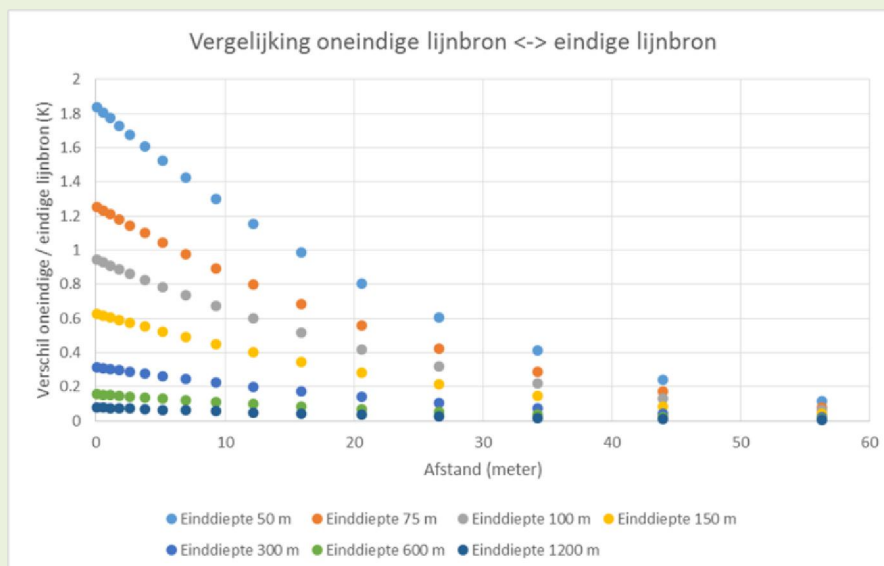


*revisie 04/05/2020*

Tussen de oorspronkelijke oneindige lijnbronmethode en de eindige lijnbronmethode treden verschillen op in de bepaalde temperatureffecten. Deze hangen af van de afstand tot de bodemwarmtewisselaar (hoe groter de afstand hoe meer de oneindige en eindige lijnbronmethode overeenkomen) en van de einddiepte van de bodemwarmtewisselaar (hoe groter de diepte, hoe groter de overeenkomst).

In het onderstaande figuur zijn de verschillen tussen de twee methoden weergegeven, voor een warmtewisselaar met een einddiepte van 50 meter beneden maaiveld en op afstanden kleiner dan 10 meter loopt het verschil op van 1,2K tot maximaal (op de bron zelf) 1,8K. Daarbij berekend het eindige lijnbronmodel kleinere temperatureffecten.

Voor bodemwarmtewisselaars met een einddiepte van 300 meter of meer zijn de verschillen veel geringer.



### 2.3. Verbeteren methode schatten temperatureffecten

De beste resultaten zouden verkregen worden door de lijnbronmethode direct in een gebruikersvriendelijke applicatie te implementeren. Binnen de opdracht is dat niet praktisch haalbaar. Doel is een eenvoudig gereedschap te ontwikkelen in Excel waarmee de temperatureffecten van verschillende systemen op elkaar goed te bepalen zijn.

Er is daarom eerst gezocht naar een methode om de met de lijnbronmethode bepaalde temperatureffecten uit de eerdere versie te vertalen naar eenvoudiger te implementeren functies.

Hiervoor is een functie ontwikkeld in drie stappen:

1. De lijnbron resultaten zijn zodanig getransformeerd dat de curve voor een bepaald energiestenariao te benaderen is met een tweede graads vergelijking:

$$T_{effect} = c + \alpha * \ln(D) + \beta * \ln(D)^2$$

Hier is  $D$  de afstand en  $\ln$  het natuurlijke logaritme.

2. Voor alle 600 energiestenariao's zijn de coëfficiënten  $c$ ,  $\alpha$  en  $\beta$  bepaald (totaal 1800 coëfficiënten).
3. Vervolgens is een functie ontwikkeld die deze coëfficiënten schat op basis van de specifieke energieonttrekking en energietoevoer.

Aan het einde van deze procedure beschikken we per bodemtype over een set van drie lineaire vergelijkingen (met elk drie coëfficiënten) waarmee de coëfficiënten van de tweede graads vergelijking geschat worden. Met andere woorden: we gebruiken in totaal negen coëfficiënten om alle temperatuureffecten van 196 energiestenariao's te kunnen bepalen als functie van afstand en (met drie bodemtypen): in totaal 27 coëfficiënten om de 1800 coëfficiënten van de tweede graads vergelijkingen te bepalen.

Deze benadering is in een Excel-werkboek geïmplementeerd, welke verder aangeduid wordt als de 'interferentie-tool gesloten bodemenergiesystemen', afgekort als ITGBES. Zie hoofdstuk 4 voor beschrijving en handleiding van de ITGBES.

#### *revisie 04/05/2020*

Voor de uiteindelijke versie van de ITGBES tool zijn de correlaties bepaald op basis van de modelberekeningen uitgevoerd met het eindige lijnbronmodel.

## **2.4. Validatie**

### **2.4.1. Validatie lijnbronmethode**

De lijnbronmethode op zich is een instrument wat veel en reeds langjarig wordt toegepast bij de evaluatie van de temperatuurrespons van bodemenergiesystemen. De methode heeft een aantal bekende beperkingen (er wordt bijvoorbeeld geen rekening gehouden met axiaal warmtetransport waardoor temperatuureffecten op zeer lange tijdduur in enige mate overschat worden) maar is goed toepasbaar.

In de rapportage van de ontwikkeling van de nomogrammen (GHNL011103, 2011) is de basisimplementatie van de lijnbronmethode beperkt gevalideerd aan de hand van een vergelijking met 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).

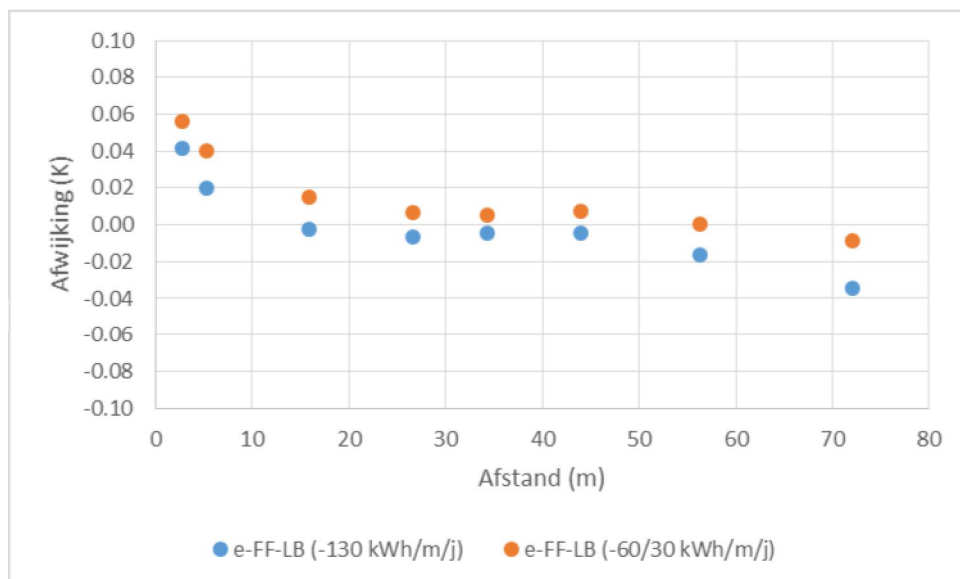
De conclusie was dat de verschillen tussen de lijnbronmethode en EED voldoende klein waren en dat ten opzichte van EED, de lijnbronmethode de temperatureffecten overschat.

De vergelijking met EED is echter lastig omdat EED de vloeistoftemperatuur berekent die ook wordt beïnvloed door de thermische boorgatweerstand.

Er is in het kader van dit project een aanvullende validatie uitgevoerd door de resultaten van het voor de BUM BE Bijlage 2 geïmplementeerde lijnbronmodel te vergelijken met resultaten van het programma Feflow (Finite Element Subsurface FLOW system, Trefry & Muffels, 2007; Diersch, 2014). Dit model simuleert grondwaterstroming, massatransport en warmtetransport in poreuze media.

Twee energiescenario's zijn vergeleken: één met een maximale warmteonttrekking van -130 kWh/m/j en één met een meer gebalanceerd energiescenario: warmteonttrekking -60 kWh/m/j en warmtetoever 30 kWh/m/j. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor een bodem met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 2,5 W/mK. Er is voor een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt gekozen omdat daarbij de verschillen het grootste zullen zijn. Figuur 2.4.1 geeft de resultaten (verschil tussen beide benaderingen) weer.

Figuur 2.4.1. Afwijking tussen berekening met lijnbronmethode (LB) en Feflow oplossing (FF) (warmtegeleidingscoëfficiënt bodem 2,5 W/mK).



Uit deze figuur is af te lezen dat het verschil in berekend temperatuureffect bij een afstand van meer dan 10 meter en minder dan 70 meter kleiner is dan  $\pm 0,01K$ . Bij kleinere of grotere afstanden is de afwijking altijd nog kleiner dan  $\pm 0,06K$ . De conclusie is hiermee dat de implementatie van de lijnbronmethode een kleine afwijking heeft ten opzichte van berekeningen met meer geavanceerde modellen.

Een tweede validatie is uitgevoerd met de implementatie van de lijnbronmethode waarmee ook een ruimtelijke superpositie uitgevoerd kan worden. Deze resultaten zijn weer vergeleken met Feflow. Omdat in Feflow de totale temperatuurverandering bepaald wordt (en niet alleen de interferentie effecten) is de berekening in Feflow uitgevoerd door steeds enkele bodemwarmtewisselaars "uit" te zetten. Het temperatuureffect op dat punt is dan een gevolg van de superpositie van de bodemwarmtewisselaars die "aan" staan (figuur 2.4.2).

Deze validatie is uitgevoerd voor een systeem met vijf individuele bodemwarmtewisselaars in de scenario's met verschillende energievraagpatronen, afstand tussen de individuele bodemwarmtewisselaars en warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (tabel 2.4.1).

Figuur 2.4.2. Validatie met vijf individuele bodemwarmtewisselaars, vergelijking lijnbronmethode en Feflow. Voor de berekening van de fout zijn steeds het centrale of het centrale en zuidwestelijke systeem "uitgezet", de cumulatieve effecten van de andere systemen zijn dan vergeleken.



Tabel 2.4.1. Afwijking superpositie tussen berekening met scenario's (LB) en Feflow oplossing (FF). De eerste vier systemen corresponderen met figuur 2.4.2. Voor uitleg zie tekst.

Warmtegeleiding -coëfficiënt (W/mK)	Specifieke onttrekking (kWh/m/j)	Specifieke toevoer (kWh/m/j)	Afstand tussen systemen (m)	Systemen "uit"	Afwijking Lijnbronmethode – Feflow (K)
2,0	-60	0	20	C	-0,07
2,0	-60	0	20	C; ZW	-0,07; -0,09
2,0	-130	0	5	C	-0,34
2,0	-130	0	5	C; ZW	-0,29; -0,38
2,0	-130	0	12,5	C	-0,15
2,0	-130	0	12,5	C; ZW	-0,12; -0,09
2,0	-60	30	12,5	C	-0,03
2,0	-60	30	12,5	C; ZW	-0,02; -0,07
2,0	-65	20	12,5	C	-0,01
2,0	-65	20	12,5	C; ZW	-0,04; -0,03
2,5	-130	65	12,5	C	-0,06
2,5	-130	65	12,5	C; ZW	-0,04; -0,04
1,5	-130	0	12,5	C	-0,19
1,5	-130	0	12,5	C; ZW	-0,13; -0,11

De fout bij optellen van de individuele resultaten, indien de systemen op enige afstand liggen, is klein. De "worst case", bij een grotere energie-onttrekking (130 kWh/m/j) en kleinere afstanden (5 meter), geeft duidelijk grotere afwijkingen. De afwijkingen zijn negatief, dat wil zeggen dat de met de lijnbron berekende temperatuureffecten groter (conservatief) zijn ten opzichte van de Feflow berekening.

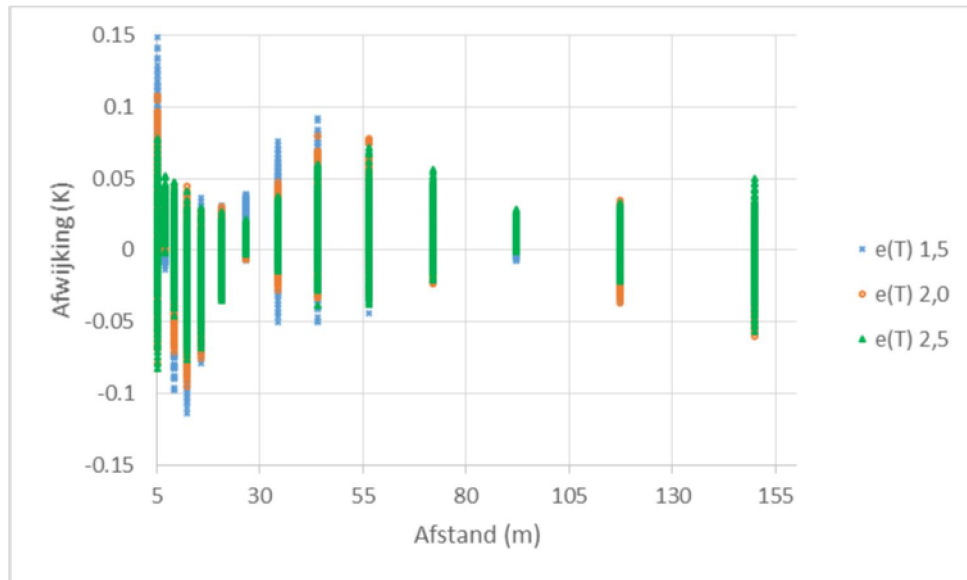
#### 2.4.2. Validatie benadering met regressievergelijking t.o.v. lijnbronresultaat

Zoals in paragraaf 2.2 en 2.3 omschreven is de oorspronkelijke benadering van de lijnbronmethode door lineaire nomogrammen in de geautomatiseerde tool ITGBES vervangen door een benadering op basis van een tweedegraads vergelijking. Hierbij zijn de coëfficiënten van de tweedegraads vergelijking zelf weer te schatten door een regressie op specifieke energieonttrekking en energietoevoer.

Om de fout die hiermee geïntroduceerd wordt te kwantificeren zijn de resultaten van de twee benaderingen vergeleken. De resultaten zijn in figuur 2.4.3 weergegeven. Op vijf meter afstand bedraagt de fout minder dan  $\pm 0,15K$ , op grotere afstanden bedraagt de fout minder dan  $0,08K$ . Dit zijn de absolute fouten, meer gebruikelijk is het bepalen van de "mean root square error", deze bedraagt  $0,028K$  (totaal, alle vergelijkingen).



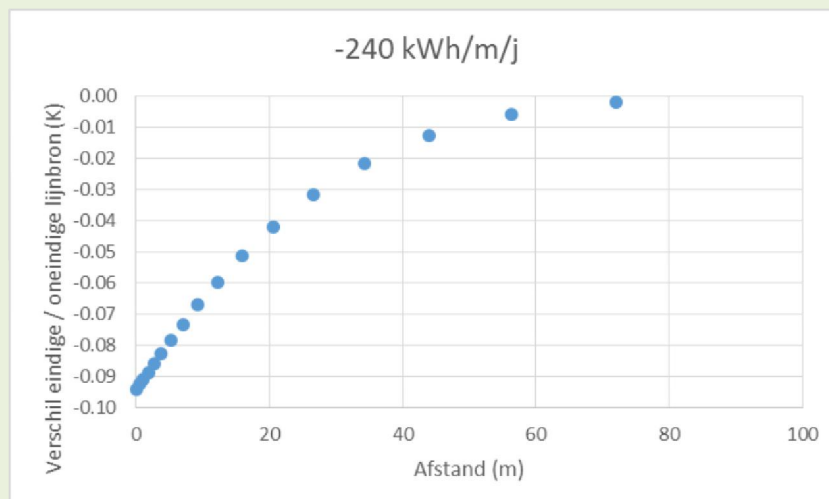
Figuur 2.4.3. Afwijking superpositie tussen berekening met lijnbronmethode (LB) en de benadering gebaseerd op tweedegraads vergelijking.



#### revisie 04/05/2020

De uitgebreide validaties zijn niet opnieuw uitgevoerd voor het eindige lijnbronmodel. Wel zijn de resultaten van het eindige lijnbronmodel vergeleken met het oneindige lijnbronmodel, met de maximale specifieke warmtevraag van  $-240 \text{ kWh/m/j}$  en voor een bodemwarmtewisselaar met een grote lengte waarbij we verwachten dat de resultaten overeenkomen. De figuur hieronder laat zien dat de fout op geringe afstand tot de bron al klein is en zelf op de locatie van de bron zelf niet groter dan  $-0,1\text{K}$ .

Op afstanden waarvoor de tool gebruikt kan worden (groter dan 5 meter) bedraagt het verschil (maximale fout)  $\pm 0,08\text{K}$ .



De verschillen tussen de correlaties die in de Excel tool gebruikt worden en de werkelijke oplossing zijn globaal vergeleken en komen overeen met de resultaten die voor de oneindige lijnbronmethode zijn gevonden.

### 3. Analyse en advies verbeteren procedure BUM BE bijlage 2 voor selectie systemen en gegevensverwerking

De BUM BE Bijlage 2 bevat een beslisschema en procedure voor het selecteren en verwerken van de gegevens van kleine gesloten bodemenergiesystemen. Bij de ontwikkeling van de ITGBES was één van de vragen of deze procedure verbeterd kon worden. Punten die bij de evaluatie van de procedure aan de orde zijn gesteld zijn:

- Keuze referentiesysteem "worst case" benadering, in de eerste versie is uitgegaan van een maximale onttrekking van -130 kWh/m/j als "worst case".
- Evaluatie van toe te passen zoekstraal (versie 2013: 120 meter).
- Mogelijk aanscherpen "worst case afstand" bij klein aantal systemen.
- Kan de selectie van bij de interferentietoets te betrekken systemen worden verkleind in specifieke situatie (energiebalans, gebundelde melding)?
- Maximale aantal systemen waarbij het gereedschap toegepast kan worden.
- Begrenzing van bodemzijdig vermogen tot 70 kW: is het mogelijk om de methode voor grotere systemen toe te passen?
- Voldoet de toegepaste rekentijd van 25 jaar.

In onderstaande paragrafen wordt op deze wensen ingegaan. Vervolgens wordt een voorzet voor de te volgen procedure gegeven.

#### 3.1. Evaluatie beslisschema en selectieprocedure

##### 3.1.1. Keuze referentiesysteem "worst case" benadering

Om vast te stellen of de keuze voor het referentiesysteem aangepast kan worden zijn gegevens uit het Landelijk Grondwater Register (LGR) geanalyseerd. Op 6 december 2018 is een uittreksel uit het LGR verkregen waarin totaal 12.021 registraties zijn opgenomen verdeeld over grondgebonden woningbouw, gestapelde bouw en utiliteit.

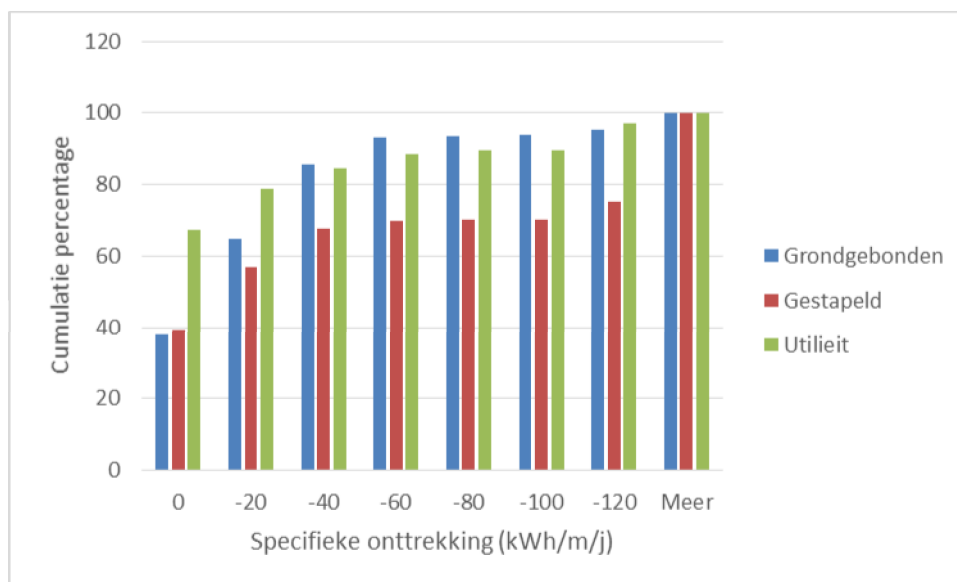
Van deze drie mogelijke toepassingen zijn de netto specifieke energieonttrekkingen bepaald. Vervolgens zijn daarvan frequentieverdelingen opgesteld, de cumulatieve percentages zijn in figuur 3.1.1 weergegeven.

In totaal zijn 10.615 grondgebonden woningen, 873 gestapelde bouw en 201 utiliteit systemen geregistreerd. Samenvattend blijkt (specifieke energievraag bepaald d.m.v. delen totale lengte bodemenergiesysteem conform versie 2013 BUM BE Bijlage 2):

- 90% van alle grondgebonden woningen hebben een specifieke warmteonttrekking van minder dan -65 kWh/m/j.
- 95% van alle grondgebonden woningen hebben een specifieke warmteonttrekking van minder dan -75 kWh/m/j.
- 90% van alle gestapelde woningen hebben een specifieke warmteonttrekking van minder dan -55 kWh/m/j.
- 85% van alle utiliteit hebben een specifieke warmteonttrekking van minder dan -65 kWh/m/j.

Op basis hiervan kan besloten worden om voor een worst case systeem uit te gaan van -65 kWh/m/j.

Figuur 3.1.1. Cumulatieve percentages specifieke warmteonttrekking voor grondgebonden woningen, gestapelde bouw en utiliteit (bron: LGR 6/12/2018).



### 3.1.2. Evaluatie van toe te passen zoekstraal

De procedure in BUM BE Bijlage 2 schrijft een zoekstraal van 120 meter voor. Uitgangspunt hiervoor was in de 2013 versie een worst case van -130 kWh/m/j en een grens voor temperatureffect van 0,1K. Daarmee kwam de maximale afstand voor een mogelijk effect op 60 meter, aangezien voorbij dat (mogelijk te beïnvloeden systeem) nog andere systemen kunnen liggen is de zoekstraal vastgesteld op 120 meter (2 maal 60 meter).

Indien er nu gekozen wordt voor een nieuwe worst-case van -65 kWh/m/j, dan wordt de maximale afstand waarop nog een effect kan optreden 45 meter, met een bijbehorende zoekstraal van 90 meter.

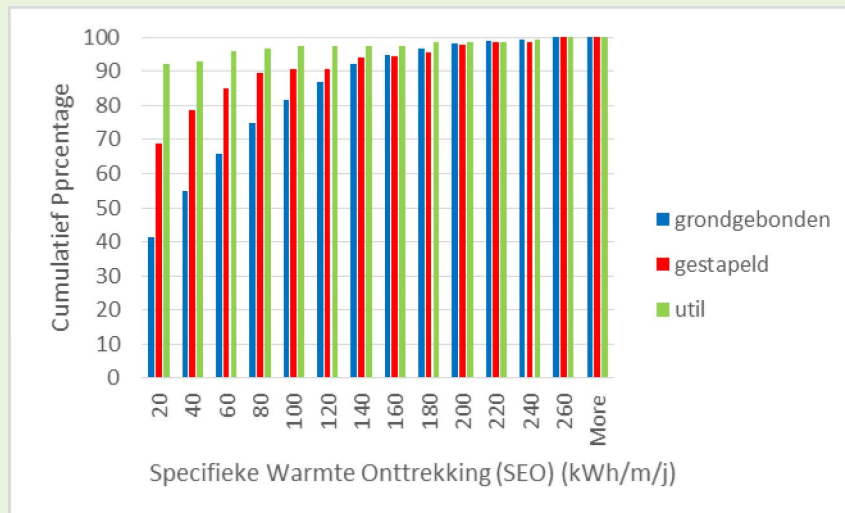
Echter, hierbij zijn enkele kanttekeningen te plaatsen:

- Systemen die mogelijk een grotere onttrekking hebben (er komen in het LGR altijd nog ruim 1500 systemen met een onttrekking boven de -65 kWh/m/j voor). Deze systemen worden dan bij het bepalen van de zoekstraal buiten beschouwing gelaten, waardoor de zoekstraal niet goed rekening houdt met situaties met dergelijke systemen met een relatief grote specifieke warmte-onttrekking.
- Door verschillende bevoegde gezagen is tijdens de klankbordgroep bijeenkomsten aangegeven dat er steeds vaker sprake is van grote collectieve bodemenergiesystemen die dan niet in de evaluatie worden meegenomen omdat het centrum buiten de zoekstraal valt. Gezien de steeds grotere toename van aantallen systemen is dit een belangrijk aandachtspunt. Eén omgevingsdienst van de klankbordgroep hanteert daarom een zoekstraal van 750 meter.
- Tegelijkertijd is de wens van marktpartijen de inspanning zoveel mogelijk te verkleinen. Dat zou pleiten voor een kleinere zoekstraal.

De wens van de klankbordgroep is om een procedure te ontwikkelen waarbij zo efficiënt mogelijk systemen geselecteerd worden, zonder dat grotere (collectieve) systemen over het hoofd worden gezien. Deze procedure wordt in paragraaf 3.2 uitgewerkt.

### revisie 04/05/2020

Wanneer met de gegevens uit het LGR niet de totale lengte (zoals in de oorspronkelijke BUM BE Bijlage 2) maar door einddiepte heeft dit uiteraard ook effect op de "worst case" systeem selectie.

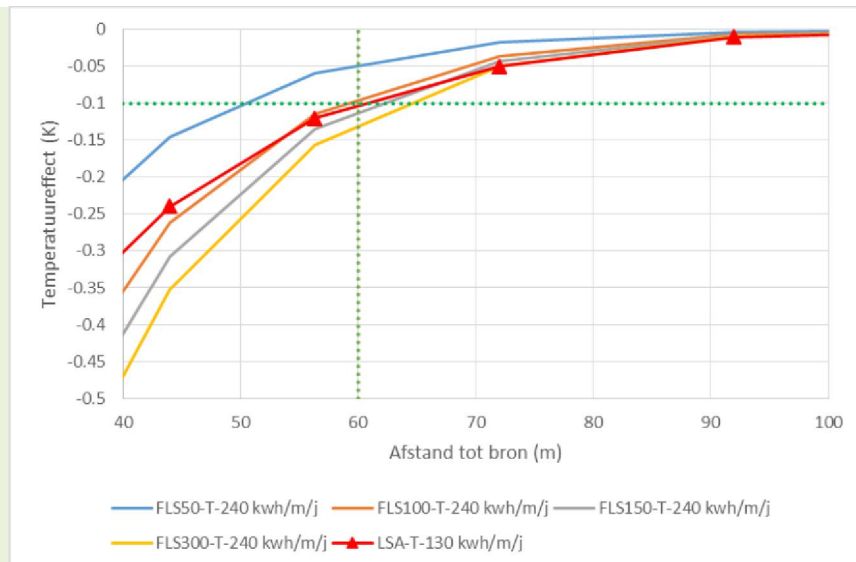


De maximale onttrekking (99% van de systemen) is minder dan -240 kWh/m/j; ruim 90% van de systemen heeft een onttrekking minder dan -140 kWh/m/j.

Vervolgens is gekeken wat dit inhoudt voor de zoekstraal. De zoekstraal is bepaald als twee maal de afstand waar de temperatuurverlaging minder dan -0,1K bedraagt voor de "worst case" specifieke warmte onttrekking.

In onderstaand figuur is dit weergegeven:

- De oorspronkelijke afstand op basis van de oneindige lijnbronmethode met een worst case van -130 kWh/m/j
- De temperatuurverandering voor -240 kWh/m/j met het nieuwe model voor verschillende einddiepte van de bodemwarmtewisselaar



Uit dit figuur blijkt dat, wanneer de zoekstraal van 2 x 60 (120) meter gehandhaafd wordt bij zeer diepte bodemwarmtewisselaars de zoekstraal iets te klein is (-0,1K temperatuurverandering op 65 meter) terwijl bij een kleine einddiepte (50 meter) de zoekstraal wat te groot zou zijn.

Omdat deze verschillen gering zijn is de zoekstraal gehandhaafd op 2 x 60 (120) meter.

### 3.1.3. Evaluatie "worst case afstand" bij klein aantal systemen.

In de versie 2013 van de BUM BE Bijlage 2 wordt een "worst case afstand" (D) afstand bepaald voor de drie bodemtypen. Deze "worst case afstand" is de afstand waarbij zeker geen interferentie optreedt wanneer er voor een te melden systeem slechts één buursysteem aanwezig is. Ligt het buursysteem verder weg dan de "worst case afstand" dan hoeft er geen interferentiebepaling uitgevoerd te worden.

Een vraag was of deze procedure in de nieuwe versie van de tool uitgebreid kon worden, bijvoorbeeld rekening houdende met energiebalans. Echter de nieuwe versie van de tool berekent de interferentie tegelijk met het berekenen van de afstanden, direct na invoer van de gegevens. Daarmee vervalt het voordeel van het bepalen van een "worst case afstand".

### 3.1.4. Mogelijk aanscherpen selectie systemen als functie van specifieke energieonttrekking (energiebalans)

#### *Systemen met energetische balans*

Een discussiepunt bij de klankbordgroep bijeenkomsten betrof de naar verwachting beperkte thermische interferentie tussen systemen met een hoge mate van energiebalans. Uiteraard zal de berekende interferentie tussen systemen met een hoge mate van energiebalans met de ITGBES geautomatiseerde tool klein zijn, maar de vraag was of het uitvoeren van een effectenberekening überhaupt noodzakelijk is.

Allereest is het zo dat er andere systemen, die wellicht minder grote energiebalans hebben, aanwezig kunnen zijn en dat in die gevallen er ten alle tijden een effectenberekening nodig is aangezien bestaande systemen ook nieuwe systemen niet negatief mogen beïnvloeden.

Binnen de huidige opdracht is het niet mogelijk om een meer uitgebreide analyse van de effecten van energiebalans te maken en in de tool te verwerken. Paragraaf 3.3 geeft wel een mogelijke toepassing van de tool voor dit specifieke geval.

### *Systemen die in samenhang zijn ontworpen en (eventueel) gebundeld worden gemeld*

Een andere belangrijke vraag is of bij een gebundelde melding bestaande uit een groter aantal systemen die in samenhang ontworpen zijn er ook tussen de systemen de effecten moeten worden bepaald. Immers, de onderlinge effecten zouden bij het ontwerp al gecompenseerd moeten zijn.

De beschikbare ontwerpmethoden, zoals Earth Energy Designer, kunnen geen systemen met andere verschillende kenmerken (energievraag, afstand tussen bodemwarmtewisselaars en dergelijke) gedetailleerd doorrekenen. De ontwerpmethoden, zoals Earth Energy Designer, rekenen daarbij altijd alsof het een collectief systeem betreft en maken daarmee geen onderscheidt tussen de effecten op meer centraal gelegen of perifeer gelegen systemen. Hierbij speelt ook de energiebalans weer een belangrijke rol.

Een mogelijke procedure waarmee in dergelijke gevallen aangetoond kan worden dat het integrale ontwerp voldoende voor de interferentie tussen de systemen compenseert is:

1. Bepaal de interferentie tussen de systemen in het integrale ontwerp.
2. Bereken met de ontwerpmethode de temperatuur van elk bodemenergiesysteem individueel, met de omvang van de bodemwarmtewisselaar uit het integrale ontwerp.
3. Vergelijk de temperatuur uit stap 2 met de gewenste ontwerptemperatuur, het verschil tussen de gewenste ontwerptemperatuur (waarbij het rendement geleverd wordt) moet groter zijn dan de in stap 1 berekende temperatuurverlaging als gevolg van interferentie (met een marge van 1,5K).

### **3.1.5. Evaluatie begrenzing van bodemzijdig vermogen tot 70 kW**

Een vraag betrof of het mogelijk zou zijn om de ITGBES tool ook te gebruiken voor systemen met een ondergronds vermogen van meer dan 70 kW. Grote systemen bestaan uit meerdere individuele bodemwarmtewisselaars die in een collectief veld met elkaar verbonden zijn. De beperkingen die daar een rol bij spelen zijn:

- De effecten van het grote systeem op de omgeving wordt onderschat omdat vanuit een centraal coördinaat wordt gerekend. Dit zou te ondervangen zijn door niet vanuit het centrum maar vanaf de rand van het grote systeem te rekenen, die gegevens zijn echter bij een standaard melding in principe niet beschikbaar.
- De invloed van naburige systemen op het grote systeem (> 70kW) zal per individuele bodemwarmtewisselaar anders zijn, aangezien de afstand tot het naburige systeem verschilt én omdat de energiebelasting van de warmtewisselaars in het collectieve

veld niet gelijk is. Indien het maximale temperatuureffect wordt genomen zal het effect sterk overschat worden.

- Een groot systeem zal buiten de maximale netto specifieke energieonttrekking van 130 kWh/m/j vallen, de ITGBES tool is voornamelijk tot die maximale onttrekking beperkt.
- De afstand tot een individuele bodemwarmtewisselaar van het collectieve systeem kan groter zijn dan de maximale afstand waarvoor de lijnbronvergelijkingen zijn bepaald.

De conclusie is dat zowel oorspronkelijke nomogrammen als ook de vernieuwde geautomatiseerde tool niet geschikt zijn voor het bepalen van effecten met grote systemen.

### 3.1.6. Evaluatie toegepaste rekentijd van 25 jaar in relatie tot het maximale aantal systemen waarbij de ITGBES toegepast kan worden.

De nomogrammen in de BUM BE bijlage 2 zijn gebaseerd op berekeningen met een rekentijd van 25 jaar. Hiervoor is indertijd gekozen omdat dat de gebruikelijke rekentijd is bij een ontwerp van een bodemwarmtewisselaarsysteem. Voor kleine individuele systemen is bij die simulatietijd een redelijke evenwichtssituatie bereikt, met andere woorden: indien het systeem langer operationeel blijft zal de bedrijfstemperatuur niet veel meer veranderen.

Voor gebouwen is de gebruikelijke ontwerp levensduur 50 jaar. Ook op gesloten bodemenergiesystemen wordt een technische levensduur van 50 jaar gegeven. Daarnaast zien we dat de projectomvang van gelijktijdig aan te leggen systemen toeneemt.

Deze twee vragen hangen deels samen, omdat de te doorlopen rekentijd waarbij min of meer de evenwichtssituatie bereikt wordt afhankelijk is van het aantal bodemwarmtewisselaars in elkaars nabijheid.

De evaluatie is gebaseerd op twee effecten:

1. Hoe verhoudt de rekentijd waarbij voor een ontwerp de evenwichtssituatie bereikt wordt zich tot de projectomvang. Dit is met de gebruikelijke ontwerpsoftware bepaald voor de "worst case" situatie van -65 kWh/m/j energieonttrekking en voor een afstand tussen naburige systemen van 7 of 15 meter. Als evenwichtssituatie is de rekentijd genomen waarbij, indien de rekentijd met 10 jaar verlengd wordt, de temperatuurverandering minder is dan 0,5K.
2. Hoe de fout die geïntroduceerd wordt door de benadering van de werkelijke lijnbronnen met de regressievergelijkingen doortelt bij grotere aantallen systemen.

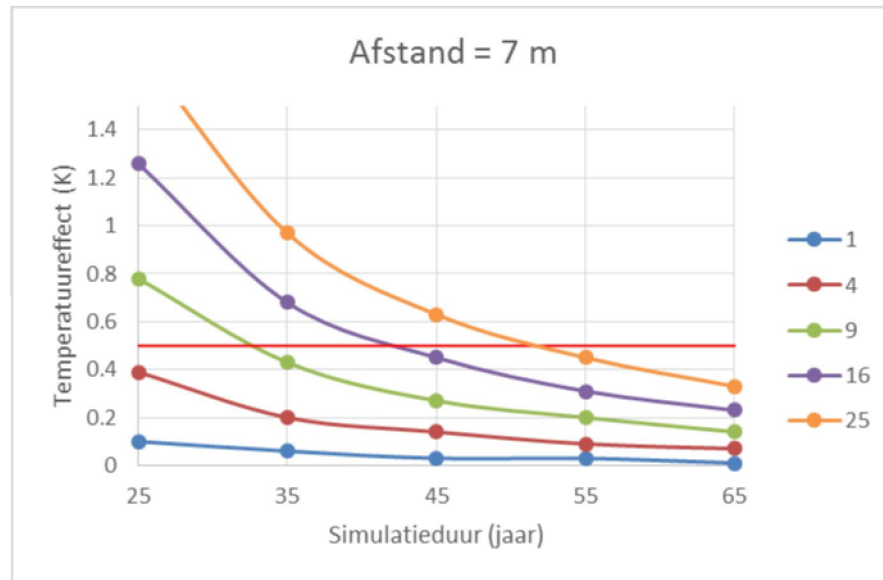
De resultaten van de berekening van de rekentijd als functie van systeemomvang is in figuur 3.1.2 en 3.1.3 gegeven.

Een simulatieduur van 25 jaar lijkt een redelijke waarde voor systemen van kleinere omvang c.q. kleinere aantallen systemen. Bij dichte bebouwing (7 meter tussenafstand) is het effect van systeemomvang duidelijk beperkend, maximaal kunnen circa 10 systemen tezamen ontworpen worden bij een rekenduur van 25 jaar. Neemt het aantal systemen toe tot 25 dan is minimaal een rekentijd van 55 jaar vereist.

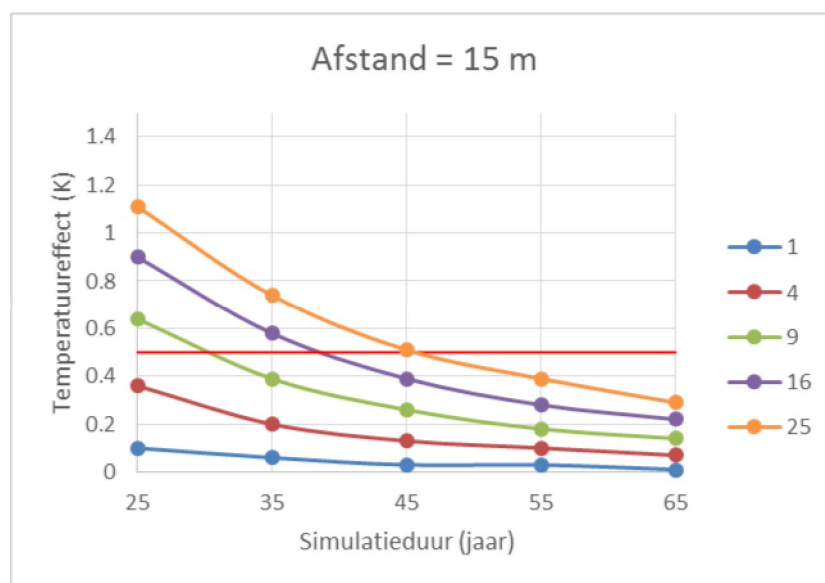
Bij minder dichte bebouwing (15 meter tussenafstand) kunnen meer systemen met een kortere rekenduur ontworpen worden. Toch is, voor 16 systemen, de minimale simulatieduur ongeveer 35 jaar.



Figuur 3.1.2. Effect op ontwerp systeemtemperatuur als functie van rekentijd en systeemomvang (1, 4, 9, 16 en 25 systemen). Afstand tussen systemen: 7 meter.



Figuur 3.1.3. Effect op ontwerp systeemtemperatuur als functie van rekentijd en systeemomvang (1, 4, 9, 16 en 25 systemen). Afstand tussen systemen: 15 meter.



Naast de effecten op ontwerp temperatuur is gekeken naar de effecten van de fout die geïntroduceerd wordt door de vereenvoudingen in de geautomatiseerde tool. De absolute fout in geschatte temperatuur bedraagt  $\pm 0,1K$  en de *root mean square error* (RMSE)  $0,025K$ . Wanneer we als uitgangspunt nemen dat een cumulatief temperatuureffect van  $-1,5K$  wordt geaccepteerd als grenswaarde voor interferentie, dan wordt een fout van 10% bereikt bij een totaal aantal van 15 systemen.

In overleg met de klankbordgroep is besloten om het aantal systemen dat met ITGBES tool geëvalueerd kan worden te beperken tot een maximum van 20 systemen. Dat aantal is iets meer dan op basis van de analyse hierboven, maar dit maakt de tool in de praktijk beter toepasbaar. In een uiterst geval betekent dit dat (na 25 – 30 jaar) het totale effect op de

interferentie niet -1,5K zou zijn maar -1,65K. Waarbij aan te tekenen dat dan alle systemen de "worst case" onttrekking van -65 kWh/m/j moeten hebben.

Op basis van deze evaluatie is besloten dat voor de geautomatiseerde tool met de genoemde beperkingen (maximaal aantal systemen) de rekentijd van 25 jaar niet aangepast hoeft te worden.

### 3.1.7. Evaluatie uitgangspunt voor specifieke warmte-onttrekking: totale lengte of einddiepte van het systeem

In paragraaf 2.2 is ingegaan op de verschillen in geschat temperatuureffect bij toepassen van de lineaire nomogrammen uit versie 2013 van de BUM BE Bijlage 2 en de werkelijke lijnbronoplossingen. Met toepassen van de nomogrammen wordt het temperatuureffect voor gemiddelde afstanden duidelijk overschat. Met name voor kleine systemen (oorspronkelijk uitgangspunten BUM BE Bijlage 2, voor een woning maximaal 2 individuele bodemwarmtewisselaars) werd dit gecompenseerd door te delen door de totale lengte van de bodemwarmtewisselaar en niet door de einddiepte. Delen door de einddiepte is strikt genomen wel een betere benadering van de sterkte van de lijnbron.

De effecten van deze keuze zijn nader in kaart gebracht door voor een tweetal situaties door te rekenen wat de effecten zijn wanneer wordt uitgegaan van de totale lengte of van de einddiepte. Deze resultaten zijn vergeleken met de werkelijke oplossing verkregen door superpositie.

- Een klein systeem bestaande uit twee individuele bodemwarmtewisselaars. Hier wordt berekend wat de temperatuureffecten zijn met een onttrekking van 130 kWh/m/j op het centroïde van het systeem en een onttrekking -65 kWh/m/j op elk van de twee individuele bodemwarmtewisselaars. Ook is het temperatuureffect bij een onttrekking -65 kWh/m/j op de centroïde bepaald.
- Een groter systeem bestaande uit zes individuele bodemwarmtewisselaars. Hier wordt berekend wat de temperatuureffecten zijn met een onttrekking van 130 kWh/m/j op het centroïde van het systeem en een onttrekking -21,7 kWh/m/j op elk van de zes individuele bodemwarmtewisselaars. Ook is het temperatuureffect bij een onttrekking -65 kWh/m/j op de centroïde bepaald.

#### *Analyse twee bodemwarmtewisselaars in een systeem*

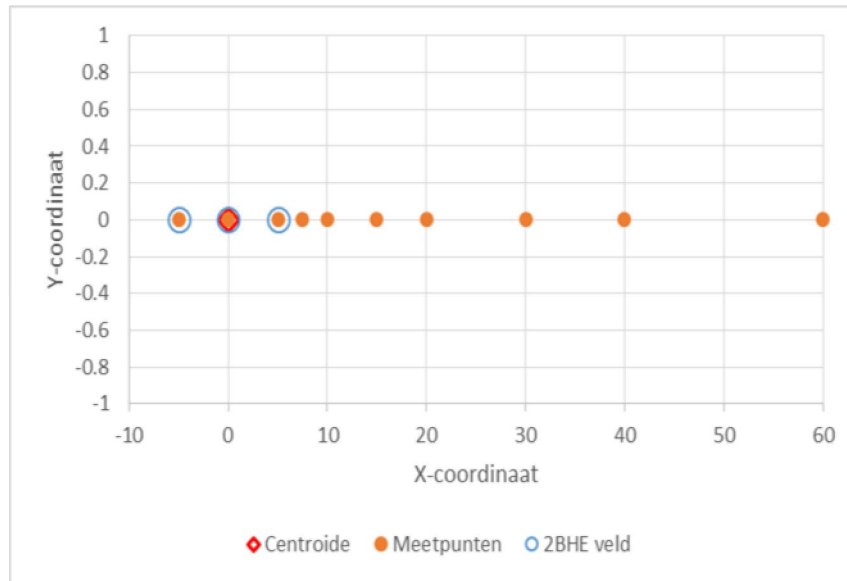
De situatie waar twee individuele bodemwarmtewisselaars (figuur 3.1.4) in een systeem worden benaderd door één centrale lijnbron is weergegeven in figuur 3.1.5a (onttrekking -130 kWh/m/j) en 3.1.5b (onttrekking -65 kWh/m/j). Dit figuur geeft op de afstand "0 meter" een centrale lijnbron weer (met de energie-onttrekking berekend met de einddiepte) en op afstand -5 en + 5 meter. Deze figuren laten zien dat:

- a. Het temperatuureffect in het centrum van het systeem door de centrale lijnbron sterk overschat wordt.
- b. Het temperatuureffect door de centrale lijnbron ter hoogte van de individuele bodemwarmtewisselaars enigszins onderschat wordt.

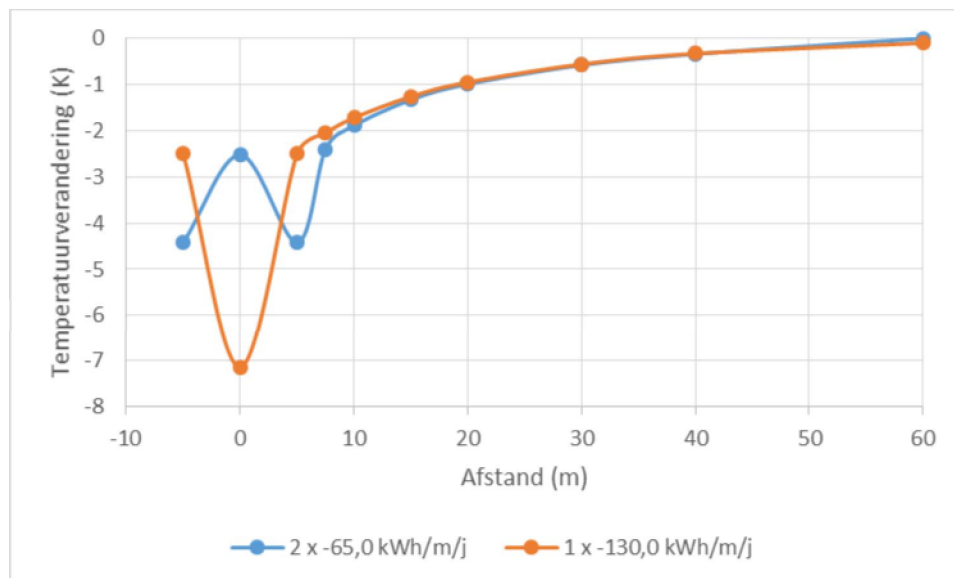
- c. Vanaf 2,5 meter afstand tot de individuele bodemwarmtewisselaars (dus net buiten het systeem) de berekende temperatuurverandering overeenkomen.

Voor het systeem met maximale onttrekking (-130 kWh/m/j) het verschil in berekende temperatuur kleiner is dan 0,2K vanaf 10 meter afstand, voor het systeem met -65 kWh/m/j is het verschil kleiner dan 0,2K vanaf 7,5 meter afstand. Vanaf 15 meter afstand is het verschil kleiner dan 0,1K in beide scenario's.

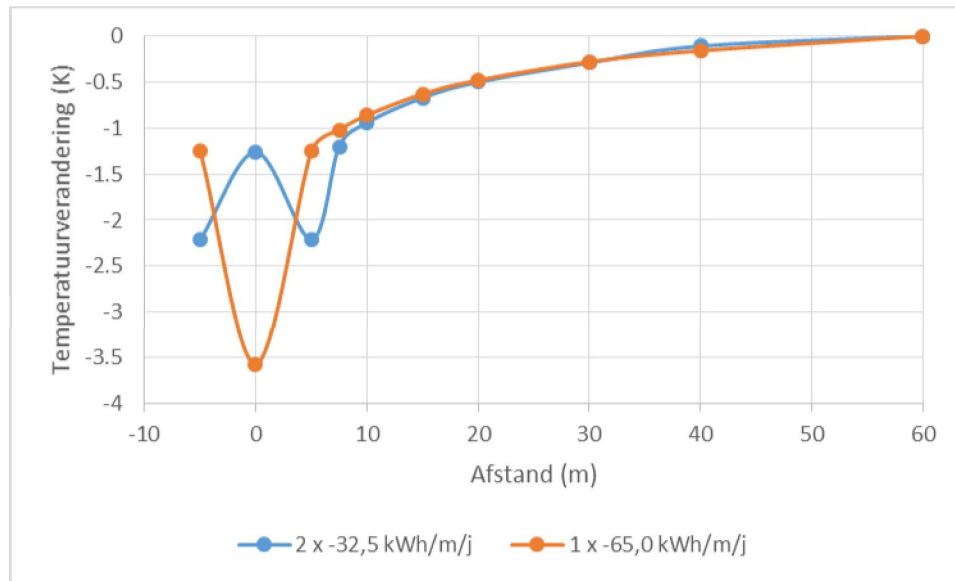
Figuur 3.1.4. Twee individuele bodemwarmtewisselaars) met daarbij de punten waarop de temperatureffecten bepaald zijn.



Figuur 3.1.5a. Temperatuurrespons systeem met -130 kWh/m/j.



Figuur 3.1.5b. Temperatuurrepons systeem met -65 kWh/m/j.



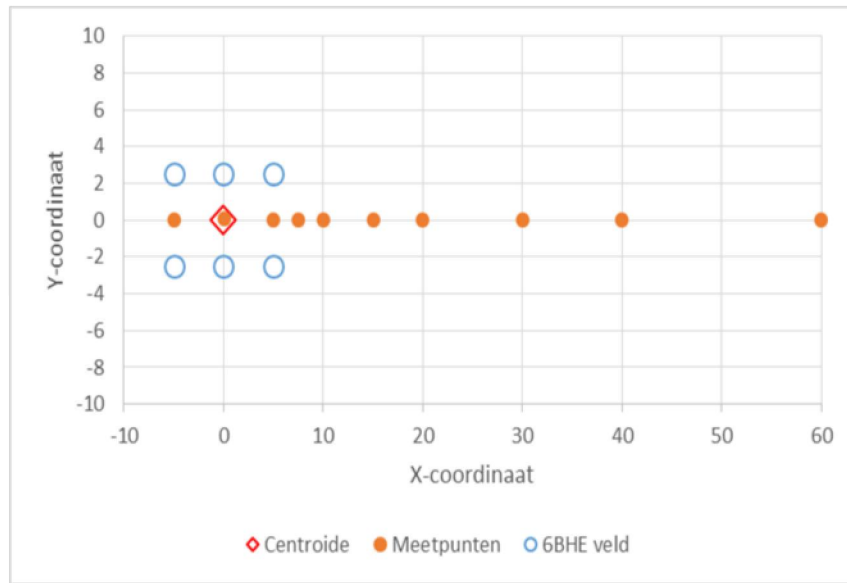
### Analyse zes bodemwarmtewisselaars in een systeem

De situatie waar zes individuele bodemwarmtewisselaars (figuur 3.1.6) in een systeem worden benaderd door één centrale lijnbron is weergegeven in figuur 3.1.7a (onttrekking -130 kWh/m/j) en 3.1.7b (onttrekking -65 kWh/m/j). Deze figuren laten zien dat:

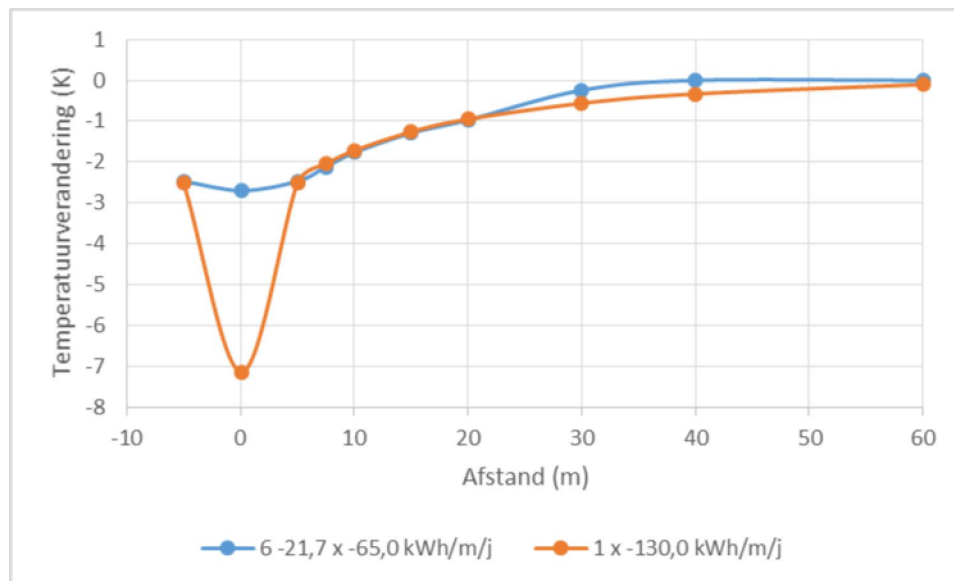
- d. Het temperatuureffect in het centrum van het systeem door de centrale lijnbron sterk overschat wordt.
- e. Het temperatuureffect door de centrale lijnbron ter hoogte van de perifere bodemwarmtewisselaars redelijk overeenkomt.
- f. Op een afstand van 20 – 40 meter wat grotere afwijkingen worden waargenomen.

Voor het systeem met maximale onttrekking (-130 kWh/m/j) het verschil in berekende temperatuur is kleiner dan 0,2K vanaf 60 meter afstand, voor het systeem met -65 kWh/m/j is het verschil kleiner dan 0,2K vanaf 40 meter afstand.

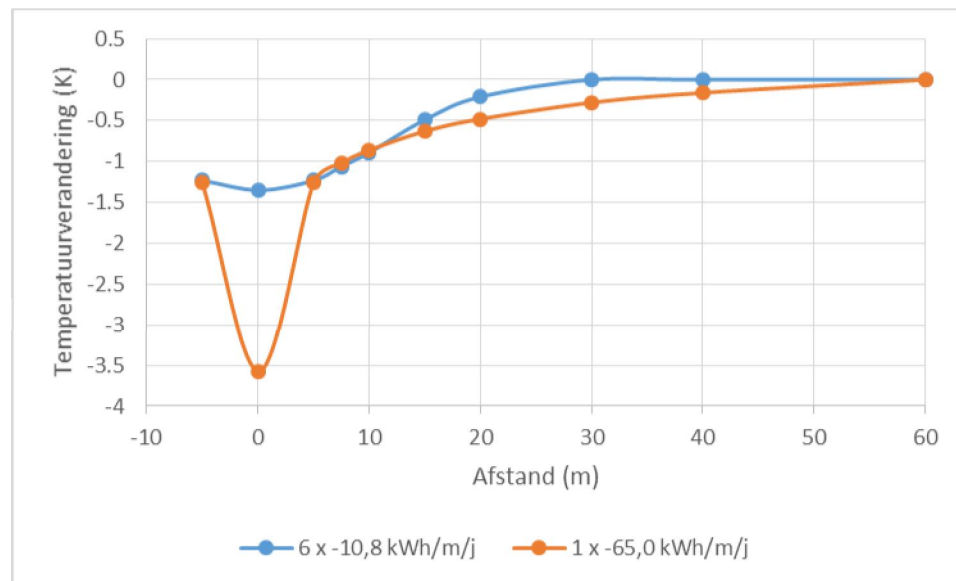
Figuur 3.1.6. Zes individuele bodemwarmtewisselaars) met daarbij de punten waarop de temperatureffecten bepaald zijn.



Figuur 3.1.7a. Temperatuurrespons systeem met -130 kWh/m/j.



Figuur 3.1.7b. Temperatuurrespons systeem met -65 kWh/m/j.



Delen door de einddiepte van het bodemenergiesysteem in plaats van delen door de totale lengte leidt tot nauwkeurigere bepaling van de temperatuureffecten. Daarom is dit in de ITGBES tool gewijzigd ten opzichte van de BUM BE Bijlage 2, waarin de specifieke warmteonttrekking berekend wordt ten opzichte van de totale lengte van het bodemenergiesysteem.

### 3.2. Conclusies verbeteren lineaire nomogrammen en validatie

*revisie 04/05/2020*

De randvoorwaarden in deze paragraaf zijn aangepast aan de situatie met de uitgebreide specifieke energievraag en aan het nieuwe model.

Samenvattend kunnen uit voorgaande paragrafen de volgende conclusies getrokken worden:

- De oorspronkelijke nomogrammen leiden in een aantal gevallen tot een aanzienlijke overschatting van de temperatuureffecten op afstanden van 15 – 75 meter afstand.
- Voor het automatiseren van de BUM BE Bijlage 2 is een andere aanpak ontwikkeld waarbij de werkelijke eindige lijnbron berekeningen door een tweede graads functie benaderd worden. De fout tussen deze benadering en de oorspronkelijke lijnbron resultaten is klein (maximaal 0,15K op een afstand van vijf meter, kleiner dan 0,08K op grotere afstanden).
- Op basis van een analyse van gegevens uit het Landelijk Grondwater Register kan een minder conservatief "worst case" systeem gekozen worden als basis voor de bepaling van de zoekstraal. De zoekstraal kan van 120 meter kan daarbij gehandhaafd worden. Echter, gezien de toename van het aantal grote (collectieve) gesloten bodemenergiesystemen wordt de kans op het missen van systemen waarmee effecten op kunnen treden groter. Daarom is een grotere initiële

zoekstraal voorgesteld (350 meter) gekoppeld met een gewijzigde selectieprocedure.

- Bij gebruik van de ITGBES wordt de specifieke warmteonttrekking en warmtetoevoer berekend aan de hand van de einddiepte van de boring (en niet de totale lengte van het bodemenergiesysteem zoals momenteel wordt voorgeschreven in de BUM BE bijlage 2).
- Hoe groter de energiebalans van een systeem hoe geringer de invloed op de omgeving. Voor systemen binnen één melding kan gekeken worden of het thermische invloedsgebied van een systeem kleiner is dan de afstand tussen systemen. Als dat het geval blijkt, dan kan er geen sprake zijn van negatieve interferentie. Dit zal in de nieuwe procedure bij de ITGBES in de volgende versie van de BUM BE Bijlage 2 worden uitgewerkt.
- Op basis van de analyse van de fouten die optreden door de benadering met 2<sup>e</sup> graads vergelijking, de beperking in ter beschikking staande energiescenario's voor de lijnbronnen met de gehanteerde simulatieduur van 25 jaar en de resultaten van de vergelijking tussen rekenen met werkelijke boorposities of centrale coördinaten zijn de volgende beperkingen aan de methode:
  - Maximaal twintig systemen in de vergelijking met de geautomatiseerde tool.
  - Maximale onttrekking -240 kWh/m/j.
  - Maximaal aantal individuele bodemwarmtewisselaars in één systeem waar met de centrale coördinaat gerekend wordt: zes.

### 3.3. Voorzet selectie en verwerkingsprocedure

Bij het ontwikkelen van de vernieuwde BUM BE Bijlage 2 is in de klankbordgroep uitgebreid gesproken over de te hanteren zoekstraal, het aantal systemen wat in de analyse meegenomen kan worden en over de mogelijkheid (of onmogelijkheid) om grote systemen te analyseren.

De conclusies zijn:

- Op dit moment is het niet mogelijk om grote systemen te analyseren omdat de modelberekeningen die aan de basis staan van de methode daar niet geschikt voor zijn en omdat het niet duidelijk is hoe interferentie op een groot collectief systeem te bepalen (alle individuele bodemwarmtewisselaars in een collectief systeem worden steeds anders beïnvloed).
- Aantal te verwerken systemen in de uiteindelijke tool bedraagt 20.
- Wens tot differentiatie / kleinere zoekstraal. Dat kan alleen als alle systemen door eenzelfde partij worden aangelegd, in andere gevallen niet.
- Er wordt binnen een zoekstraal van 350 meter vastgesteld of er grote collectieve gesloten systemen aanwezig zijn. Indien dat het geval is zal gekeken moeten worden of er in de omgeving van dat grote systeem meerdere systemen aanwezig zijn.
- Er wordt een zoekstraal van 120 meter gehanteerd waarbinnen andere kleine systemen worden geëvalueerd.

Gekoppeld met de grote zoekstraal en met de wens om de inspanning zo klein mogelijk te maken is aanvullend voorgesteld om met de verzamelde gegevens vervolgens te gaan filteren welke systemen werkelijk in een evaluatie meegenomen dienen te worden, als volgt:

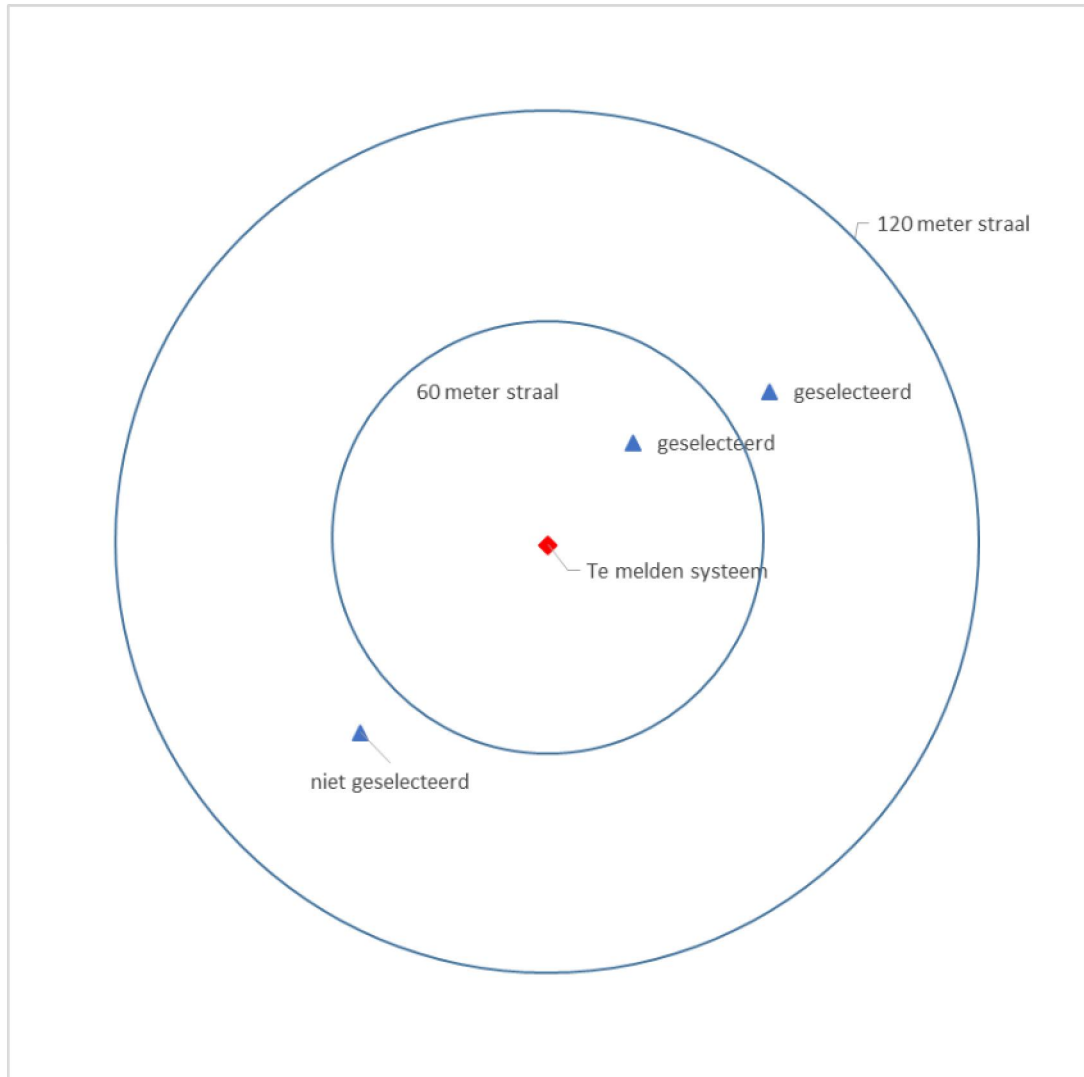
**Bij bevoegd gezag worden alle systemen binnen een zoekstraal van 350 meter opgevraagd. Vervolgens:**

1. Er is een groot collectief bodemenergiesysteem binnen 350 meter van het te melden systeem aanwezig.
  - a. Kijk rondom dit collectieve bodemenergiesysteem (zoekstraal vanuit randen van dit systeem 120 meter) of er andere gesloten bodemenergiesystemen aanwezig zijn. Zijn er geen andere systemen aanwezig: indien het temperatuureffect van het aan te leggen systeem op de rand van het grote systeem kleiner is dan  $-1,5K$  dan is er geen interferentie. Zijn er meerdere gesloten bodemenergiesystemen in de omgeving aanwezig dan moet interferentie met een complexere modelberekening worden beoordeeld.
2. Er is geen groot collectief bodemenergiesysteem in de omgeving aanwezig.
  - a. Selecteer alle systemen binnen een zoekstraal van 45 meter
  - b. Selecteer systemen die binnen 60 meter van die systemen liggen (in deze stap schakel je systemen uit die tussen de 60 en 120 meter van het te melden systeem aanwezig zijn maar waar dan geen andere systemen nabij liggen (zie figuur 3.3.1).
  - c. Reken de thermische interacties uit
  - d. Alternatief: selecteer alle systemen binnen een zoekstraal van 120 meter en reken de thermische interacties uit (d.w.z.: zoals 2013 versie).
3. Gebundelde melding van grotere aantallen systemen, systemen van zelfde aanbieder.
  - a. Toon aan dat bij de uitgangspunten van de ontwerpen van deze systemen de afstand van een maximaal thermische effecten van  $-0,1K$  kleiner is dan de afstand tussen de systemen.

*Voor aanbieders die een hoge energiebalans realiseren treden er geen onderlinge thermische effecten op indien de maximale temperatuurverandering op een naburig systeem kleiner is dan  $-0,1K$ . Dat kan met de tool berekend worden door twee naast elkaar gelegen systemen in te voeren met de afstand tussen die systemen en daarvoor de temperatuureffecten te berekenen.*
  - b. Nadat is aangetoond dat er tussen de systemen onderling geen negatieve effecten optreden wordt bepaald of met omliggende systemen wellicht nog negatieve interferentie op kan treden.
  - c. Indien er mogelijk interferentie tussen de systemen in de melding onderling optreedt wordt aangetoond dat daarvoor in voldoende mate gecompenseerd is in de ontwerpberekening. Hierbij moet duidelijk de ruimtelijke differentiatie tussen perifere en centrale systemen aan de orde komen.



Figuur 3.2.1. Voorbeeld selectie bodemenergiesystemen voor bepalen interferentie, systemen die verder weg liggen dan 60 meter van het te melden systeem worden alleen meegenomen indien er een ander systeem een afstand minder dan 60 meter heeft tot beide systemen.



## 4. Gebruik van de tool

De tool is gebaseerd op een regressieanalyse van de oorspronkelijke modelresultaten. Deze modelresultaten zijn in 2013 ook gebruikt om de lineaire nomogrammen te berekenen maar die nomogrammen en de resultaten van deze geautomatiseerde tool zijn niet vergelijkbaar.

**Treedt een fout op of kom je iets tegen wat niet correct lijkt, omschrijf dan graag de fout en stuur dan s.v.p. het betreffende werkboek met de invoergegevens mee naar [info@sikb.nl](mailto:info@sikb.nl).**

### 4.1. Uitgangspunten en opzet

De uitgangspunten van de ontwikkelde tool voor berekening van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen, ITGBES, zijn als volgt:

- Rekening: 25 jaar
- Maximaal aantal systemen: 20
- Maximaal bodemzijdig vermogen per systeem: 70 kW
- Maximale specifieke warmte-onttrekking: - 240 kW/m/jr
- Maximale aantal bodemwarmtewisselaars in een collectief systeem: 6
- Rekenmethode: vertaling berekeningen lijnbronmethode naar een tweedegraads vergelijking (zie § 2.2 en § 2.3)

De tool is een Excel sheet waarin met Visual Basic modulen berekeningen worden uitgevoerd. Het is ontwikkeld in Excel 2013.

### 4.2. Handleiding gebruik van de ITGBES

Er zijn twee mogelijkheden om gegevens in de tool te bewerken:

1. Met behulp van een invoerformulier, hiermee worden de gegevens per systeem getoond en bewerkt.
2. Op een werkblad waar alle systemen naast elkaar getoond worden en bewerkt kunnen worden.

Bij het openen van het Excel werkblad wordt allereest een welkomtscherm met disclaimer getoond, Door op Akkoord te klikken start de tool op:

Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen



## Interferentie Tool Gesloten Bodem Energiesystemen

De Interferentie Tool gesloten Bodem Energiesystemen is ontwikkeld door Groenholland Geo-energiesystemen in samenwerking met de SIKB in opdracht van Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Disclaimer: De SIKB en Groenholland hebben deze applicatie met de grootste mogelijke zorgvuldigheid samengesteld. Mochten er desondanks fouten of onjuistheden in deze applicatie voorkomen dan kan de SIKB of Groenholland geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor schade die hierdoor zou kunnen ontstaan

versie: d01 - 01-10-2019

**AKKOORD**

### 4.3. Invoerscherm

Rechts onderin is een knop Naar Excel Werkboek: deze functie sluit het scherm af en activeert het Excel werkboek.

Gegevens bewerken

Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK)

Aantal systemen in analyse (max. 20)

**Systeem bewerken**

**Meldingsgegevens systeem**

X-coördinaat (RD)

Y-coördinaat (RD)

Totale lengte van de bodemlussen per gesloten bodemenergiesysteem (m)

Einddiepte van de bodemlussen in meters minus maaiveld (m)

Wat is het bodemzijdig vermogen (kW)

Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh)

Koudevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh)

Energierendement van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem (SPF)

Energierendement koudevraag (forfaitair 20)

**Bereken interferentie** **Wis invoer** **Naar Excel Werkboek**

Bovenin het formulier zijn twee invulvakken:

Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK): de functies om de temperatureffecten te bepalen zijn berekend voor een bodem met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 1,5; 2,0 en 2,5 W/mK. Voor het te melden systeem wordt hier de warmtegeleidingscoëfficiënt ingevoerd, de bijbehorende functies worden gekozen door:

- Ingevoerde warmtegeleidingscoëfficiënt 1,25 – 1,75: bodemtype 1,5 W/mK
- Ingevoerde warmtegeleidingscoëfficiënt 1,75 – 2,25: bodemtype 2,0 W/mK
- Ingevoerde warmtegeleidingscoëfficiënt 2,25 – 2,75: bodemtype 2,5 W/mK

Het tweede invul vak betreft het aantal systemen, maximaal kunnen 20 systemen ingevoerd worden. Wanneer meer systemen worden ingevoerd en vervolgens het aantal systemen wordt verminderd verdwijnen de ingevoerde gegevens niet, maar worden alleen de 1<sup>e</sup> *n* systemen geëvalueerd waarbij *n* het aantal ingevoerde systemen is.

Onder deze twee invoervelden vinden we een veld waarin het huidige systeemnummer getoond wordt met daarnaast een pijltje omhoog en omlaag:

Het systeem wat bewerkt moet worden kan direct worden geselecteerd door het nummer in te typen in het vakje onder systeem bewerken, of door met de pijltjes door de systemen heen te bladeren.

Direct hieronder worden de werkelijke gegevens uit de meldingsformulieren van de bodemenergiesystemen ingevoerd:

Meldingsgegevens systeem	
X-coördinaat (RD)	142209
Y-coördinaat (RD)	412530
Totale lengte van de bodemlussen per gesloten bodemenergiesysteem (m)	170
Einddiepte van de bodemlussen in meters minus maaiveld (m)	85
Wat is het bodemzijdig vermogen (kW)	4
Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh)	10
Koudevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh)	1.5
Energierendement van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem (SPF)	4.2
Energierendement koudevraag (forfaitair 20)	20

- **X-coördinaat, Y-coördinaat:** X- en Y-coördinaat systeem. Voor een correcte berekening van de afstand moeten deze in het Rijksdriehoekstelsel gegeven worden.
- **Totale lengte van de bodemlussen per gesloten bodemenergiesysteem:** de lengte van de bodemlus is maximaal gelijk aan de einddiepte van de boring: in een boring van 100 meter diep zit een leiding omlaag en omhoog (200 meter leiding), maar de "luslengte" is 100 meter!
- **Einddiepte van de bodemlus minus maaiveld:** feitelijk geïnstalleerde diepte van de bodemlus in het boorgat.
- **Wat is het bodemzijdige vermogen:** Het bodemzijdige vermogen van het bodemenergiesysteem (maximaal 70 kW).
- **Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh/jaar):** dit betreft de ruimteverwarming en tapwatervraag.
- **Koudevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh/jaar):** koeling en mogelijke regeneratie die wordt gerealiseerd.
- **Energierendement van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem (SPF):** dit is de SPF zoals die bij de melding wordt opgegeven, dit betreft één totale systeem SPF (opgebouwd uit ruimteverwarming, tapwatervraag en koudelevering).
- **Energierendement koudevraag (forfaitair 20):** dit is de SPF voor koelbedrijf. Deze wordt niet bij een melding opgegeven maar is nodig om de netto energieonttrekking en energietoevoer aan de bodem te bepalen. Voor vrije (passieve) koeling wordt uitgegaan van een forfaitaire waarde van 20.

Onder het deel met de invoervelden zijn een drietal actieknoppen:



Met de knop Bereken interferentie worden de thermische effecten tussen de systemen berekend, hierbij worden enkele controles op de gegevensinvoer gedaan.

Met de knop Wis invoer worden alle ingevoerde gegevens gewist (kan niet ongedaan worden gemaakt)!

Na berekenen van de interferentie wordt een eenvoudige overzichtsrapportage die afgedrukt kan worden getoond. Wanneer deze wordt afgesloten wordt vervolgens het Excel werkboek getoond. Indien men weer op het invoerscherm verder wilt werken dan kan dat door de knop Naar Invoer Scherm.

Met de knop Naar Excel Werkboek wordt naar het Excel werkboek overgeschakeld.

## 4.4. Excel werkboek

**Interferentie Tool gesloten Bodem Energiesystemen**

Waarnegeleidingscoëfficiënt bodem Aantal systemen in analyse (max. 20)		(%Wak)	2.0	Bereken Interferentie	Vak Invoer	Naar Invoer Scherm				
<b>Invoer gegevens: meting</b>										
X-coördinaat (RD)	(RD)	146209	142416	142254	142262	142271	142115	142193	142151	142207
Y-coördinaat (RD)	(RD)	412530	412470	412470	412451	412435	412543	412542	412517	412553
Diepte van de bodemlussen z de diepte van de bodemlussen (dit is het aantal bodemlussen z de diepte van de bodemlussen)	(m)	170.0	105.0	105.0	105.0	105.0	120.0	200.0	200.0	200.0
Diepte van de boring waarin de boring wordt geïnstalleerd	(m)	85.0	105.0	105.0	105.0	105.0	120.0	100.0	200.0	150.0
Wak in het bodemenergie systeem	(%Wak)	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	6.0	8.0	6.0
Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem wordt	(W/m²)opp	10.0	8.4	6.4	6.4	11.0	13.0	16.0	18.0	18.0
Koudtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem wordt	(W/m²)opp	1.5	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	2.0	3.0	1.2
Energieverbruik van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem	(SFP)	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	5.0	6.0	4.0
Energieverbruik bodemloop (formule 20)	(SFP)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
<b>Berekende gegevens</b>										
Netto warmtevraag	(W/m²)opp	7.5	4.6	4.6	4.6	4.6	8.1	10.1	14.7	13.3
Netto koudtevraag	(W/m²)opp	1.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	2.1	3.2	1.3
Netto energievraag bodem	(W/m²)opp	-5.8	-3.3	-3.3	-3.3	-3.3	-7.0	-8.0	-11.5	-12.0
Specifieke energieverbruik	(SFP/m²)opp	-86.3	-43.3	-43.3	-43.3	-43.3	-57.1	-101.0	-73.3	-85.4
Specifieke energieverbruik	(SFP/m²)opp	18.5	12.0	12.0	12.0	12.0	8.8	21.0	15.8	8.4

**Toelichting op de gegevens**

**Totale laaste van de bodemlussen per gesloten bodemenergiesysteem**  
De totale laaste van de bodemlussen is het aantal boringen vermenigvuldigd met de diepte van de in de boring geïnstalleerde lus (warmteboor). Dit is de totale lengte van de bodemlussen.

**Diepte van de bodemlussen in meters minus maar**  
Diepte van de in de boring geïnstalleerde lus (warmteboor). Dit is de totale lengte van de bodemlussen.

**Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem wordt**  
De totale warmtevraag (in W/m²)opp = warmtevraag die door het bodemenergiesysteem aan het bouwwerk wordt.

**Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem wordt**  
De totale koudtevraag die door het bodemenergiesysteem aan het bouwwerk wordt.

**Energieverbruik van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem**  
Totale jaarlijkse rendement (SFP) conform afgedrukte tabel.

In de tool worden vier werkbladen gebruikt:

### 1. PROJECTGEGEVENS

In dit werkblad worden de basisgegevens van het te melden systeem (of systemen) en de al in de omgeving aanwezige systemen ingevoerd. De selectie van welke systemen in de berekening meegenomen dienen te worden is niet met dit werkblad geïntegreerd, deze selectie moet apart gedaan worden.

### 2. AFSTANDEN

Op het werkblad "AFSTANDEN" worden de berekende afstanden tussen de systemen gegeven. Dit blad wordt gevuld wanneer op de knop "Bereken interferentie" wordt geklikt.

### 3. TEFFECT

Op het werkblad "TEFFECT" worden de berekende temperatureffecten tussen de systemen gegeven. Dit blad wordt gevuld wanneer op de knop "Bereken interferentie" wordt geklikt.

### 4. Rapportage

Overzicht van de gegevensinvoer, berekende afstanden tussen systemen en berekende temperatureffecten. Deze worden getoond als eenvoudige rapportage nadat interferentie berekend is.

## 4.5. Projectgegevens, gegevensinvoer

Bovenin het formulier zijn twee invulvakken:

Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK): de functies om de temperatureffecten te bepalen zijn berekend voor een bodem met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 1,5; 2,0 en 2,5 W/mK. Voor het te melden systeem wordt hier de warmtegeleidingscoëfficiënt ingevoerd, de bijbehorende functies worden gekozen door:

- Ingevoerde warmtegeleidingscoëfficiënt 1,25 – 1,75: bodemtype 1,5 W/mK
- Ingevoerde warmtegeleidingscoëfficiënt 1,75 – 2,25: bodemtype 2,0 W/mK
- Ingevoerde warmtegeleidingscoëfficiënt 2,25 – 2,75: bodemtype 2,5 W/mK

Het tweede invul vak betreft het aantal systemen, maximaal kunnen 20 systemen ingevoerd worden. Wanneer meer systemen worden ingevoerd en vervolgens het aantal systemen wordt verminderd verdwijnen de ingevoerde gegevens niet, maar worden alleen de 1<sup>e</sup>  $n$  systemen geëvalueerd waarbij  $n$  het aantal ingevoerde systemen is.

Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem Aantal systemen in analyse (max. 20)	(W/mK) (n)	2,0 9	Bereken interferentie				Wis invoer			Naar Invoer Scherm	
Invoer gegevens melding		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
X-coördinaat	(RD)	142209	142246	142254	142262	142271	142175	142189	142161	142207	
Y-coördinaat	(RD)	412530	412478	412478	412481	412485	412545	412542	412517	412553	
Totale lengte van de bodemlussen per gesloten bodemenergiesysteem (dit is het aantal bodemlussen x de einddiepte van de bodemlussen)	(m)	170.0	105.0	105.0	105.0	105.0	120.0	200.0	200.0	300.0	
Einddiepte van de bodemlussen in meters minus maaiveld (dit is de einddiepte van de boring waarin de lus is geïnstalleerd)	(m)	85.0	105.0	105.0	105.0	105.0	120.0	100.0	200.0	150.0	
Wat is het bodemzijdige vermogen	kW	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	6.0	8.0	6.0	
Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet	(MWh/jaar)	10.0	6.4	6.4	6.4	6.4	11.0	13.0	18.0	18.0	
Koudevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet	(MWh/jaar)	1.5	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	2.0	3.0	1.2	
Energierendement van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem	(SPF)	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	5.0	6.0	4.0	
Energierendement koudevraag (forfaitair 20)	(SPF)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	

Hiernaast zijn er drie actieknoppen:

Met de knop Bereken interferentie worden de thermische effecten tussen de systemen berekend, hierbij worden enkele controles op de gegevensinvoer gedaan.

Na berekenen van de interferentie wordt een eenvoudige overzichtsrapportage die afgedrukt kan worden getoond. Wanneer deze wordt afgesloten wordt vervolgens het Excel werkboek getoond. Indien men weer op het invoerscherm verder wilt werken dan kan dat door de knop Naar Invoer Scherm.

Met de knop Wis invoer worden alle ingevoerde gegevens gewist (kan niet ongedaan worden gemaakt)!

Met de knop Naar Invoer Scherm wordt naar het invoerformulier overgeschakeld.

De in te voeren gegevens zijn:

- **X-coördinaat, Y-coördinaat:** X- en Y-coördinaat systeem. Voor een correcte berekening van de afstand moeten deze in het Rijksdriehoekstelsel gegeven worden.
- **Totale lengte van de bodemlussen per gesloten bodemenergiesysteem:** de lengte van de bodemlus is maximaal gelijk aan de einddiepte van de boring: in een boring van 100 meter diep zit een leiding omlaag en omhoog (200 meter leiding), maar de "luslengte" is 100 meter!
- **Einddiepte van de bodemlussen in meters minus maaiveld:** feitelijk geïnstalleerde diepte van de bodemlus in het boorgat.

*In de oorspronkelijke BUM/HUM werd gedeeld door de totale lengte. Voor kleine systemen was dit zo gekozen vanwege eenvoud en omdat er vanuit is gegaan dat, in principe, bij kleine systemen nagenoeg altijd om een enkele bodemwarmtewisselaar zou gaan. Na evaluatie van de gemelde systemen in het LGR en van de verbeterde rekenmethode wordt in de geautomatiseerde versie door de einddiepte gedeeld aangezien daarmee de effecten beter bepaald worden.*

- **Wat is het bodemzijdige vermogen:** Het bodemzijdige vermogen van het bodemenergiesysteem (maximaal 70 kW).
- **Warmtevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh/jaar):** dit betreft de ruimteverwarming en tapwatervraag.
- **Koudevraag van het bouwwerk waarin het bodemenergiesysteem voorziet (MWh/jaar):** koeling en mogelijke regeneratie die wordt gerealiseerd.
- **Energierendement van het ontwerp van het gesloten bodemenergiesysteem (SPF):** dit is de SPF zoals die bij de melding wordt opgegeven, dit betreft één totale systeem SPF (opgebouwd uit ruimteverwarming, tapwatervraag en koudelevering).
- **Energierendement koudevraag (forfaitair 20):** dit is de SPF voor koelbedrijf. Deze wordt niet bij een melding opgegeven maar is nodig om de netto energieonttrekking en energietoevoer aan de bodem te bepalen. Voor vrije (passieve) koeling wordt uitgegaan van een forfaitaire waarde van 20.

Op de gegevens die ingevoerd worden wordt door de tool een automatische controle uitgevoerd, de volgende criteria voor die controle zijn:

- x-coördinaten in Nederland: -7000 to 300000
- y-coördinaten in Nederland: 289000 to 629000
- Lengte "lus" (einddiepte boring): 20 tot 500 meter
- Totale lengte moet kloppen met opgegeven einddiepte: geheel getal (aantal \* lengte)
- Maximale aantal bodemwarmtewisselaars in collectief systeem niet groter dan zes (total lengte / einddiepte <= 6)
- Vermogen warmtepomp ondergronds 0 – 70 kW
- Verwarmingsvraag >= 0 MWh
- Koudevraag >= 0 MWh
- SPF > 2.5



- Afstanden (beperking data) < 140 meter
- Specifieke warmte/koudevraag < 240 kWh/m/j

#### 4.6. Berekening interferentie

Met de ingevoerde gegevens worden de netto energievraag aan de en de netto specifieke energieonttrekking (kWh/m/j) en warmtetoevoer (kWh/m/j) berekend, analoog aan de BUM BE Bijlage 2.

Berekende gegevens										
Netto warmtevraag	(MWh/jaar)	7.3	4.6	4.6	4.6	4.6	8.1	10.1	14.7	13.3
Netto koudevraag	(MWh/jaar)	1.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	2.1	3.2	1.3
Netto energievraag bodem	(MWh/jaar)	-5.8	-3.3	-3.3	-3.3	-3.3	-7.0	-8.0	-11.5	-12.0
Specifieke energieonttrekking	(kWh/m/jaar)	-86.3	-43.9	-43.9	-43.9	-43.9	-67.1	-101.0	-73.3	-88.4
Specifieke energietoevoer	(kWh/m/jaar)	18.5	12.0	12.0	12.0	12.0	8.8	21.0	15.8	8.4

Wanneer de gegevens compleet zijn ingevoerd kan de interferentie worden bepaald door op de knop "bereken interferentie" te klikken.

Er wordt dan een laatste controle op de gegevens uitgevoerd en vervolgens wordt een afstandstabel en een tabel met de temperatuurinteracties berekend.

Na berekenen van de interferentie wordt een eenvoudige overzichtsrapportage die afgedrukt kan worden getoond. Wanneer deze wordt afgesloten wordt vervolgens het Excel werkboek getoond. Indien men weer op het invoerscherm verder wilt werken dan kan dat door de knop Naar Invoer Scherm.

De afstanden en tabel met berekende temperatuureffecten kunnen ook uit de betreffende werkbladen gekopieerd worden om in een eigen rapportage op te nemen.

Afstanden tussen de systemen (m)												
			Systeem	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X-coördinaat			142209.0	142246.0	142254.0	142262.0	142271.0	142175.0	142189.0	142161.0	142207.0	
Y-coördinaat			412530.0	412478.0	412478.0	412481.0	412485.0	412545.0	412542.0	412517.0	412553.0	
Systeem	X-coördinaat	Y-coördinaat										
1	142209.0	412530.0	0.0	63.8	68.8	72.2	76.6	37.2	23.3	49.7	23.1	
2	142246.0	412478.0	63.8	0.0	8.0	16.3	26.0	97.6	85.7	93.5	84.5	
3	142254.0	412478.0	68.8	8.0	0.0	8.5	18.4	103.6	91.2	100.8	88.5	
4	142262.0	412481.0	72.2	16.3	8.5	0.0	9.8	108.0	95.1	107.2	90.6	
5	142271.0	412485.0	76.6	26.0	18.4	9.8	0.0	113.2	99.9	114.6	93.4	
6	142175.0	412545.0	37.2	97.6	103.6	108.0	113.2	0.0	14.3	31.3	33.0	
7	142189.0	412542.0	23.3	85.7	91.2	95.1	99.9	14.3	0.0	37.5	21.1	
8	142161.0	412517.0	49.7	93.5	100.8	107.2	114.6	31.3	37.5	0.0	58.4	
9	142207.0	412553.0	23.1	84.5	88.5	90.6	93.4	33.0	21.1	58.4	0.0	

T-effecten									
Systeem	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		-0.07	-0.06	-0.05	-0.04	-0.21	-0.38	-0.13	-0.38
2	-0.03		-0.43	-0.25	-0.16	0.00	-0.01	0.00	-0.01
3	-0.03	-0.43		-0.41	-0.23	0.00	0.00	0.00	-0.01
4	-0.02	-0.25	-0.41		-0.37	0.00	0.00	0.00	0.00
5	-0.02	-0.16	-0.23	-0.37		0.00	0.00	0.00	0.00
6	-0.18	0.00	0.00	0.00	0.00		-0.52	-0.23	-0.21
7	-0.45	-0.02	-0.01	0.00	0.00	-0.71		-0.25	-0.50
8	-0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.23	-0.18		-0.08
9	-0.45	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	-0.29	-0.50	-0.10	
Totaal temperatuureffect op systeem	-1.28	-0.96	-1.15	-1.10	-0.80	-1.44	-1.58	-0.71	-1.19

## REFERENTIES

Al-Khoury, R., 2011: Computational modelling of Shallow Geothermal Systems. Multiphysics Modeling volume 4, CRC Press.

Buro38, Evaluatie Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen. Rapport 16\_03, 5 september 2016. <https://www.bodemplus.nl/actueel/nieuwsberichten/2016/evaluatie-0/>

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.

Diersch, Hans-Jörg G., *FEFLOW – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*, Springer, 2014, Berlin Heidelberg, XXXV, 996p., [ISBN 978-3-642-38738-8](#), [ISBN 978-3-642-38739-5](#) (eBook), doi:10.1007/978-3-642-38739-5.

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.

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.

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.

SIKB, 2014: Methode toetsen interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen. Bijlage 2 bij de BUM's en HUM's bodemenergiesystemen. Versie 2.3, 11-12-2014.

Trefry, M.G.; Muffels, C. (2007). "FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool". Ground Water. 45 (5): 525–528. doi:10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x.

Witte, H.J.L. (2011). Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen. Rapport GHNL 011103, Ministerie I&M. [https://www.sikb.nl/doc/Bodemenergie/PRJ%20175%20GroenHolland%20onderzoek%20interferentie\\_gesloten%20systemen%20tot%2070kW.pdf](https://www.sikb.nl/doc/Bodemenergie/PRJ%20175%20GroenHolland%20onderzoek%20interferentie_gesloten%20systemen%20tot%2070kW.pdf)

## **Bijlage I: Verantwoording**

De ontwikkeling van de geautomatiseerde tool is ondersteund door een klankbordgroep bestaande uit:

Jan Frank Mars – Bodem+ (opdrachtgever)

Annelies de Graaf – SIKB (coördinatie)

Alexander Obermeijer – RUD Utrecht

Charles Geelen – DHPA

Hein Bergmans – Bergmans Bergeijk

Hester van der Koot – Nathan

Ine Flinkers – Gemeente s'Hertogenbosch

Karin Overtoom – Omgevingsdienst IJmond

Leon van Bohemen – ITHO

Marijn Beekman – Techneco

Martin Bloemendal – KWR Water

Peter Kouwenhoven – Ministerie I&W

Reinder Jan van der Meulen – Omgevingsdienst Haaglanden

Rienko Akker – Remon

Rik Molenaar – Techniplan

Ronald Cornelisse – Omgevingsdienst West Brabant

Ronald Wennekes – IF Technology

Welmoed Broekema – DCMR