

Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen Grenswaarden voor grondwaterstroming

Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen Grenswaarden voor grondwaterstroming



Projectnummer : 201080
Uitgebracht aan : SIKB
Kenmerk : Definitief, revisie 02
Datum : 09/08/2022

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	2
1.1.	Herijking grenswaarden grondwaterstroming.....	3
2.	Methoden	4
2.1.	Modelopbouw en hydro-thermische parameterisatie	4
2.2.	Vergelijking simulatiemodel HST3D en FEFLOW.....	6
2.3.	Procedure bepalen effecten grondwaterstroming	6
2.3.1.	Bepalen temperatueffecten op afstand	7
3.	Validatie en gevoeligheid.....	8
3.1.	Validatie	8
3.2.	Gevoeligheidsanalyse.....	8
3.2.1.	Gevoeligheid achtergrondtemperatuur.....	9
3.3.	Gevoeligheid simulatieduur	10
3.4.	Gevoeligheid dieptetraject grondwaterstroming	12
3.5.	Gevoeligheid warmtegeleidingscoëfficiënt	14
3.6.	Gevoeligheid warmtecapaciteit	17
4.	Resultaten grondwatereffecten op afstand.....	19
4.1.	Simulaties enkele bodemwarmtewisselaar	19
4.1.1.	Effecten stromingsrichting	20
4.1.2.	Resultaten enkele bodemwarmtewisselaar	21
4.2.	Resultaten voor scenario's met meerdere bodemwarmtewisselaars.....	26
5.	Positieve grondwatereffecten op de eigen wisselaar.....	30
6.	Bepalen grenswaarde grondwaterstroming	31
6.1.	Toetstabel	31
6.1.1.	Grenswaarden grondwaterstroming, toepasbaarheid ITGBES.....	32
6.2.	Disclaimer.....	34
7.	Samenvatting en Conclusies	35
	Referenties.....	37
	Bijlage I: Verantwoording	38
	Bijlage II Bepalen grondwaterstroming op projectlocatie	39
	Bepalen horizontale doorlatendheid	39
	Bepalen stijghoogtegradiënt.....	41

Bijlage III Beoordelen ligging systemen ten opzichte van grondwaterstromingsrichting.....	43
Bijlage IV Validaties FEFLOW	44
Vergelijking FEFLOW en HST3D	44
Vergelijking met Earth energy Designer	45



1. Inleiding

Eén van de uitgangspunten van het wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen (Staatscourant 112, 25 maart 2013) is dat, bij een toenemend gebruik van de ondergrond voor warmte- en koudevoorziening, 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 van een warmtepompsysteem (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 2011 is een methode ontwikkeld waarmee deze temperatuureffecten die tussen gesloten bodemenergiesystemen kunnen optreden op eenvoudige wijze 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. In 2020 is de oorspronkelijke versie van de BUM BE Bijlage 2 geactualiseerd en is een geautomatiseerde tool (ITGBES) voor het bepalen van interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen ontwikkeld (Groenholland 2020, rapport GHNL180760 ITGBES, Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen).

Bij het berekenen van temperatuureffecten in gesloten bodemenergiesystemen (bij ontwerp of bij het bepalen van onderlinge temperatuureffecten) wordt aangenomen dat transport van energie alleen plaatsvindt door warmtegeleiding. Effecten van massatransport door grondwaterstroming worden verondersteld zo gering te zijn dat zij verwaarloosd mogen worden. Grondwaterstroming kan echter een aanzienlijk effect hebben op de temperatuurontwikkeling rond een bodemwarmtewisselaar, waarbij benedenstrooms gelegen systemen een groter (cumulatief) effect kunnen ondervinden door verplaatsing van het grondwaterlichaam waarvan de temperatuur veranderd is. De met ITGBES bepaalde temperatuureffecten zijn dan wellicht niet meer in alle gevallen conservatief (veilig). Vastgesteld moet dan worden tot welke mate van grondwaterstroming de methoden die hiervoor genoemde methoden, gebaseerd zijn op warmtegeleiding, toegepast mogen worden.

In 2011 is een gevoeligheidsanalyse voor een "worst case" scenario uitgevoerd. Daarmee zijn grenswaarden voor grondwaterstroming vastgesteld waarbinnen de vereenvoudigde methode toegepast kon worden. Binnen de grenswaarde wijkt de met de interferentietool bepaalde temperatuureffect niet te veel af van het temperatuureffect met grondwaterstroming. Die grenswaarden zijn in 2011 berekend voor een "worst case" scenario met verschillende energiebalans en voor bodemwarmtewisselaars die relatief meer of minder lengte in de watervoerende lagen hebben staan.

1.1. Herijking grenswaarden grondwaterstroming

Aansluitend op de actualisatie van de methode om interferentie te bepalen is een nieuwe analyse gemaakt van grenswaarden voor grondwaterstroming waarbij ITGBES nog kan worden toegepast zonder dat onderschatting van de temperatuuffecten optreedt. De resultaten van die analyse worden in dit rapport beschreven.

Bij de analyse van de effecten van grondwaterstroming zijn de volgende aspecten van betrokken:

- Toepassen van een nieuw geavanceerd numeriek model (FEFLOW) waarmee bodemwarmtewisselaars expliciet kunnen worden gemodelleerd. Hierdoor worden de effecten van grondwaterstroming realistischer benaderd.
- Actualisatie van de gekozen "worst case" op basis van de evaluatie van gegevens uitgevoerd bij het ontwikkelen van ITGBES (rapport GHNL180760).
- Naast het berekenen van effecten in een "worst case" energyscenario is ook het beschouwen van andere cases relevant. Hiermee wordt een betere differentiatie van grenswaarden beoogd waarmee duidelijker inzichtelijk wordt wanneer de ITGBES-methode gebruikt kan worden en wanneer er een complex grondwatermodel opgezet dient te worden.
- Heroverweging van het toe te passen temperatuurcriterium, waarbij het eenvoudige interferentiemodel (ITGBES) niet meer toepasbaar is omdat de effecten van grondwaterstroming te groot zijn.
- Uitbreiden van de analyse van één enkele verticale bodemwarmtewisselaar naar scenario's met drie en met zes bodemwarmtewisselaars.
- Uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse voor geselecteerde thermische bodemparameters:
 - Effect van warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (1,5 ; 2,0 ; 2,5 W/mK)
 - Effect van warmtecapaciteit bodem (2,25 ; 2,5 ; 2,75 MJ/m³K)

2. Methoden

De effecten van grondwaterstroming op de temperatuurverandering rond een bodemwarmtewisselaar zijn bepaald voor de *Darcy grondwaterstromingsnelheid*, welke de totale hoeveelheid water die per tijdseenheid door een oppervlak stroomt geeft. De *effectieve* grondwaterstromingsnelheid is een maat voor de verplaatsing (afstand) van een grondwaterdeeltje en wordt verkregen door de Darcy grondwaterstroming te delen door de porositeit. De vraagstelling gaat over het effect van grondwaterstroming op de temperatuurgradiënt rond een actieve bodemwarmtewisselaar. Dit wordt vooral bepaald door het verschil in temperatuur tussen het grondwater en de bodemwarmtewisselaar en het totale volume (of massa) die langs stroomt. Aangezien Darcy een maat is voor dat totale stroomvolume en daarmee voor de potentiële energieverplaatsing, is voor de Darcy gekozen. Daarbij zal de porositeit in watervoerende lagen binnen de Nederlandse ondergrond geen grote verschillen hebben (globaal varieert deze tussen 0,20 en 0,35).

De Darcy grondwaterstroomsnelheid wordt gegeven door:

$$q_{darcy} = \frac{\Delta h}{\Delta L} * K$$

Waar:

q_{darcy} : Darcy stromingsnelheid (m/jaar)

K : Hydraulische doorlatendheid (m/jaar)

Δh : Stijghoogteverschil tussen twee punten (m)

ΔL : Afstand tussen twee punten met stijghoogteverschil Δh (m)

De Darcy stromingsnelheid hangt af van de doorlatendheid van de bodem en van de grondwatergradiënt ($\Delta h/\Delta L$). Om voor verschillende Darcy stromingsnelheden de effecten te bepalen is in de berekening de grondwatergradiënt aangepast en is de doorlatendheid constant gehouden (de resultaten zijn bij beide mogelijkheden gelijk).

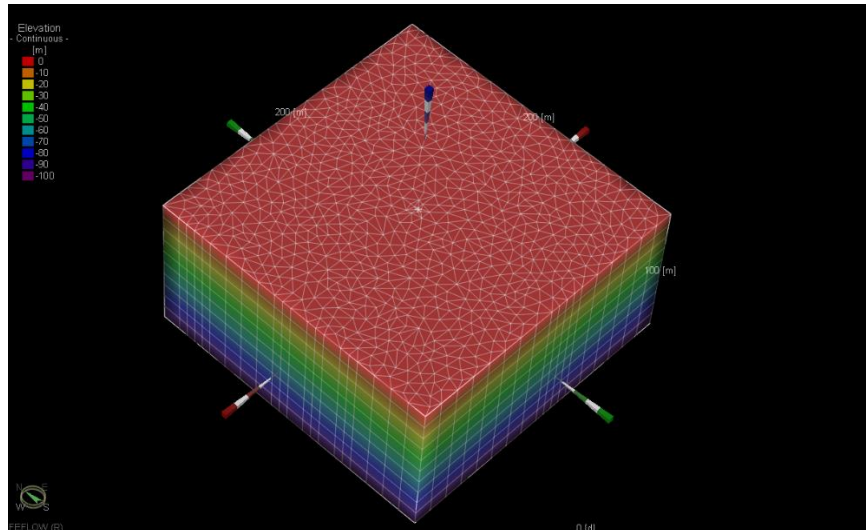
De temperatureffecten in de diverse scenario's zijn bepaald, door het verschil te berekenen tussen de situatie zonder grondwaterstroming (grondwatergradiënt 0 m/m), en de situaties met een bepaalde Darcy grondwaterstroming die beperkt is tot een bepaalde lengte (0 – 100% in stappen van 20% lengte) van de bodemwarmtewisselaar.

2.1. Modelopbouw en hydro-thermische parameterisatie

De berekeningen zijn uitgevoerd met het programma FEFLOW (*Finite Element subsurface FLOW system*. Diersch, 2014). FEFLOW is een geavanceerd model voor het simuleren van grondwaterstroming, massa transport en warmtetransport in poreuze media in drie dimensies. FEFLOW beschikt tevens over een gedetailleerd bodemwarmtewisselaar element, waardoor het op dit moment het enige model is waarmee gesloten bodemenergiesystemen onder grondwaterstroming expliciet gemodelleerd kunnen worden.

Voor de simulaties met één bodemwarmtewisselaar is een modelnetwerk (Figuur 1) opgebouwd van 200 * 200 * 100 meter (X * Y * Z). In de Z-dimensie zijn tien lagen gedefinieerd waarmee de verticale component van de bodemwarmtewisselaar voldoende wordt gedetailleerd.

Figuur 1. Modelnetwerk simulaties met één bodemwarmtewisselaar. Dimensies X 200, Y 200 en Z 100 meter.



De Darcy grondwaterstroming wordt bepaald door de combinatie van hydraulische doorlatendheid en grondwatergradiënt. Door een combinatie van doorlatendheid en grondwatergradiënt te kiezen kan elke Darcy grondwaterstroming gesimuleerd worden, de specifieke individuele waarden voor deze parameters maken dan niet uit. In het model is een horizontale doorlatendheid gekozen van 20 m/d (algemeen representatief voor watervoerende pakketten) en een verticale doorlatendheid van 0,2 m/d. Porositeit is op 35% gesteld.

Voor de simulaties is uitgegaan van een warmtecapaciteit van 1,6 MJ/m³K voor de vaste delen, en 4,2 MJ/m³K voor grondwater (gemiddeld 2,5 MJ/m³K bij 35% porositeit in een verzadigde zone). Voor de warmtegeleidingscoëfficiënt is in de meeste berekeningen uitgegaan van 2,75 W/mK voor de vaste bodemdelen en 0,6 W/mK voor grondwater (gemiddeld 2,0 W/mK bij een porositeit van 35%). Aanvullend zijn berekeningen gedaan met een gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënten van 1,5 W/mK en 2,5 W/mK. Deze berekeningen dienen om te bepalen wat de invloed is van de variatie van deze parameter, aangezien deze significant kan verschillen in de Nederlandse ondergrond afhankelijk van de locatie.

De bodemwarmtewisselaar is gedefinieerd als een standaard enkele U-lus warmtewisselaar tot 100 m -mv. Boorgatdiameter is 0,16 m; leidingdiameter is 0,032 m SDR 11; afstand tussen op- en neergaande been 0,07 m. De methode voor het berekenen van de boorgatweerstand in het model is Quasi-evenwicht (Eskilson en Claesson 1988), met vaste weerstandstermen (Hällström coëfficiënten, Hällström 1991) boorgatweerstand 0,11 K/(W/m) en interne boorgatweerstand 0,39 K/(W/m). De totale effectieve boorgatweerstand bedraagt 0,11 K/(W/m).

2.2. Vergelijking simulatiemodel HST3D en FEFLOW

In het onderzoek van 2011 is het model HST3D (Kipp, 1986) toegepast. In het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van een nieuw (geavanceerder) thermo-hydrologisch model met geïntegreerde bodemwarmtewisselaarmodule (FEFLOW, Diersch 2014). Vergelijken we de resultaten van het oorspronkelijke model met het nieuwe model voor het oorspronkelijke worst-case scenario dan blijkt de temperatuurverlaging in de bodemwarmtewisselaar in de FEFLOW-modellen veel gevoeliger te zijn voor grondwaterstroming dan in de HST3D modellen. Het maximale verschil bedraagt ± 1 K voor de situatie zonder, en ± 3 K voor de situatie met grondwaterstroming.

2.3. Procedure bepalen effecten grondwaterstroming

Om de effecten van grondwaterstroming op een bodemwarmtewisselaar te bepalen is in het oorspronkelijke rapport gekeken naar de temperatuurverandering op de locatie van de bodemwarmtewisselaar zelf, waar de grootste temperatuureffecten verwacht worden. Wat bepaald moet worden is of die procedure ook voldoende gevoelig is om meer differentiatie te krijgen van de grenswaarden met betrekking tot energievraagpatronen en andere parameters (een van de doelen van de herijking).

Bij evaluatie van een eerste reeks uitgevoerde simulaties binnen het huidige onderzoek op basis van de FEFLOW-modellen bleek bij nagenoeg alle verschillende modelscenario's een significant effect van grondwaterstroming op de temperatuur van de bodemwarmtewisselaar zelf. Dan is het niet mogelijk om beter naar energievraag (totale energievraag en balans in warmte- en koudevraag) te gaan differentiëren.

De uitkomsten van de invloed van grondwaterstroming berekend met de eerste FEFLOW modellen lieten zien dat het effect van de energiebalans relatief gering is op de berekende temperatuurverlagingen, doordat de warmteonttrekking in de winter de dominante factor is. Zelfs bij aanzienlijke regeneratie in de zomer blijft de energieonttrekking in de winter de bepalende factor. Met een dergelijke modelopzet kan dus slecht gedifferentieerd worden tussen de systemen met geen of hoge energiebalans voor wat betreft de toepasbaarheid in ITGBES.

Door grondwaterstroming wordt het afgekoelde grondwatervolume stroomafwaarts verplaatst, waarbij demping van de temperatuurverandering optreedt door diffusie en door de warmtecapaciteit van de minerale delen. Bij een hoge mate van energiebalans wordt in de zomer de temperatuur in de bodem verhoogd en in de winter verlaagd. De verhoogde en verlaagde grondwatertemperaturen zullen onder invloed van diffusie en grondwaterstroming op afstand vermengen, waarbij effecten kunnen uitdempen.

De temperatuurverandering op afstand is dan afhankelijk van hoeveelheid warmteonttrekking, de mate van warmtetoevoer en de mate van vermenging die optreedt. Een procedure waarbij er gekeken wordt naar deze temperatuureffecten stroomafwaarts (op afstand) van een bodemwarmtewisselaar lijkt daarom meer geschikt om de doelen van het huidige onderzoek te halen.

2.3.1. Bepalen temperatuureffecten op afstand

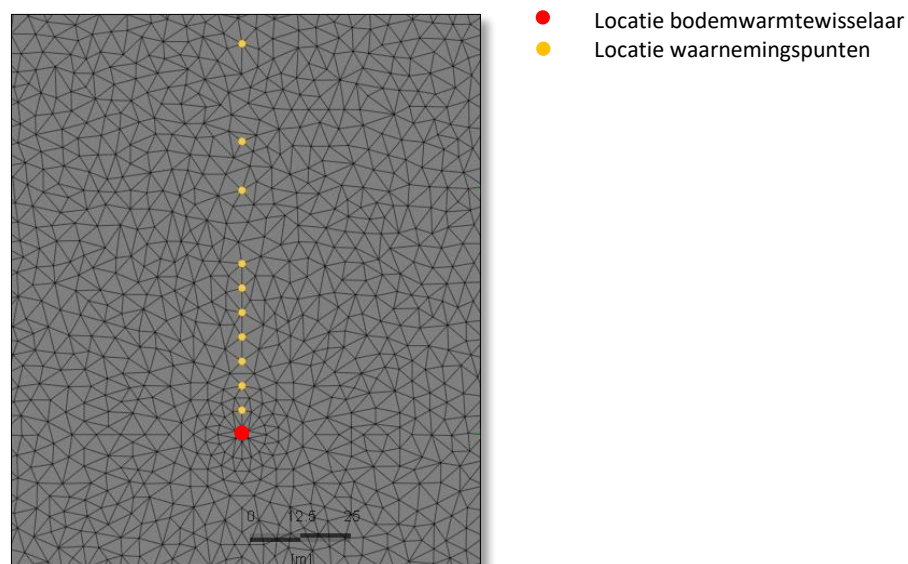
Om de temperatuurveranderingen op afstand van een bodemenergiesysteem uit de modelresultaten te analyseren worden de temperaturen op vaste locaties (afstanden) ten opzichte van de bodemwarmtewisselaar in het modelnetwerk uitgelezen. Aangezien het FEFLOW-model uit meerdere lagen is opgebouwd wordt het temperatuureffect voor een bepaalde locatie berekend als gemiddelde over alle lagen.

Voor iedere locatie zal de laagste temperatuur in de laatste winter van de simulatie genomen worden als representatieve meting.

Door de bodemtemperaturen onder invloed van grondwaterstroming te vergelijken met de simulatie waarbij geen grondwaterstroming optreedt (het uitgangspunt van de ITGBES-rekenmethode), kan worden vastgesteld in hoeverre het optreden van een grondwaterstroming tot een temperatuurverlaging (thermische interferentie) leidt die niet met ITGBES berekend is (en dus tot een onjuiste conclusie met betrekking tot afwezigheid interferentie kan leiden).

In het modelnetwerk zijn in stroomafwaartse richting 10 punten op verschillende afstanden gedefinieerd tot een maximale afstand tot de bodemwarmtewisselaar van 100 m (Figuur 2). Om de hoeveelheid te bewerken gegevens te beperken is ervoor gekozen om voor elke simulatie alleen de locatie met het grootste temperatuurverschil tussen de simulatie met en zonder grondwaterstroming te beschouwen. Dit maakt het eenvoudiger om per scenario inzichtelijk te krijgen in hoeverre de grondwaterstroming invloed kan hebben op de negatieve interferentie. Naast de effecten stroomafwaarts, zullen ook de effecten op stroomopwaarts en lateraal gelegen locaties in het modelnetwerk in kaart gebracht worden.

Figuur 2. Modelnetwerk met één bodemwarmtewisselaar en stroomafwaarts gelegen waarnemingspunten.



3. Validatie en gevoeligheid

3.1. Validatie

In het rapport *ITGBES, Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen* (rapport GHNL180760) zijn de ontwikkelde oneindige en eindige lijnbron methode gevalideerd met het FEFLOW-model. Daarbij bleken kleine afwijkingen op te treden ($< 0,1$ K voor een enkele bodemwarmtewisselaar). Er is daarmee een zeer goede overeenstemming tussen het numerieke FEFLOW-model en de bekende analytische methoden voor de situatie zonder grondwaterstroming.

Aanvullend is bepaald of de effecten berekend met het hydro-thermische simulatiemodel FEFLOW, en het daarin opgenomen bodemwarmtewisselaarmodel, overeenkomen met de bij ontwerp toegepaste standaard rekenmethode (EED, Blomberg et al. 2019). EED is een model voor het doorrekenen van ontwerpen voor eenvoudige (collectieve) verticale gesloten bodemenergiesystemen en wordt hiervoor veelvuldig gebruikt in Nederland. In het rekenmodel van Earth Energy Designer wordt geen rekening gehouden met de effecten van grondwaterstroming of aanwezigheid van grondwater. De berekende uitkomsten van EED voor de vloeistoftemperaturen in de bodemwarmtewisselaars gaan uit van een totaal bodemvolume met bepaalde eigenschappen (warmtegeleidingscoëfficiënt, warmtecapaciteit en temperatuur) waarbij geen onderscheidt gemaakt wordt tussen vaste bodemdelen en grondwater.

Voor de vergelijking zijn de berekeningen met EED uitgevoerd en met FEFLOW waarbij de grondwatergradiënt op 0 m/m gesteld is (geen grondwaterstroming).

De uitkomsten van FEFLOW zijn over het algemeen goed in overeenstemming met de resultaten van EED. Grootste afwijkingen worden gevonden tijdens de perioden dat de grootste warmteonttrekking plaatsvindt (wintermaanden), tot circa 1 graad. Er is een geringe trend met simulatietijd, na 10 jaar is de gevonden afwijking lager dan in het eerste simulatiejaar, $\pm 0,2$ K lager.

De afwijkingen tussen de verschillende modellen zijn toe te schrijven aan het gebruik van het meer geavanceerd en complexe simulatieprogramma FEFLOW waarbij gebruik wordt gemaakt van een aparte bodemwarmtewisselaarsmodule. Omdat de verschillen binnen acceptabele grenzen constant zijn is er geen reden het FEFLOW-model hiervoor aan te passen.

In dit hoofdstuk is een korte samenvatting van de resultaten van de validatieberekeningen gegeven. Bijlage IV geeft de volledige resultaten van de uitgevoerde validaties.

3.2. Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheidsanalyse is erop gericht in kaart te brengen wat mogelijke effecten zijn van parameters die kunnen variëren maar die in de uiteindelijke modelscenario's constant gehouden worden. Op basis van de gevoeligheidsanalyse worden redelijke waarden voor deze parameters gekozen óf moet besloten worden dat aanvullende berekeningen noodzakelijk zijn.

In de gevoeligheidsanalyse is gekeken naar de parameters: achtergrondtemperatuur, simulatieduur, dieptetraject laag grondwaterstroming, warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit.

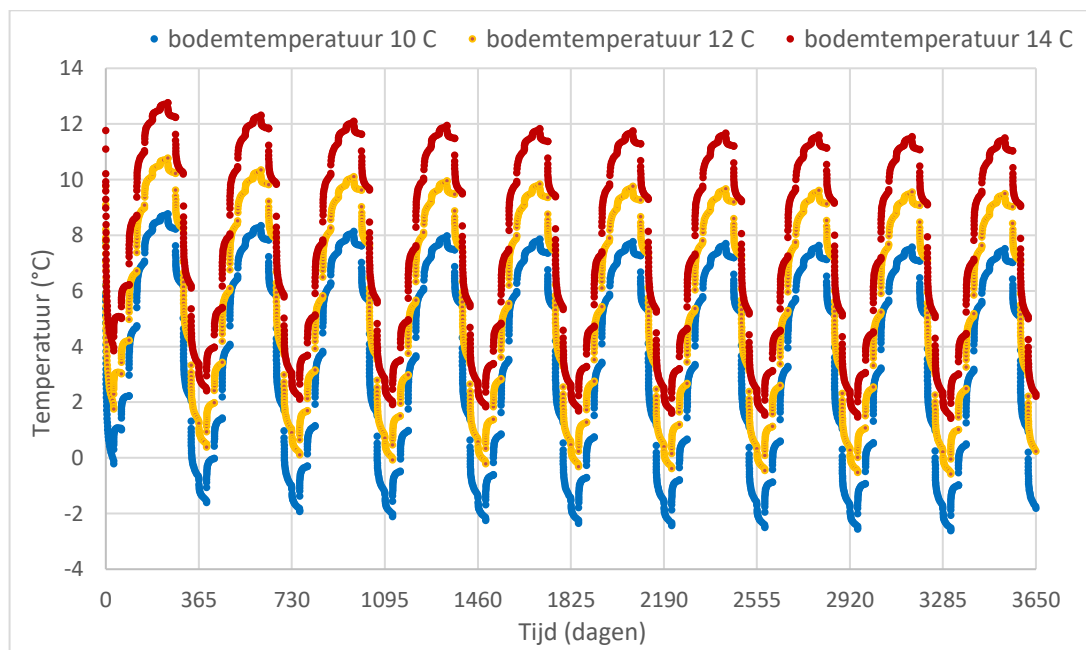
3.2.1. Gevoeligheid achtergrondtemperatuur

Voor het gehele 3D modelwerk is voor de scenario's uitgegaan van vaste natuurlijke achtergrondtemperatuur van 10°C, wat een redelijke benadering is voor de gemiddelde situatie in de Nederlandse ondergrond tot een diepte van 100 m. De natuurlijke bodemtemperatuur is echter variabel over verschillende locaties in Nederland. Er is geen geothermische gradiënt gedefinieerd. Het effect van grondwaterstroming op een bodemwarmtewisselaar hangt deels af van het verschil tussen de vloeistoftemperatuur in de bodemwarmtewisselaar en de achtergrondtemperatuur van het grondwater.

Om mogelijke gevoeligheid voor verschillen in natuurlijke achtergrondtemperatuur te verkennen zijn varianten van een basisscenario (zonder grondwaterstroming) doorgerekend waarbij in plaats van 10°C is uitgegaan van een aantal significant hogere achtergrondbodemtemperaturen. De resultaten zijn in Figuur 3 weergegeven.

Figuur 3 laat zien dat er weliswaar een belangrijk effect is van de initiële bodemtemperatuur op de temperatuurontwikkeling in de bodemwarmtewisselaar, maar dat dit effect over de gehele simulatieperiode constant is. Dat wordt voor de situatie zonder grondwaterstroming ook verwacht: de energie-uitwisseling met de bodem resulteert in een temperatuurverandering ten opzichte van de initiële temperatuur.

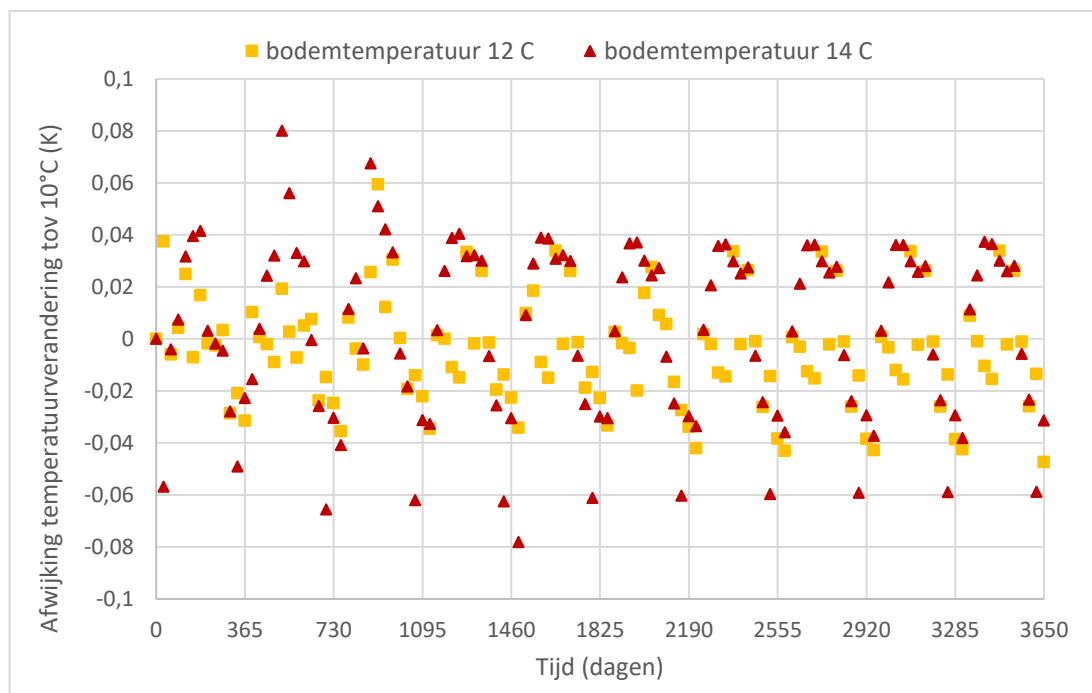
Figuur 3. Reeksen voor gemiddelde vloeistoftemperatuur in de bodemwarmtewisselaars (voor onttrekking -130 kWh/m/j) bij natuurlijke bodemtemperatuur van 10, 12 of 14°C, zonder grondwaterstroming.



Om de mogelijke verschillen tussen de drie achtergrondtemperatuur scenario's te bepalen, zijn de temperatuureffecten daarom genormaliseerd (door de initiële temperatuur ervan af te trekken) en vervolgens het verschil met de 10 °C initiële temperatuur berekening te bepalen. Dit is in Figuur 4 weergegeven. Hieruit blijkt dat er kleine afwijkingen in temperatuurverandering voorkomen tussen de drie achtergrondtemperatuur scenario's, echter deze zijn klein ($< 0,10^{\circ}\text{C}$) en vertonen geen duidelijke trend.

Ondanks de mogelijke variatie in de gemiddelde achtergrondtemperatuur in de Nederlandse ondergrond, lijkt het gebruik van een gemiddelde waarde van 10°C voldoende om de invloed van grondwaterstroming in kaart te kunnen brengen.

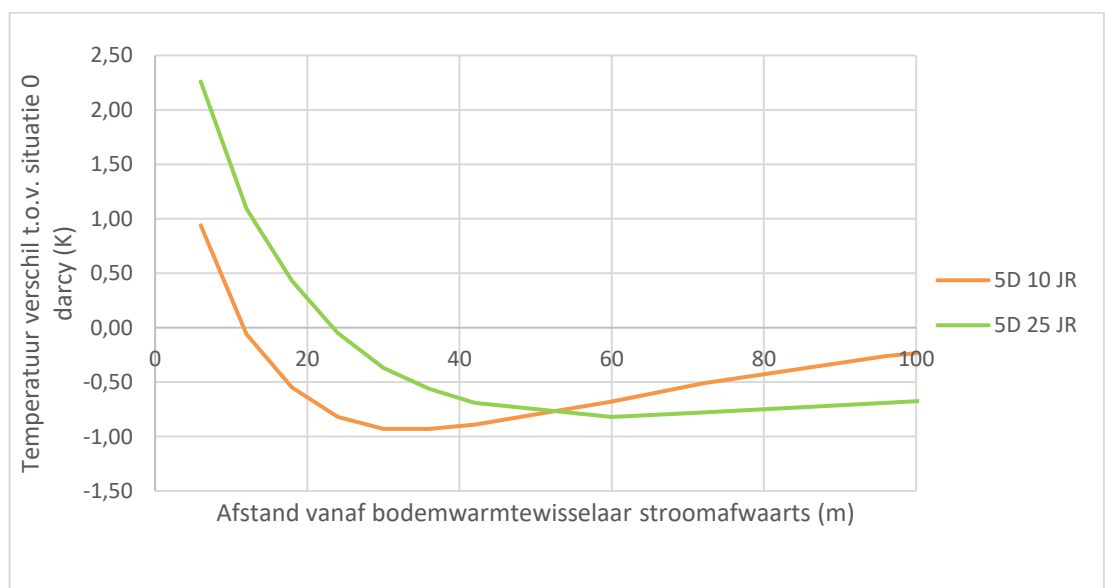
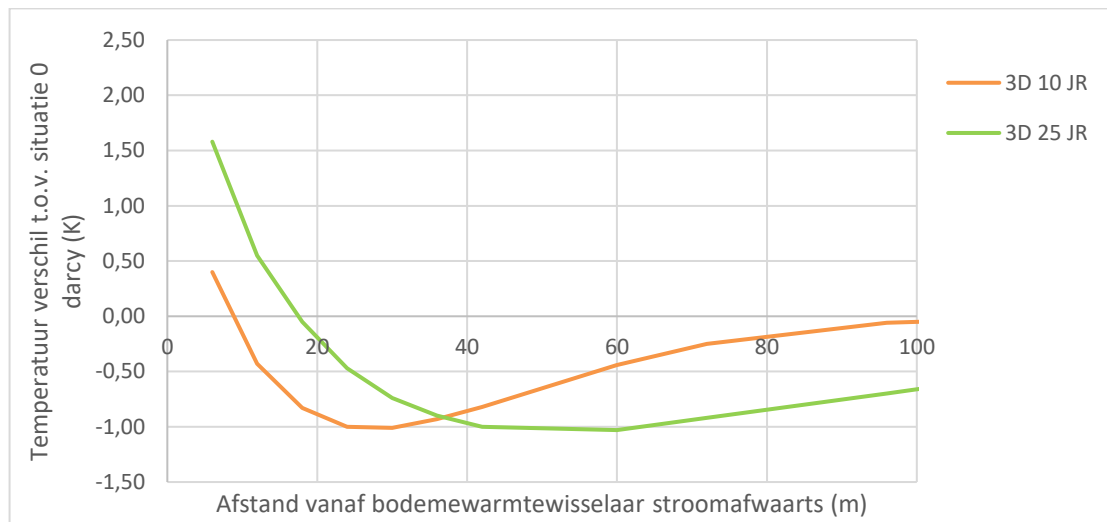
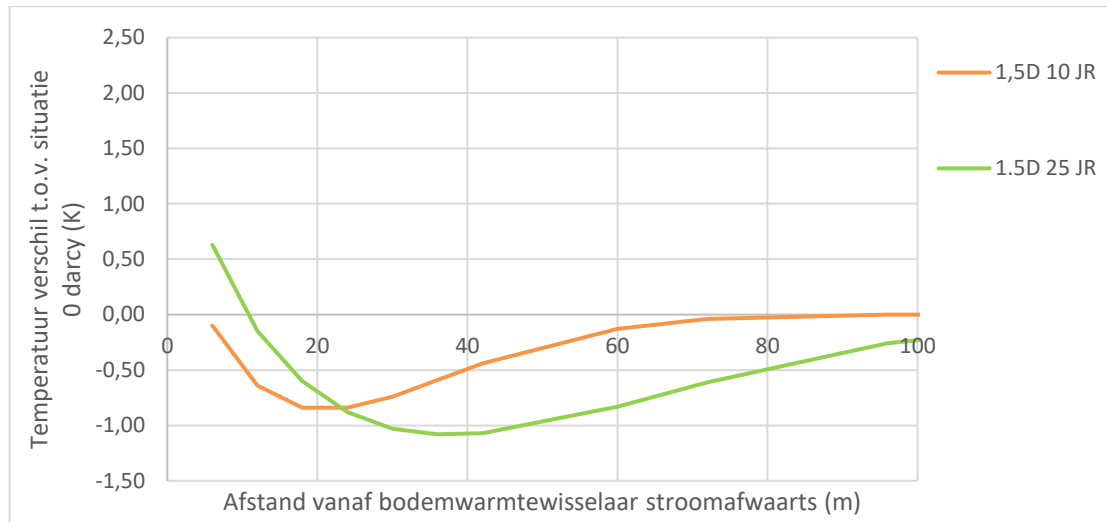
Figuur 4. *Maandelijks afwijking van de temperatuurverandering voor gemiddelde vloeistoftemperatuur in de bodemwarmtewisselaars (-130 kWh/m^3) bij natuurlijke bodemtemperatuur van 12°C of 14°C ten opzichte van 10°C , zonder grondwaterstroming.*

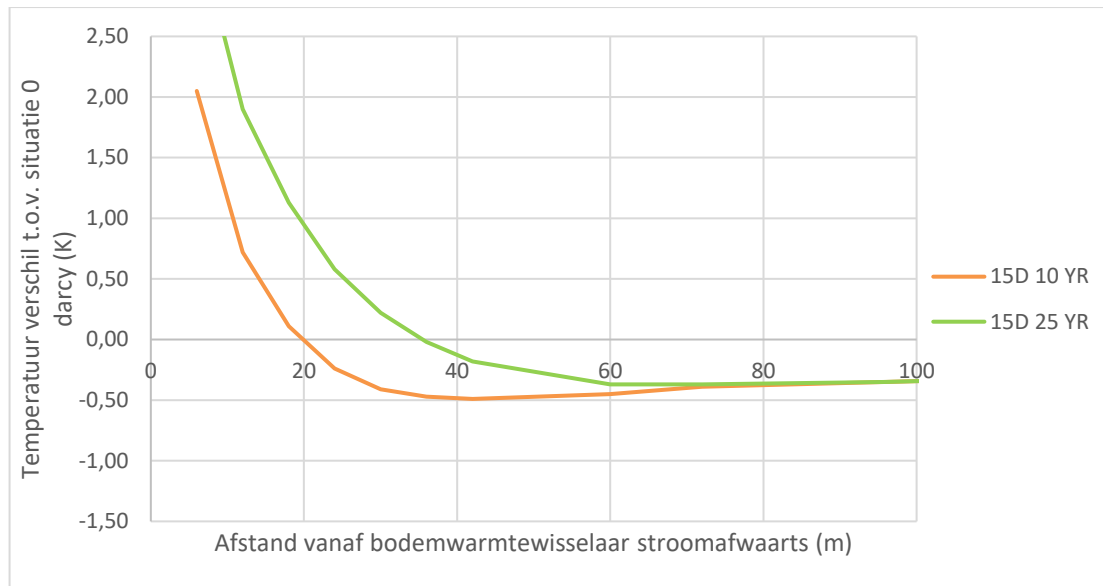


3.3. Gevoeligheid simulatieduur

Om te bepalen of de in het onderzoek van 2011 gehanteerde simulatieduur van 10 jaar ook voldoet binnen de huidige opzet, is voor enkele scenario's de simulatieduur gevarieerd van 10 tot 25 jaar. Figuur 5 geeft de temperatuureffecten ten opzichte van de situatie zonder grondwaterstroming, voor de "worst case" bij een aantal verschillende grondwaterstromings-snelheden. Hieruit blijkt dat bij een lage grondwaterstromings-snelheid het negatieve effect stroomafwaarts zich nog niet maximaal heeft ontwikkeld binnen een simulatieduur van 10 jaar. Voor de scenario's met grondwaterstromings-snelheden minder dan 5 Darcy is er daarom voor gekozen om een langere simulatieduur van 25 jaar te hanteren. Voor Darcy snelheden $> 5 \text{ m/j}$ voldoet de 10 jaar simulatieduur wel. Dit levert een enigszins conservatieve benadering op gezien het maximale effect stroomafwaarts iets kleiner wordt met een langere simulatieduur.

Figuur 5. *Vergelijking temperatuureffecten voor 10 en 25 jaar simulatieduur. Uitgewerkt voor 1,5, 3, 5 en 15 Darcy in stroomafwaartse richting ten opzichte van de bodemwarmtewisselaar.*





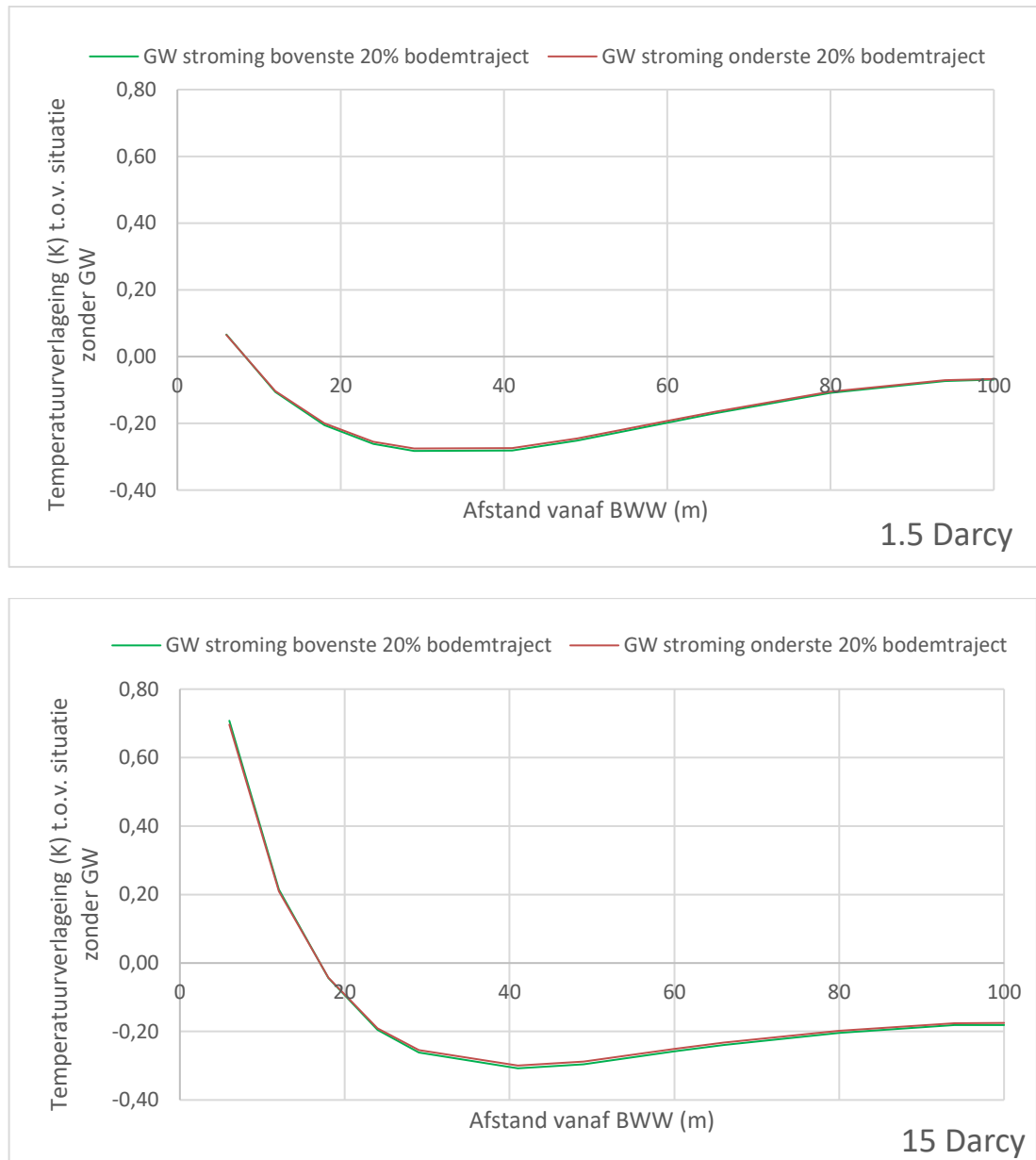
3.4. Gevoeligheid dieptetraject grondwaterstroming

De grondwaterstroming vindt in de verschillende simulaties veelal slechts plaats in een gedeelte van het dieptetraject van de bodemwarmtewisselaar. Hierbij is belangrijk om te bepalen welke invloed het dieptetraject van de grondwaterstroming langs de bodemwarmtewisselaars heeft op de temperatuur van de circulatievloeistof.

De bodemwarmtewisselaarsmodule in FEFLOW geeft een asymmetrische temperatuurverandering van de vloeistof in de bodemwarmtewisselaar van het oppervlak naar de diepte. Of de grondwaterstroming dan optreedt in het gedeelte dichtbij het oppervlak of in het onderste gedeelte van de bodemwarmtewisselaar kan dus invloed hebben op de resultaten.

Om te bepalen of er een verschil is in de resultaten afhankelijk van de locatie van het dieptetraject van de grondwaterstroming zijn een aantal scenario's doorgerekend. Voor 1,5 en 15 Darcy zijn voor de "worst case" de effecten stroomafwaarts bepaald voor twee modellen waarvan 20% van het traject van de bodemwarmtewisselaar zich in een watervoerend pakket met grondwaterstroming bevindt. In het ene model overlapt de bovenste 20% van de bodemwarmtewisselaar met het watervoerende pakket, en in het ander model de onderste 20%. In Figuur 6 zijn de temperatureffecten ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming weergegeven voor deze scenario's.

Figuur 6. *Temperatuurverlagingen stroomafwaarts t.o.v. situatie zonder grondwaterstroming (-240 kWh/m/j) bij een bodemwarmtewisselaar waarbij de onderste 20%, danwel de bovenste 20%, overlapt met een watervoerend pakket. Uitgewerkt voor 1,5 en 15 Darcy.*

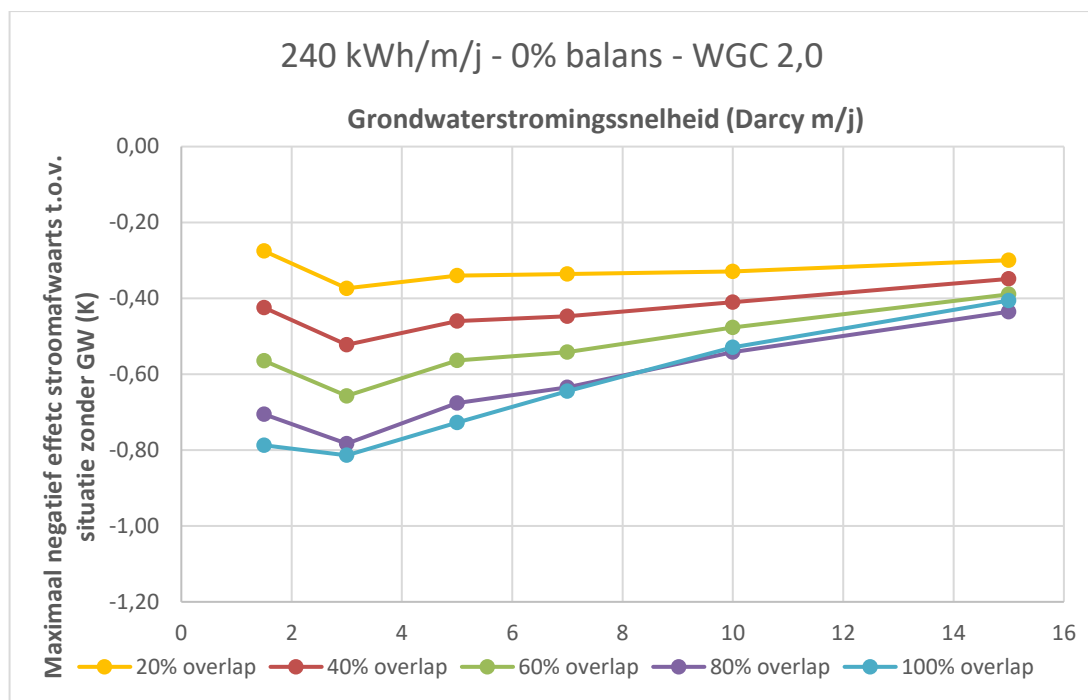


De resultaten laten zien dat de verschillen in effecten van grondwaterstroming wanneer het bovenste óf onderste deel geactiveerd is, verwaarloosbaar zijn: in de 'worst case' bedragen de verschillen slechts enkele duizenden van een graad.

3.5. Gevoeligheid warmtegeleidingscoëfficiënt

Om te bepalen in hoeverre een hogere of lagere warmtegeleiding van de bodem van invloed is op de temperatuurverlagingen op afstand, is een analyse gemaakt voor een aantal “worst case” modellen. Figuur 7 geeft de maximale effecten stroomafwaarts, ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming, in het geval van een bodemwarmtewisselaar met onttrekking 240 kWh/m/j zonder regeneratie. De figuur omvat de resultaten van meerdere scenario's die verschillen van elkaar in de mate van overlap BWW en WVP, en in grondwaterstromingsnelheid. Alle scenario's in Figuur 7 zijn doorgerekend met een warmtegeleiding van de bodem van 2,0 W/mK. Dit is de standaardwaarde zoals ook verder gebruikt in de berekening van alle andere modellen.

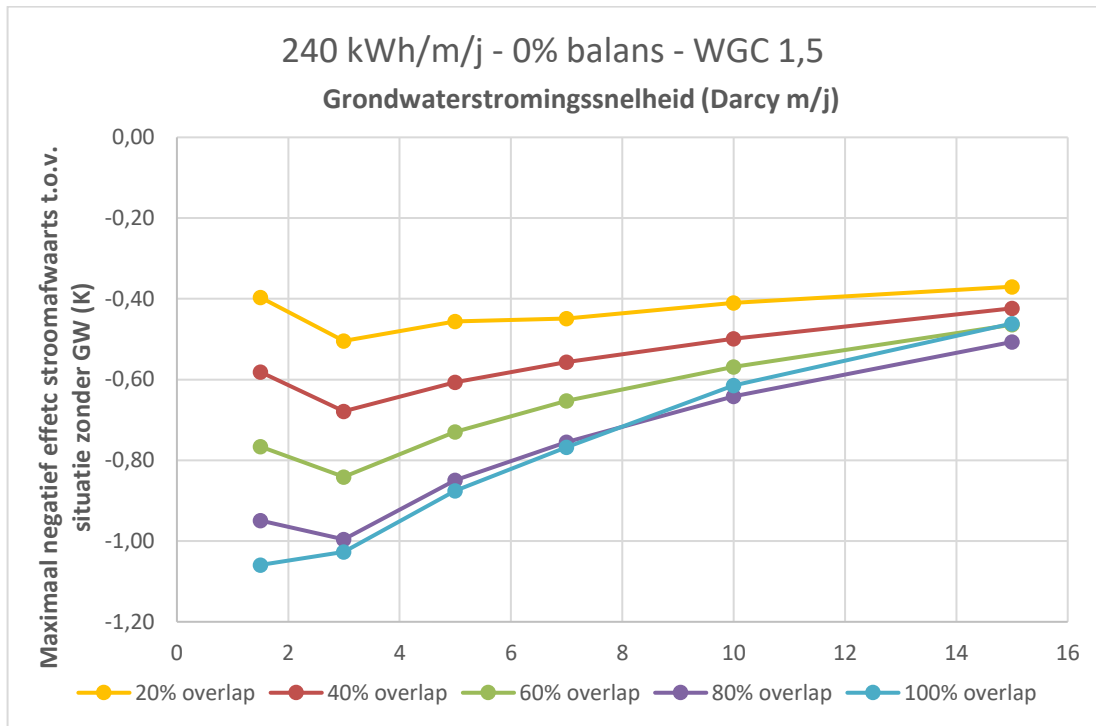
Figuur 7. Totaaloverzicht voor de uitkomsten van alle scenario's, betreffende het maximale negatieve effect dat er stroomafwaarts optreedt door de aanwezigheid van grondwaterstroming, ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming. Uitgewerkt voor één onttrekking van 240 kWh/m/j zonder balans, bij een warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem van 2,0 W/mK.



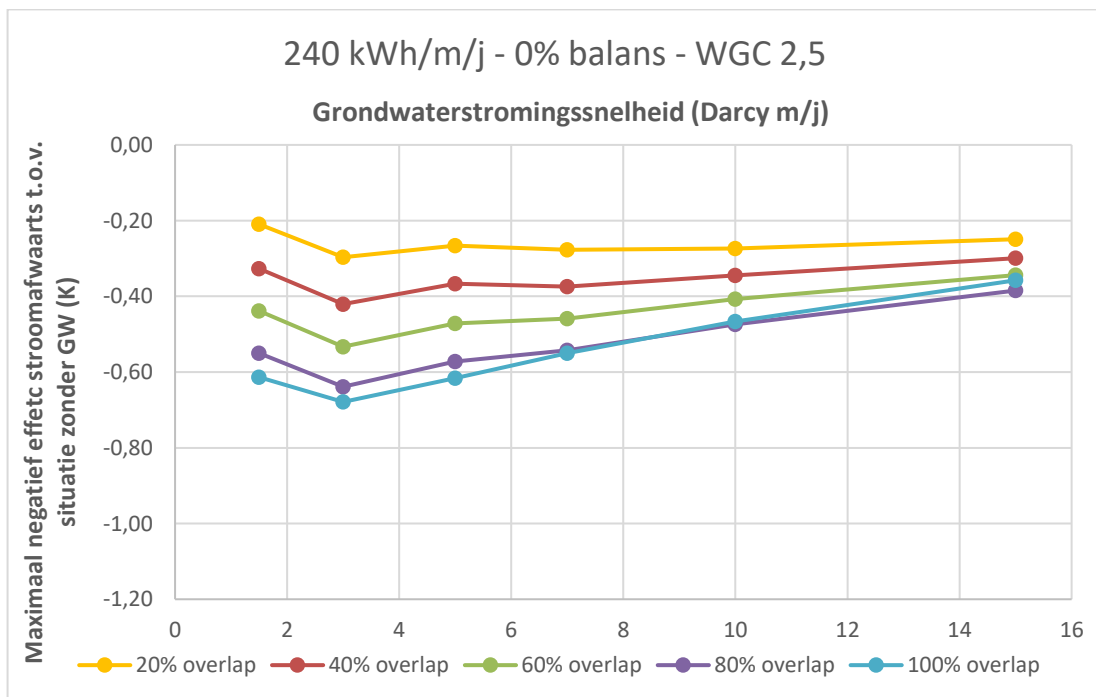
Figuren 8 en 9 geven de resultaten bij warmtegeleidingscoëfficiënten van respectievelijk 1,5 en 2,5 W/mK.

Uit de analyse van de effecten van de warmtegeleidingscoëfficiënt blijkt dat bij lagere warmtegeleiding (1,5 W/mK) de temperatuurverlaging op afstand wat groter is dan bij de vastgestelde standaardwaarde van 2,0 W/mK.

Figuur 8. Totaaloverzicht voor de uitkomsten van alle scenario's, betreffende het maximale negatieve effect dat er stroomafwaarts optreedt door de aanwezigheid van grondwaterstroming, ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming. Uitgewerkt voor één onttrekking van 240 kWh/m/j zonder balans, bij een warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem van 1,5 W/mK.



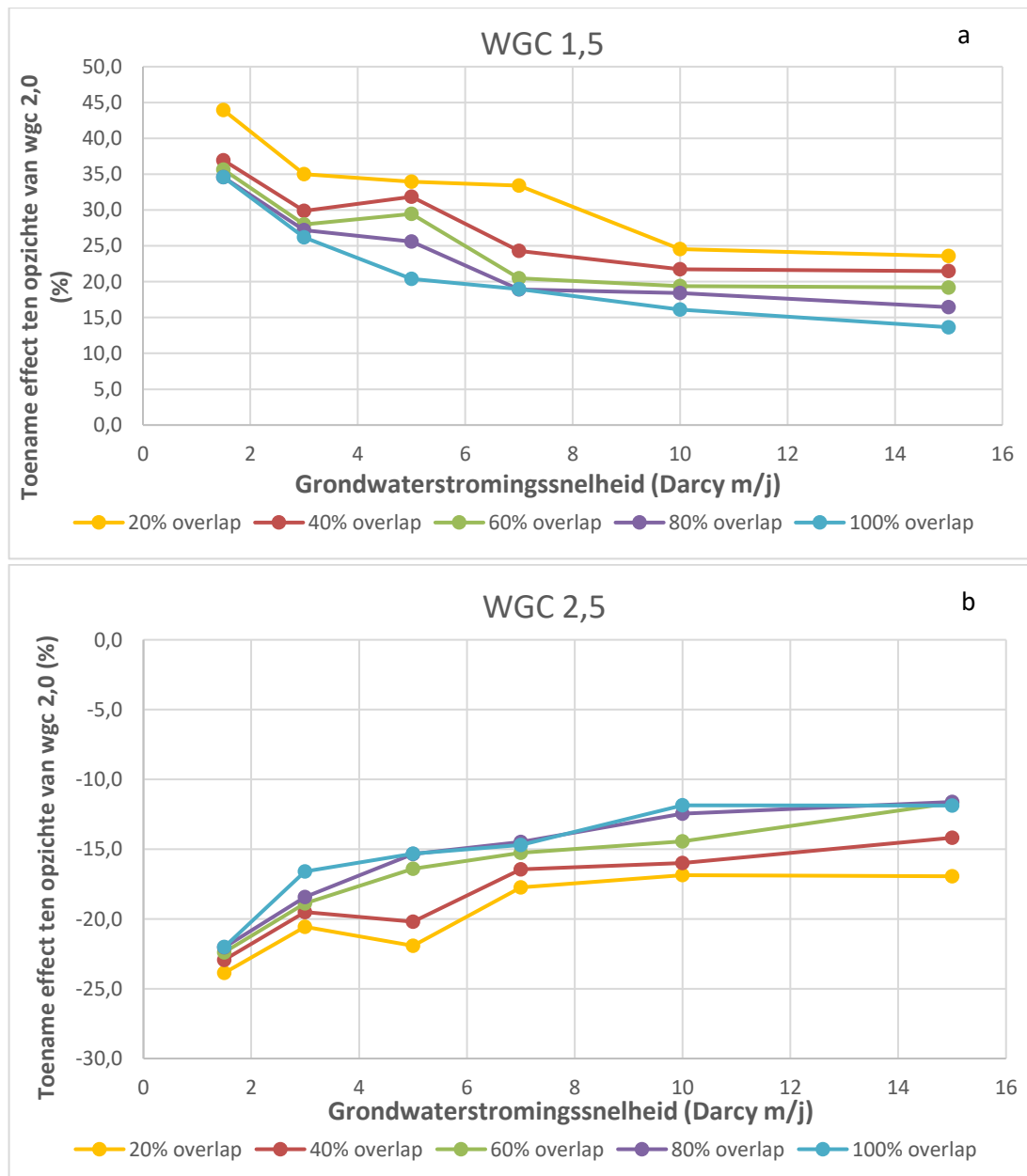
Figuur 9. Totaaloverzicht voor de uitkomsten van alle scenario's, betreffende het maximale negatieve effect dat er stroomafwaarts optreedt door de aanwezigheid van grondwaterstroming, ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming. Uitgewerkt voor één onttrekking van 240 kWh/m/j zonder balans, bij een warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem van 2,5 W/mK.



Bij een hogere warmtegeleiding (2,5 W/mK) zijn de temperatuurverlagingen op afstand wat kleiner dan bij de vastgestelde referentiewaarde van 2,0 W/mK.

Figuur 10 geeft een overzicht van de procentuele toename (voor WGC 1,5 W/mK) en de procentuele afname (voor WGC 2,5 W/mK) in temperatuureffecten die zichtbaar zijn, ten opzichte van de situatie bij een warmtegeleidingscoëfficiënt van 2,0 W/mK. Uit de gesimuleerde scenario's blijkt dat de effecten ca. 40% toenemen bij 1,5 Darcy indien er een WGC van 1,5 W/mK is. Dit loopt af naar een toename van ca. 20% bij de hogere grondwaterstromingssnelheden. Uit Figuur 10b blijkt dat de afname in effecten bij een hogere WGC van 2,5 verhoudingsgewijs wat lager is: ca. 23% afname bij 1,5 Darcy, en dit loopt af naar ca. 13% bij de hogere grondwatersnelheden.

Figuur 10. Procentuele toenames (bij WGC 1,5) en afnames (bij WGC 2,5) van de berekende negatieve effecten stroomafwaarts voor alle "worst case" scenario's, ten opzichte van de effecten bij een WGC van 2,0.



Beide trends liggen relatief goed in de lijn der verwachting. Een toename van 1,5 naar 2,0 is verhoudingsgewijs een grotere stijging dan van 2,0 naar 2,5. Het feit dat de verschillen in de effecten wat groter zijn van bij een daling van WGC 2,0 naar 1,5 W/mK strookt hiermee. Dat in beide gevallen de effecten aflopen met toenemende grondwaterstromingssnelheden, komt doordat het aandeel van geleiding binnen de totale warmteoverdracht in de bodem kleiner wordt, naar mate de invloed van de grondwaterstroming op warmtetransport groter wordt. Een verschil in de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem maakt dan relatief minder uit dan bij een lage grondwaterstroming.

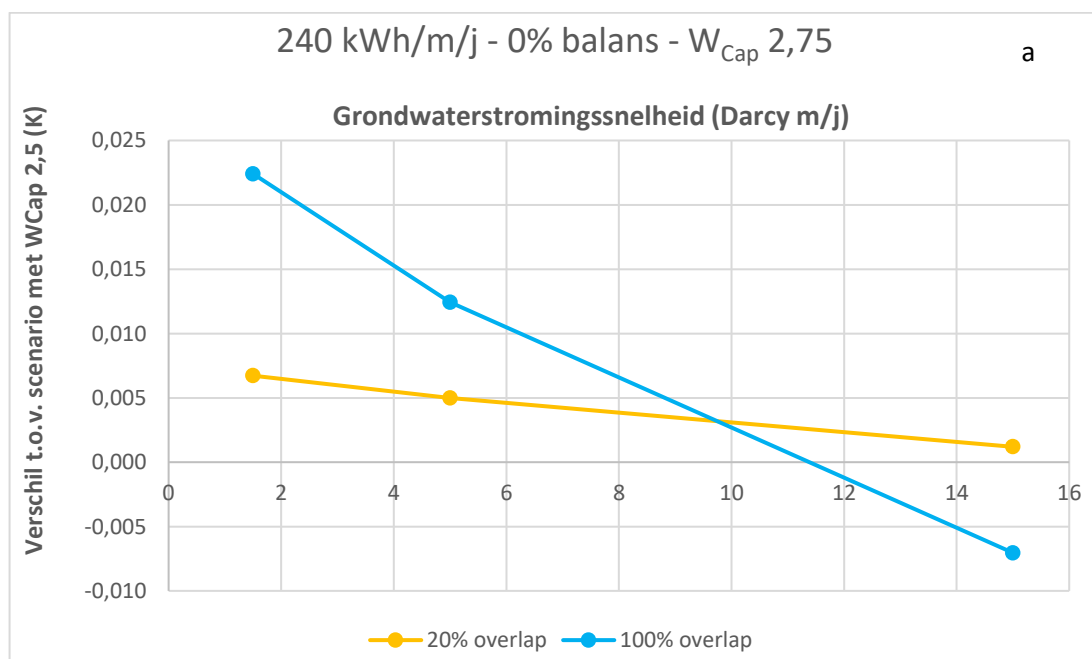
3.6. Gevoeligheid warmtecapaciteit

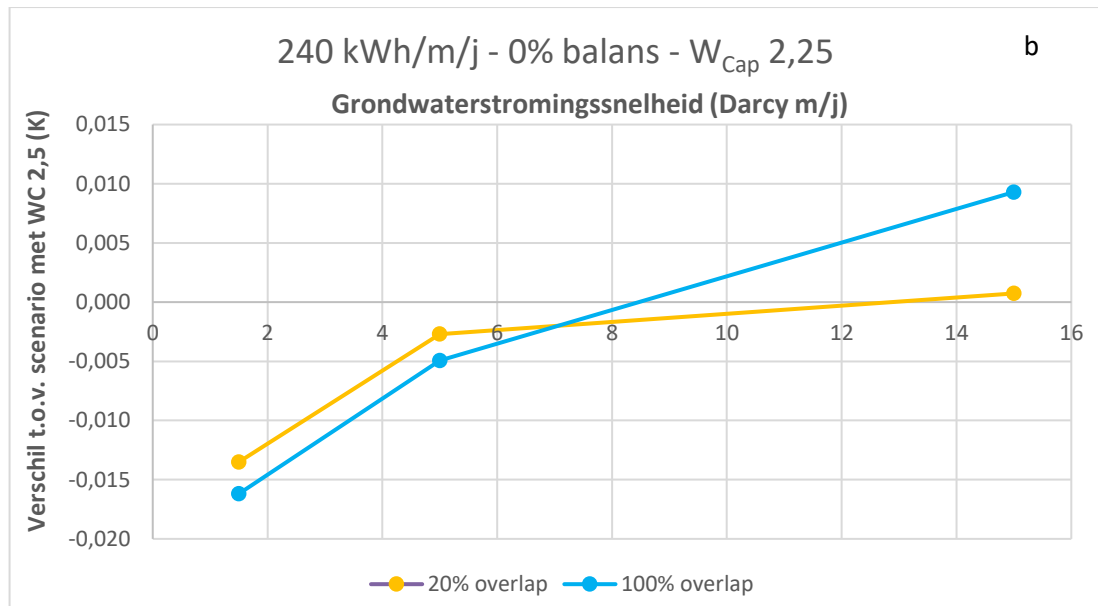
Om te bepalen in hoeverre een hogere of lagere warmtecapaciteit van de bodem van invloed is op de temperatuurverlagingen op afstand, is eenzelfde soort aanpak gevolgd als voor de warmtegeleding. Voor een aantal “worst case” modellen, is een vergelijking gemaakt tussen de maximale effecten stroomafwaarts bij een representatieve warmtecapaciteit van 2,5 MJ/m³K, en een hogere (2,75 MJ/m³K), danwel lagere (2,25 MJ/m³K), warmtecapaciteit van het bodemtraject waarin de BWW geplaatst is.

Figuur 11 laat de absolute verschillen zien in het temperatureffect veroorzaakt door grondwaterstroming, voor deze twee alternatieve warmtecapaciteit waarden, ten opzichte van dezelfde simulaties met een warmtecapaciteit van 2,5 MJ/m³K.

Bij een hogere warmtecapaciteit van de bodem blijken de negatieve effecten van grondwaterstroming enigszins kleiner bij lagere Darcy's (<10 Darcy). Bij hogere grondwaterstromingssnelheden (>10 Darcy) lijkt een hogere warmtecapaciteit juist een groter negatief effect te veroorzaken.

Figuur 11. Absolute verschillen van de berekende negatieve effecten stroomafwaarts voor een aantal “worst case” scenario's met alternatieve warmtecapaciteiten, ten opzichte van de effecten bij een WCap van 2,5.





Bij de scenario's met een lagere warmtecapaciteit is een omgekeerd patroon te zien. Voor de lagere Darcy's zijn de negatieve effecten stroomafwaarts als het gevolg van grondwaterstroming groter ten opzichte van een het scenario met een warmtecapaciteit van 2,5 MJ/m³K. Bij hogere Darcy's is dit wederom omgedraaid en worden de effecten marginaal kleiner.

Over het geheel kan geconcludeerd worden dat eventuele variatie in de warmtecapaciteit van de bodem weinig invloed zal hebben op de berekende negatieve effecten als het gevolg van de aanwezigheid van grondwaterstroming. Alle berekende waardes, voor beide alternatieve warmtecapaciteiten, representeren procentueel gezien slechts marginale verschillen ten opzichte van een waarde van 2,5 MJ/m³K (<5%).

4. Resultaten grondwatereffecten op afstand

4.1. Simulaties enkele bodemwarmtewisselaar

Tabel 1 geeft een overzicht van de beschouwde scenario's met betrekking tot het energievraagpatroon van één enkele bodemwarmtewisselaar.

Tabel 1. Beschouwde energiscenario's bodemwarmtewisselaar.

Scenario	Energieonttrekking (kWh/m/j)	Energietoevoer (kWh/m/j)			
		0%	30%	50%	70%
Worst case	240	0	72	120	168
Maximaal gemiddeld	120	0	36	60	84
Gemiddeld	60	0	18	30	42
Klein	30	0	9	15	21

Ten opzichte van de eerdere studie uit 2011 is er een nieuwe worst-case gedefinieerd van 240 kWh/m/j. Met verschillende energiebalansen komt het totale aantal energiscenario's op 16.

In de oorspronkelijke opzet van het onderzoek zijn de scenario's met betrekking tot grondwaterstroming beperkt tot Darcy grondwaterstromingssnelheden tussen 5 en 50 m/j. Uit analyse van deze resultaten in het voortraject bleek een grotere gevoeligheid voor lagere grondwaterstromings-snelheden. Daarom zijn (in overleg met de klankbordgroep) aanvullende berekeningen uitgevoerd met grondwaterstromingssnelheden tussen 0 en 10 Darcy m/j. Binnen de definitieve opzet van het onderzoek zijn uiteindelijk simulaties uitgevoerd voor 9 verschillende grondwaterstromingssnelheden:

0; 1,5; 3; 5; 7; 10; 15; 30; 50 Darcy

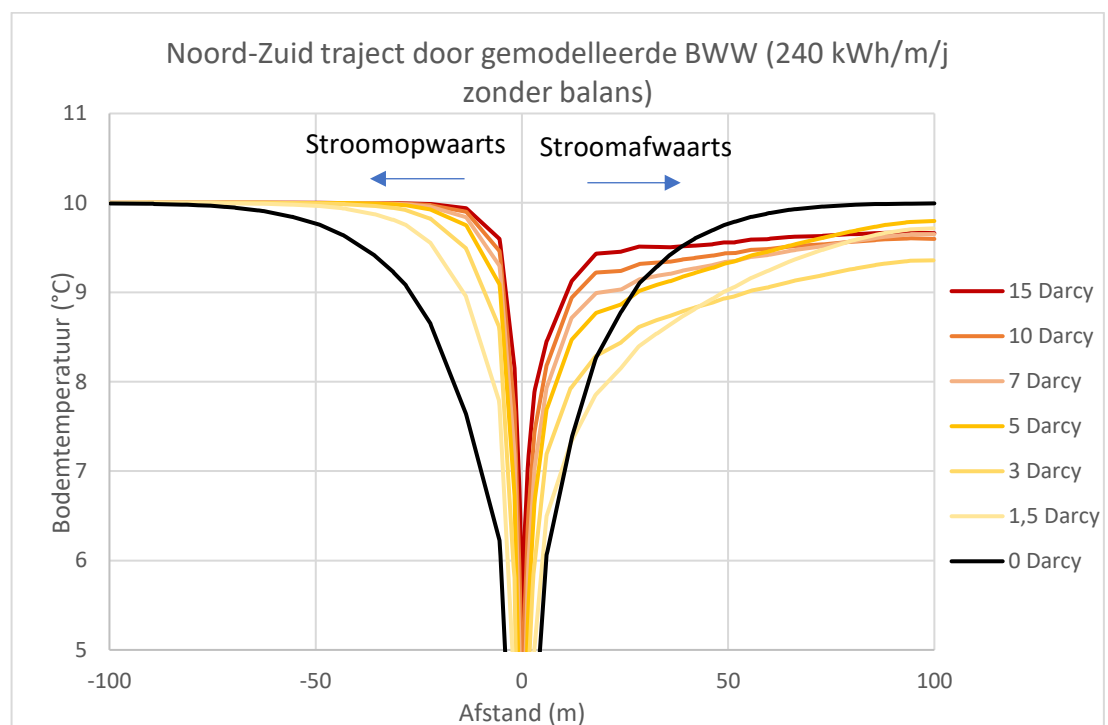
Al deze verschillende grondwaterstromingssnelheden zijn doorgerekend in combinatie met verschillende maten van overlap van de bodemwarmtewisselaar met een watervoerend pakket (20, 40, 60, 80 en 100%).

In totaal zijn er 656 (16 + 16 x 8 x 5) verschillende combinaties doorgerekend met betrekking tot de invloed van één bodemwarmtewisselaar onder de hierboven gespecificeerde variërende condities. Deze simulaties zijn allen uitgevoerd met een gemiddelde achtergrondtemperatuur van de bodem van 10 °C, een gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem van 2,0 W/mK, en een gemiddelde warmtecapaciteit van de bodem van 2,5 MJ/m³K.

4.1.1. Effecten stromingsrichting

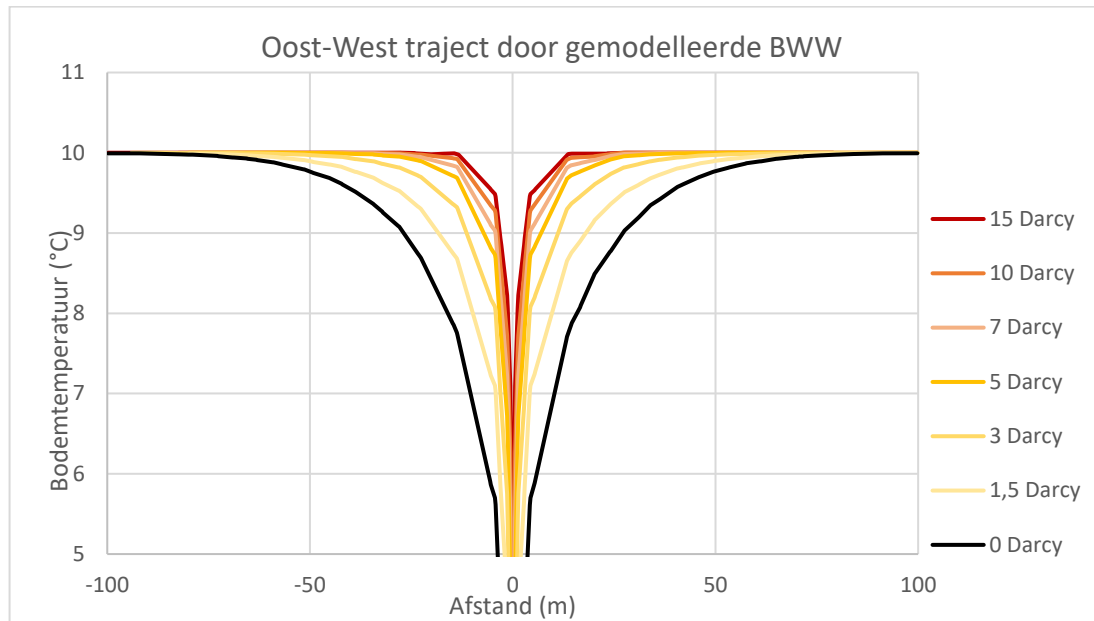
Eerst is bepaald of het beoordelen van effecten van grondwaterstroming benedenstrooms voldoende is, of dat ook lateraal of bovenstrooms mogelijk negatieve effecten van grondwaterstroming op kunnen treden. Hiervoor is voor de “worst case” van een enkele bodemwisselaar met een onttrekking van 240 kWh/m/j zonder balans, zowel met als zonder grondwaterstroming, in kaart gebracht wat de effecten zijn voor het gebied stroomopwaarts en zijdelings van de onttrekking. Figuur 12 geeft een doorsnede van de bodemtemperaturen uit het model parallel aan de grondwaterstroming dwars door de bodemwarmtewisselaar. De grafiek laat zien dat de temperatuurverlaging ten opzichte van de begintemperatuur van 10,0 °C stroomopwaarts overal het grootst is in de situatie zonder grondwaterstroming. Aangezien er in de “worst case” geen negatief effect is van grondwaterstroming zal dit in de scenario’s met kleinere onttrekkingen en/of balans ook het geval zijn. Bij de aanwezigheid van grondwaterstroming zijn de effecten van een GBES op een stroomopwaarts gelegen nabije GBES, derhalve altijd lager dan wat er berekend wordt in ITGBES (ITGBES is in die gevallen conservatief).

Figuur 12. Overzicht van de bodemtemperaturen in de winter aan het eind van de simulatieduur voor een transect door het modelnetwerk met de gebieden tot 100m stroomopwaarts en 100m stroomafwaarts t.o.v. de BWW. Verschillende lijnen representeren de berekende temperaturen onder de verschillende Darcy grondwaterstromingen. Ongestoorde temperatuur is 10 °C.



Voor GBES die zijwaarts gelegen zijn ten opzichte van een ander systeem in relatie tot de stromingsrichting van het grondwater, kan eenzelfde conclusie getrokken worden. Figuur 13 laat zien dat ook hier de effecten op alle afstanden het grootst zijn in de situatie zonder grondwaterstroming.

Figuur 13. Overzicht van de bodemtemperaturen in de winter aan het eind van de simulatieduur voor een transect door het modelnetwerk met de gebieden tot 100m zijdelings van de BWW, aan beide kanten. Verschillende lijnen representeren de berekende temperaturen onder de verschillende Darcy grondwaterstromingen. Ongestoorde temperatuur is 10 °C



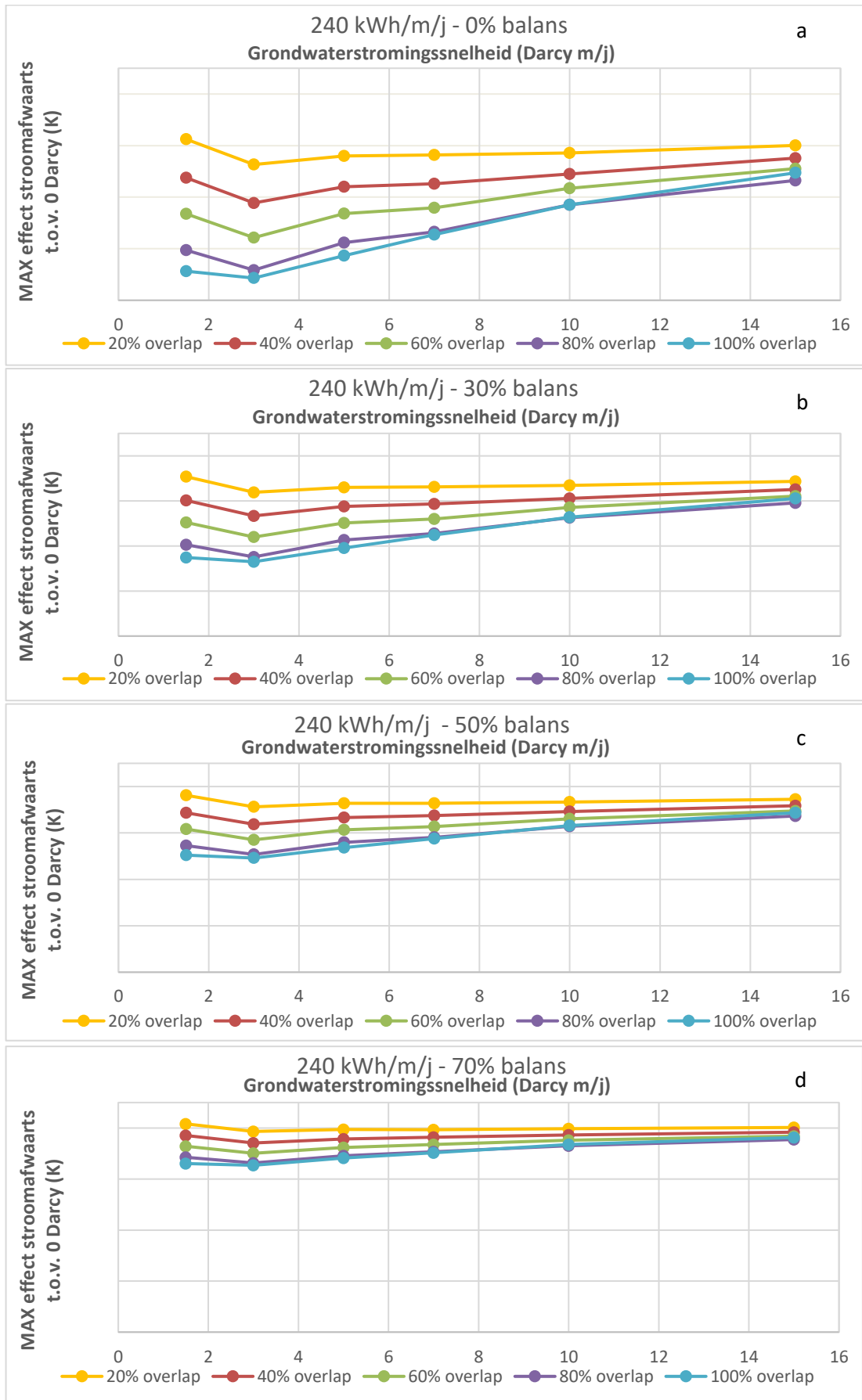
4.1.2. Resultaten enkele bodemwarmtewisselaar

In de volgende paragraaf zijn de resultaten voor alle scenario's voor wat betreft de effecten stroomafwaarts ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming gegeven. Dit is gedaan op dezelfde manier als in Figuur 7, waarbij steeds alleen het maximale effect binnen de eerste 100 m in stroomafwaartse richting is weergegeven per scenario. Om de grafieken overzichtelijk te houden, en gezien hun geringe voorkomen in de Nederlandse ondergrond, zijn de resultaten voor de grootste GW-stromingen (30 en 50 Darcy) weggelaten uit de gepresenteerde figuren. Voor al deze simulaties is uitgegaan van een warmtegeleidingscoëfficiënt van 2,0 W/mK.

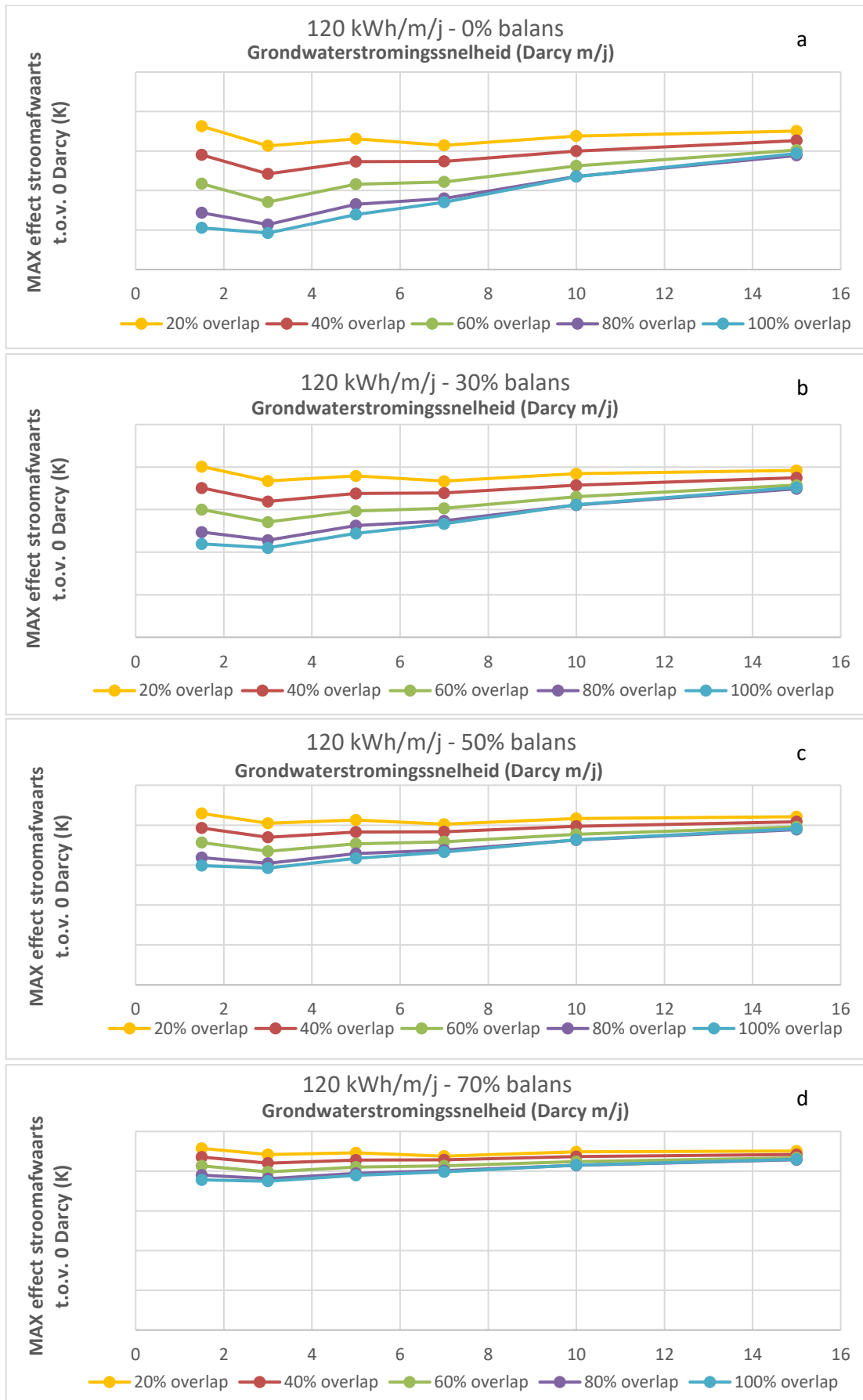
De grootste absolute invloeden van grondwaterstroming op de bodemtemperatuur treden logischerwijs op bij de "worst case" onttrekking, en bij 100% overlap tussen de bodemwarmtewisselaar en het gesimuleerde watervoerende pakket. Uit Figuur 14 blijkt dat het effect het grootst is bij een grondwaterstroming van 3 Darcy. Het berekende maximale extra negatieve temperatuureffect wat één bodemwarmtewisselaar ten opzichte van een stroomafwaarts gelegen locatie kan veroorzaken, is dan ca. 0,8 K.

Bij een kleinere mate van overlap tussen de BWW en het watervoerend pakket zijn de maximale effecten ook kleiner. Naarmate de grondwaterstromingssnelheid groter wordt, worden in alle gevallen de effecten uitgesmeerd over een groter gebied. Het maximale negatieve effect wat er stroomafwaarts geregistreerd wordt loopt hierdoor af. Bij hogere grondwaterstroming (>10 Darcy) maakt het steeds minder uit hoeveel overlap er is met een watervoerend pakket aangezien het effect per energiscenario dan lijkt te komen tot een bepaalde minimum effectwaarde. Alle hierboven beschreven patronen lijken terug te komen in alle verschillende energiscenario's weergegeven in Figuren 14 t/m 17.

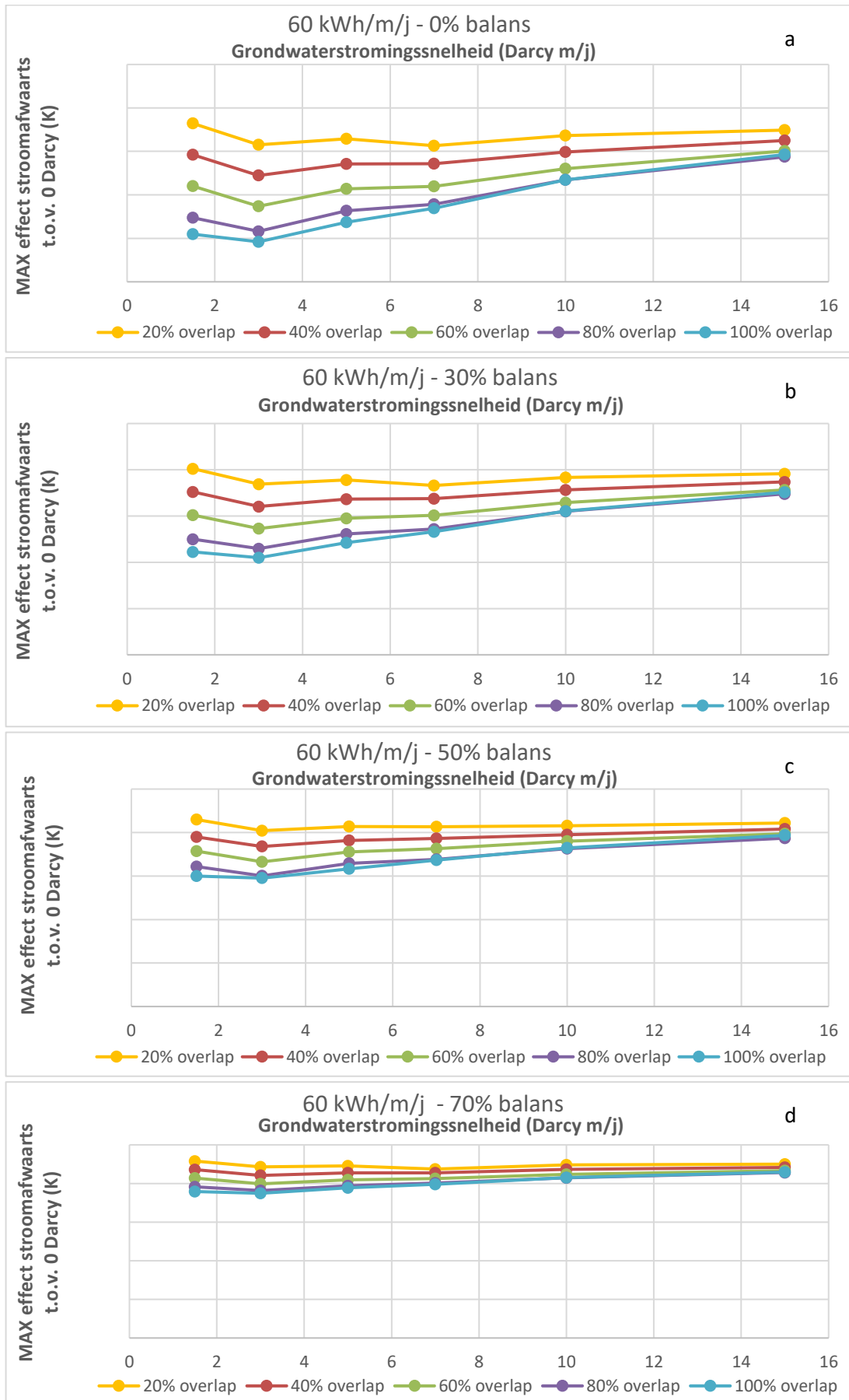
Figuur 14. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij BWW met onttrekking 240 kWh/m/j.



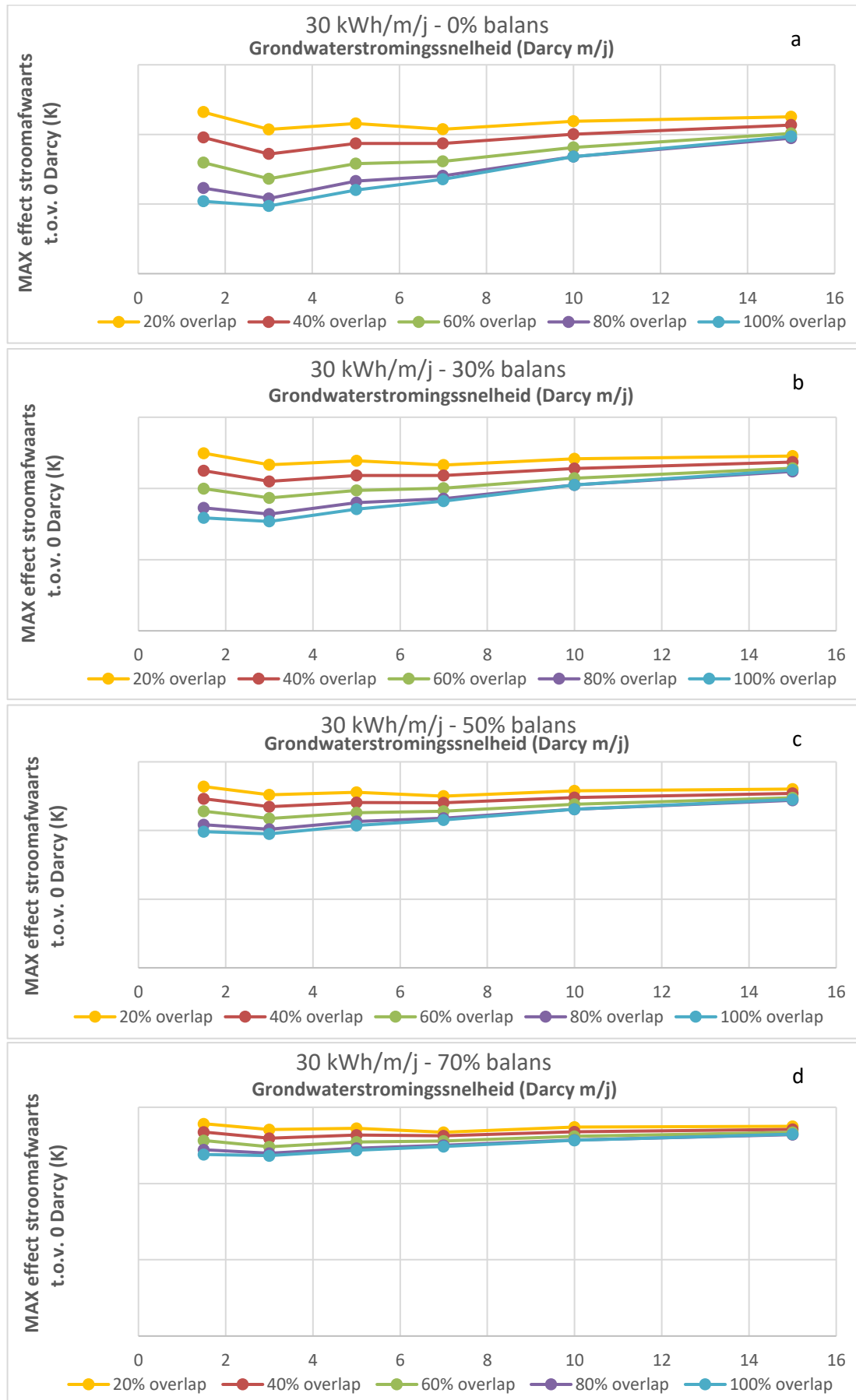
Figuur 15. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij BWW met onttrekking 120 kWh/m/j.



Figuur 16. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij BWW met onttrekking 60 kWh/m/j.



Figuur 17. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij BWW met onttrekking 30 kWh/m/j.



De invloed van balans op de maximaal gemeten temperatuureffecten stroomafwaarts is ook zeer duidelijk aanwezig. Over het algemeen lijkt er een lineair verband te bestaan tussen de mate van regeneratie, en de afname in maximaal negatief effect. Het maximale effect bij 100% overlap en 5 darcy voor de “worst case” met een balans van 50%, is bijvoorbeeld ongeveer een factor twee kleiner dan = het maximale effect bepaald voor hetzelfde scenario zonder balans.

4.2. Resultaten voor scenario's met meerdere bodemwarmtewisselaars

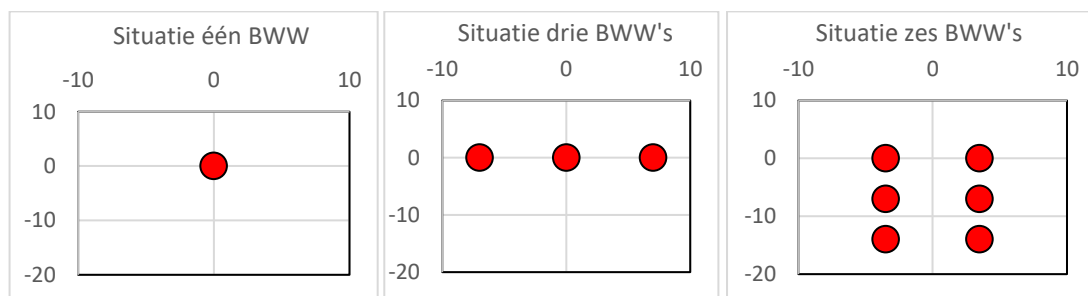
Het onderzoek is gebaseerd op simulaties van de bodemenergiesystemen zoals die in de ITGBES-tool toegepast worden. Dit houdt in dat een systeem in principe wordt vereenvoudigd tot één enkele bodemwarmtewisselaar waarop de gehele energie-uitwisseling plaatsvindt, ook als het systeem in werkelijkheid uit meerdere (maximaal 6) wisselaars bestaat.

Daarnaast zal het voorkomen dat meerdere systemen tegelijkertijd worden gerealiseerd, waarbij de effecten van extra temperatuurverlaging op afstand elkaar kunnen versterken. Omdat de verschillende opstellingen van meerdere systemen en energiepatronen nagenoeg oneindig zijn, zijn alle scenario's zoals gedefinieerd in paragraaf 4.1 uitgevoerd op basis van één enkel systeem/bodemwarmtewisselaar.

Om de effecten van een clustermelding (waarbij een groter aantal gesloten bodemenergiesystemen tegelijkertijd gerealiseerd wordt) in te schatten, zijn een aantal van de gesimuleerde scenario's herhaald. Hierbij zijn in plaats van één enkele bodemwarmtewisselaar, meerdere bodemwarmtewisselaars op korte afstand van elkaar in het modelnetwerk geïmplementeerd. Vervolgens is er wederom gekeken naar de maximale effecten op afstand in stroomafwaartse richting, en zijn deze vergeleken met de effecten van een enkele bodemwarmtewisselaar met een vergelijkbare onttrekking.

In de analyse is bepaald wat de toegevoegde effecten zijn van 3 of 6 bodemwarmtewisselaarsystemen in plaats van één enkel systeem. De ruimtelijke indelingen van de scenario's met meerdere bodemwarmtewisselaars, ten opzichte van de situatie met slechts één BWW, zijn te zien in Figuur 18. De bodemwarmtewisselaars zijn in beide scenario's 7 meter uitelkaar gezet.

Figuur 18. Schematische weergave van configuratie bij simulatie van meerdere GBES.



Voor deze 2 alternatieve scenario's is bepaald wat de maximale negatieve effecten zijn stroomafwaarts als het gevolg van de aanwezigheid van grondwaterstroming, onder een aantal geselecteerde condities. Er is voor gekozen om te kijken naar scenario's met 80%

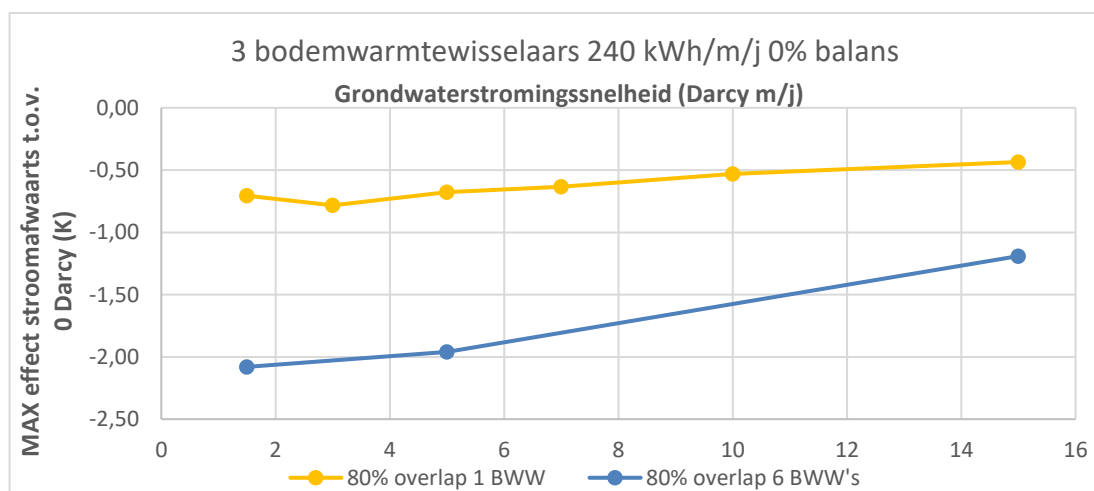
overlap tussen het WVP en de BWW, omdat dit het meest in de buurt ligt van de situatie in de ondiepe Nederlandse ondergrond. Om een beeld te kunnen schetsen van de te verwachten extra effecten in gevallen waarin er sprake is van meerdere bodemwarmtewisselaars, is er gekeken naar de “worst case” onttrekking (240 kWh/m/j) zonder balans en systemen met een middelgrote onttrekking (60 kWh/m/j) met 30% balans, bij drie verschillende grondwaterstromingen: 1.5, 5, en 15 Darcy (Tabel 2).

Tabel 2. Scenario's waarvoor de negatieve effecten stroomafwaarts, ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming zijn bepaald voor modellen met 3 en 6 BWW's.

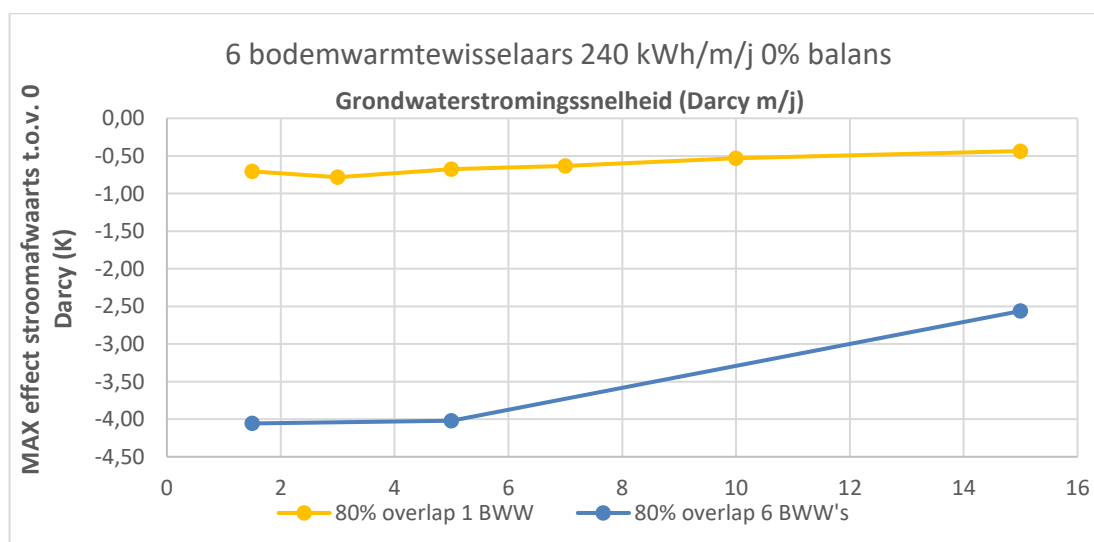
Scenario	Energieonttrekking (kWh/m/j)	Overlap WVP en BWW (%)	Balans (%)	Beschouwde Darcy grondwaterstromingen
Worst case	240	80	0	1,5 – 5 – 15
Gemiddeld	60	80	30	1,5 – 5 – 15

De resultaten van deze analyse zijn te zien in Figuren 19 t/m 22.

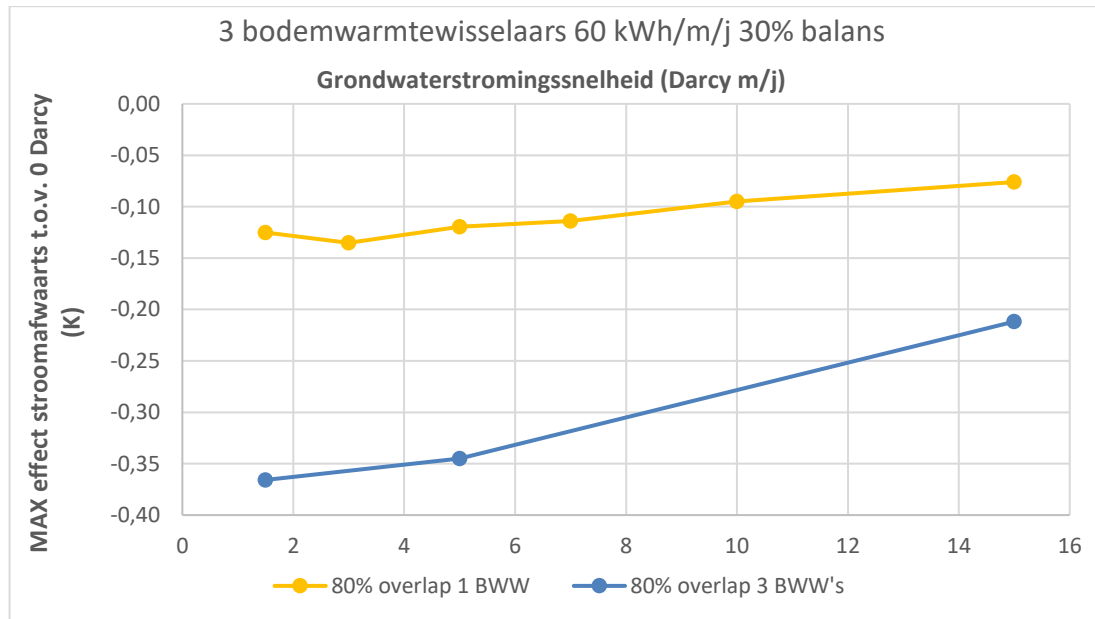
Figuur 19. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij 3 BWW's met onttrekking 240 kWh/m/j zonder balans, bij 80% overlap WVP.



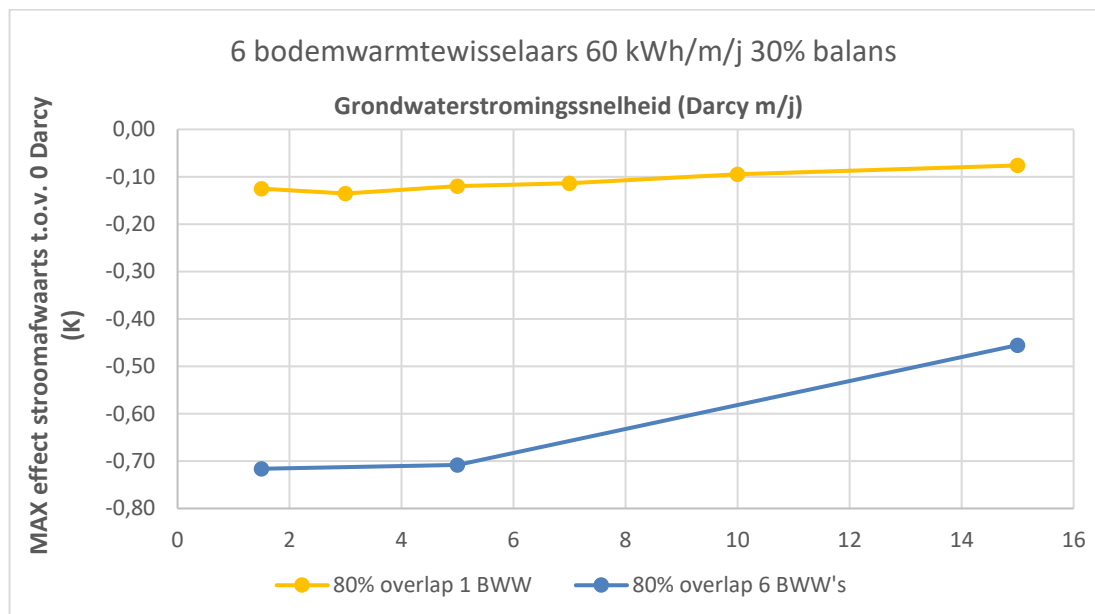
Figuur 20. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij 6 BWW's met onttrekking 240 kWh/m/j zonder balans, bij 80% overlap WVP.



Figuur 21. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij 3 BWW's met onttrekking 60 kWh/m/j en 30% balans, bij 80% overlap WVP.



Figuur 22. Overzicht effecten van GW-stroming stroomafwaarts bij 3 BWW's met onttrekking 60 kWh/m/j en 30% balans, bij 80% overlap WVP.



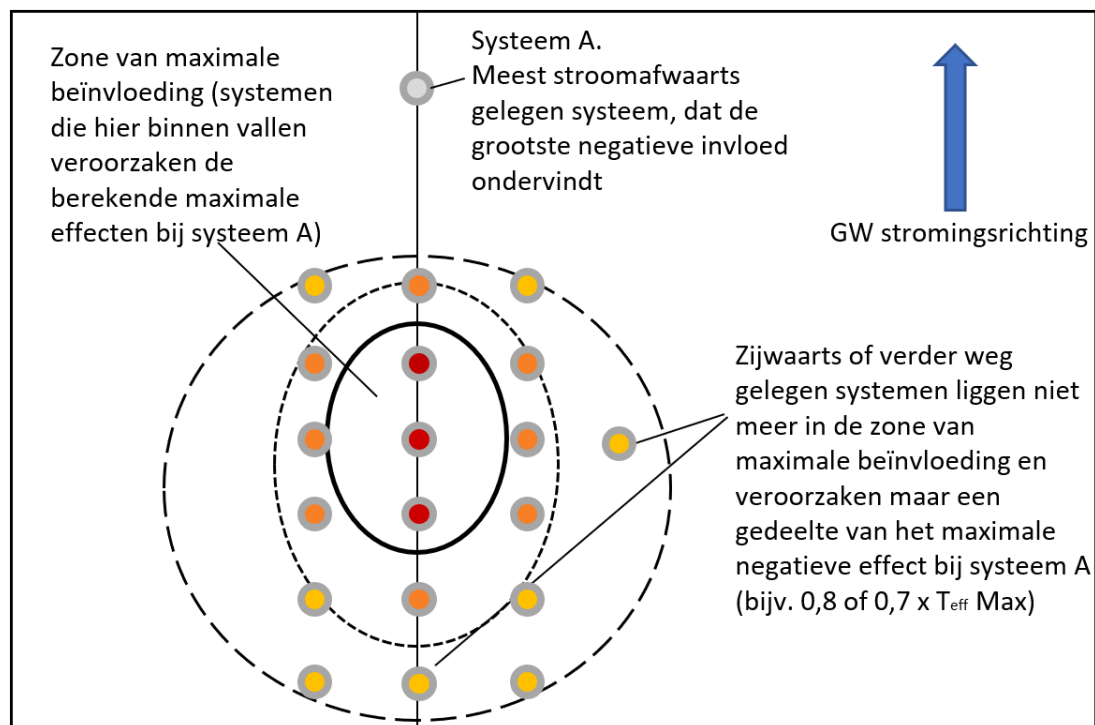
Uit deze analyse blijkt dat door het plaatsen van meerdere systemen in een cluster de negatieve effecten op afstand significant kunnen toenemen. Bij de beschouwde scenario's met 3 BWW worden de maximale negatieve effecten stroomafwaarts ook ongeveer 3x zo groot (factor tussen de 2,73 en 2,95 keer). Bij 6 BWW's is eenzelfde relatie zichtbaar, en zijn de effecten 5,72 tot 5,95 keer groter ten opzichte van de resultaten van één enkel systeem.

Uit deze resultaten volgt dat over langere simulatietijd de effecten stroomafwaarts bij kleine aantallen (<10) systemen grofweg lineair met het aantal gerealiseerde systemen zal oplopen. In gevallen met nog meer systemen (>6) zal de versterking logischerwijs afnemen, omdat

ruimtelijk gezien de BWW's dan dusdanig ver uit elkaar gaan liggen dat de invloedsgebieden stroomafwaarts steeds minder overlap vertonen.

Een schematische weergave van deze analyse, op basis van de resultaten van de uitgevoerde modellen, is uitgewerkt in Figuur 23. Als er uitgegaan wordt van een afstand van 8m tussen de individuele bodemwarmtewisselaars (die allemaal hetzelfde energieprofiel hebben), kunnen in een berekening van 20 systemen, de 19 meest stroomopwaarts gelegen systemen theoretisch 15x het maximale effect veroorzaken bij het meest stroomafwaarts gelegen systeem in de berekening.

Figuur 23. Schematisch voorbeeld van mogelijke ruimtelijke indeling 20 GBES (gekleurde rondjes) in zones (open cirkels) waar verschillende maten van effect veroorzaakt wordt op het meest stroomafwaarts gelegen systeem A. De donkerrode systemen veroorzaken ieder een maximale temperatuurverlaging ter hoogte van systeem A. De lichter gekleurde systemen liggen niet in de zone van maximale beïnvloeding en veroorzaken ieder een gedeelte van de maximale temperatuurverlaging ter hoogte van systeem A.



Alhoewel er door de afstand tussen de systemen een grens aan het aantal te sommeren systemen is om een cumulatief grondwaterstromingseffect te bepalen, blijken in veel gevallen met grotere aantallen GBES potentieel significante verschillen te ontstaan tussen wat ITGBES berekent, en de effecten die onder een bepaalde grondwaterstroming verwacht kunnen worden op basis van de FEFLOW modellen.

Aangezien er tot 20 systemen meegenomen kunnen worden in ITGBES, ligt het voor de hand deze resultaten ook te beschouwen bij de uiteindelijke keuze voor de grenswaarde van de toelaatbare extra negatieve effecten door grondwater.

5. Positieve grondwatereffecten op de eigen wisselaar

De in de vorige paragraaf beschreven negatieve thermische effecten die stroomafwaarts van een BWW kunnen optreden als gevolg van grondwaterstroming, worden veroorzaakt door de afstroming van de 'koude bel' die zich gedurende de winter vormt rond een BWW.

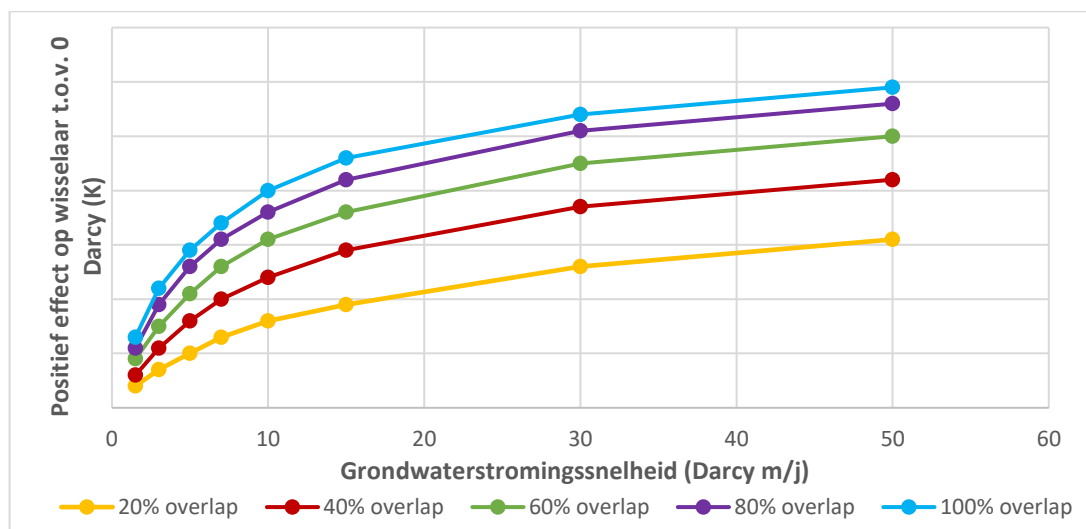
Wanneer er sprake is van grondwaterstroming op een locatie waar een bodemwarmtewisselaar geplaatst wordt, stroomt de koude bel (gedeeltelijk) af in de grondwaterstromingsrichting. Voor de bodemwarmtewisselaar zelf is de temperatuurverlaging dan kleiner dan in de situatie zonder grondwaterstroming, dit is in principe een positief effect (hogere temperatuur bij warmteonttrekking).

Worden alleen potentiële negatieve effecten beschouwd, dan is het veronderstelde effect van grondwaterstroming in vrijwel alle gevallen groot en zou ITGBES in veel gevallen niet toegepast kunnen worden omdat berekende temperatuureffecten onderschat zouden worden (ITGBES is dan niet meer conservatief). Wanneer ook rekening gehouden wordt met positieve effecten van grondwaterstroming, dan kan ITGBES in veel gevallen wel worden toegepast, aangezien de berekende temperatuureffecten dan niet onderschat worden.

Een voorbeeld van deze analyse is gegeven in Figuur 24. Deze figuur geeft de verwachte verhoging van de vloeistoftemperatuur voor een worst case energieprofiel, bij de verschillende grondwaterstromingsregimes. De netto positieve effecten ter hoogte van de bodemwarmtewisselaar ten opzichte van een situatie zonder grondwaterstroming, zijn het grootst voor de scenario's met de grootste overlap en de hoogste grondwaterstromingssnelheden.

Hierbij is wel het uitgangspunt dat bij ontwerp van de betreffende systemen niet ook al rekening is gehouden met effecten van grondwaterstroming. In de overgrote meerderheid van de ontwerpen zal dat ook het geval zijn. Een standaard toegepaste ontwerpmethodede als EED (Blomberg et al., 2019) houdt bijvoorbeeld geen rekening met grondwaterstroming.

Figuur 24. Voorbeeld van de te verwachten positieve effecten in K voor een GBES met worst case energieprofiel (240 kWh/m/j, 0% balans), als gevolg van de verschillende maten van gehanteerde grondwaterstroming.



6. Bepalen grenswaarde grondwaterstroming

In dit onderzoek is met behulp van het modelprogramma FEFLOW bepaald in hoeverre de mate van grondwaterstroming invloed heeft op de tussen verschillende GBES optredende thermische interferentie. De in dit rapport gepresenteerde resultaten geven een inzicht in de toepasbaarheid van de standaard ITGBES-rekentool die via het SIKB beschikbaar is gesteld, om thermische effecten te berekenen tot een maximum van 20 kleine GBES.

De modelresultaten geven, voor een groot aantal verschillende scenario's, de maximaal te verwachten cumulatieve negatieve temperatuureffecten (door afstroming van koude) op benedenstrooms gelegen systemen. Deels kunnen die negatieve effecten gecompenseerd worden door positieve effecten van grondwaterstroming ter hoogte van de wisselaars van de systemen zelf. Uit die combinatie van positieve en negatieve effecten is bepaald wat het totale negatieve temperatuureffect is. Om op basis van dit totale negatieve temperatuureffect te beslissen of ITGBES wel of niet toegepast mag worden, moet worden vastgesteld hoe groot dit door grondwaterstroming veroorzaakte netto temperatuureffect mag zijn.

In overleg met de klankbordgroep is een grenswaarde van -0,5K gekozen. Dit betekent dat een additionele temperatuurverlaging bij een GBES door optredende grondwaterstroming minder dan -0,5K nog wordt geaccepteerd. Indien een systeem bij een bepaalde mate van grondwaterstroming mogelijk een groter netto negatief effect ondervindt, is ITGBES niet zonder meer toepasbaar.

6.1. Toetstabel

De resultaten van de modelberekeningen zijn uitgewerkt tot een tabel met temperatuureffecten voor een groot aantal modelscenario's (diverse energiestenario's, verschillende grondwaterstromingssnelheden, verschillende overlap met pakket waarin grondwaterstroming optreedt). Hierbij zijn de negatieve effecten van individuele systemen gesommeerd tot een maximum van 20 systemen. Vervolgens is met het gekozen temperatuurcriterium (effect grondwaterstroming < -0,5K) bepaald voor welke van deze situaties de grenswaarde wel of niet overschreden wordt.

Om de gedetailleerde toetstabel praktisch hanteerbaar te maken is deze vereenvoudigd. Doordat bijvoorbeeld bij bepaalde energiestenario's en aantallen systemen ITGBES nooit of juist altijd toegepast kan worden, zijn deze samengevoegd tot één klasse in de tabel.

Andere doorgevoerde vereenvoudigingen zijn:

- De basis voor het bepalen van grondwaterstromingseffecten in de tabel is de gemiddelde energie-onttrekking en gemiddelde energietoevoer (in kWh/m/j) van alle systemen in een berekening.
- Het diepte interval wat beschouwd wordt is de gemiddelde einddiepte van alle in de analyse op te nemen systemen.

- Bij het opstellen van de tabel is ervan uitgegaan dat er binnen de individuele ontwerpen van de GBES'en geen rekening gehouden is met de positieve effecten van de lokale grondwaterstroming.
- De mate van overlap tussen BWW en WVP is niet meegenomen als factor in de uiteindelijke toetsingstabel. De verschillen tussen de overlap, positieve effecten op de locatie van de BWW zelf, en potentiële negatieve effecten op afstand, heffen elkaar tot op zeker hoogte op.
- Bij de sommering van mogelijke cumulatieve effecten wordt niet gekeken naar posities van de systemen ten opzichte van elkaar of ten opzichte van de stromingsrichting. Er wordt gekeken naar het mogelijke maximale effect op het meest stroomafwaarts gelegen systeem gebaseerd op het totaal aantal systemen. Er is aangenomen dat alle andere systemen binnen een berekening het meest stroomafwaarts gelegen systeem kunnen beïnvloeden. Dit is een worst case benadering.

6.1.1. Grenswaarden grondwaterstroming, toepasbaarheid ITGBES

De uiteindelijke vereenvoudigde tabel met grenswaarden voor grondwaterstroming (Tabel 3) geeft voor verschillende klassen van energievraagpatronen aan hoeveel systemen er maximaal met ITGBES geanalyseerd kunnen worden. Binnen die grenzen geeft ITGBES dan een conservatieve berekening van negatieve temperatureffecten:

- Een ITGBES-berekening waarin 2 of 3 systemen worden beschouwd kan altijd worden uitgevoerd, ongeacht grondwaterstroming of energieprofiel.
- De ondergrens voor Darcy grondwaterstromingssnelheid is 1 m/j, daaronder kan ITGBES altijd worden toegepast.
- De bovengrens voor Darcy grondwaterstromingssnelheid is 18 m/j, daarboven kan ITGBES altijd worden toegepast.
- De ondergrens voor energie-onttrekking is 40 kWh/m/j, is de energieonttrekking minder 40 kWh/m/j dan kan ITGBES altijd worden toegepast, ongeacht de mate van energiebalans.
- Is de energie-onttrekking minder dan 80 kWh/m/j, en is de energiebalans tenminste 40%, dan kan ITGBES ook altijd worden toegepast.
- In de overige gevallen is ITGBES alleen toepasbaar als er niet meer systemen bij de beoordeling van interferentie worden beschouwd dan het maximum aantal systemen wat in de tabel is aangegeven. Overschrijdt het aantal systemen betrokken in een beoordeling het aantal gespecificeerd in Tabel 3, dan moet een meer gedetailleerde evaluatie van grondwatereffecten worden uitgevoerd. De kleur van de cellen in de tabel geeft globaal aan hoeveel systemen met ITGBES geanalyseerd kunnen worden (groen: 20; geel: 10 – 19; rood: 3 – 9).

Tabel 3. Geüpdate toetsingstabel bruikbaarheid ITGBES BUM BE bijlage 2. De getallen in de cellen geven de maximale hoeveelheid systemen weer, waarmee een berekening met een bepaald energieprofiel bij een bepaalde mate van grondwaterstroming nog uitgevoerd mag worden met de ITGBES-rekentool. Kleurcodes: Groen, ITGBES kan altijd worden toegepast; Geel: ITGBES kan worden toegepast voor 10 – 19 GBES; Rood: ITGBES kan worden toegepast voor 3 – 9 GBES.

Gemiddelde grootte systemen		Darcy grondwaterstromingsnelheid (m/j)							
Netto onttrekking (kwh/m/j)	Balans (%)	<1	≥1 & <2,5	≥2,5 & <4	≥4 & <6	≥6 & <9	≥9 & <13	≥13 & <18	≥18
≥160	<15		3	4	6	8	10	15	
	≥15 & <40		4	6	8	10	15		
	≥40 & <60		6	8	11	15			
	≥60		9	12	19				
≥80 & <160	<15		6	9	12	15			
	≥15 & <40		9	12	17				
	≥40 & <60		11	16					
	≥60								
≥40 & <80	<15		13	18					
	≥15 & <40		18						
	≥40								
<40	≥0								

De informatie die een initiatiefnemer zal moeten verzamelen om de toetsingstabel, en daarmee ITGBES, te kunnen gebruiken is:

- Het aantal systemen in de beoordeling van negatieve interferentie.
- Het gemiddelde energieprofiel (energieonttrekking in kWh/m/j + mate van balans) bepaald op basis van alle systemen in de berekening, afgerond naar een van de in de tabel opgenomen categorieën.
- Wanneer het aantal systemen in de beoordeling groter is dan het in de tabel genoemde minimale aantal voor het relevante energiescenario (kolom 1 – 2,5 m Darcy in de tabel) moet de Darcy grondwaterstromingsnelheid bepaald worden. Bijlage II beschrijft een procedure waarmee deze bepaling uitgevoerd kan worden.

Indien uit deze beoordeling van effecten van grondwaterstroming blijkt dat ITGBES niet direct toegepast kan worden dan zijn er twee mogelijke vervolgstappen:

1. Beoordeel de ligging van de systemen in samenhang met de grondwaterstromingsrichting en beoordeel of gemotiveerd afgeweken kan worden van Tabel 3 en ITGBES toch kan worden toegepast (Bijlage III geeft een voorbeeld).
2. Indien uit voorgaande stap blijkt dat ITGBES niet kan worden toegepast, dan moeten de effecten met behulp van een hydro-thermisch model (zoals FEFLOW) bepaald worden.

6.2. Disclaimer

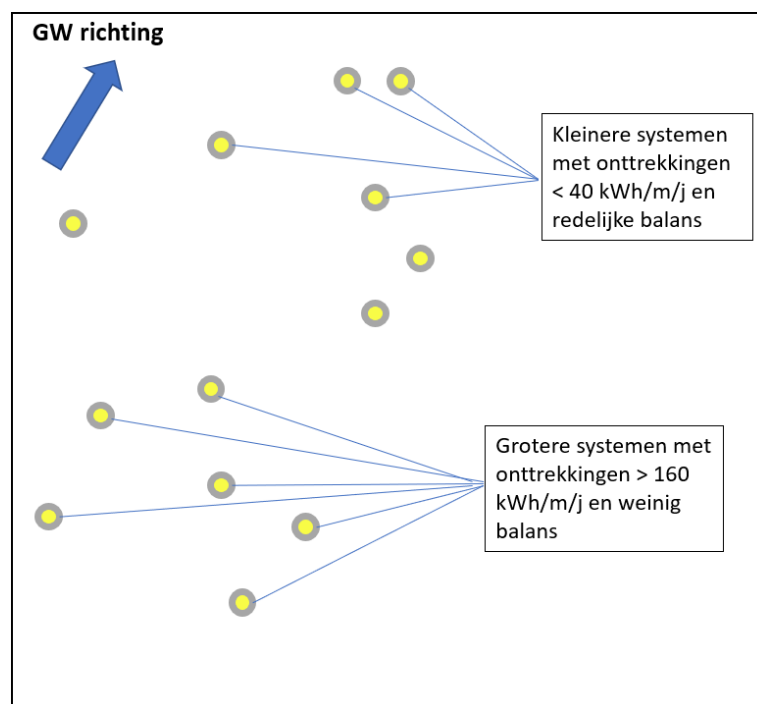
Met de in dit rapport gepresenteerde nieuwe toetsingstabel voor grondwaterstroming kan op relatief eenvoudige wijze getoetst worden of de rekentool ITGBES toegepast mag worden. Uitgangspunt daarbij is dat ITGBES een conservatieve schatting van temperatuureffecten geeft. De in paragraaf 6.1 genoemde aannames die zijn gedaan om dit mogelijk te maken, introduceren echter mogelijke afwijkingen. Situaties waarbij de toetsingstabel de in ITGBES optredende ‘extra’ effecten door de aanwezigheid van grondwaterstroming onderschat zullen niet vaak voorkomen (globale schatting, maximaal 5% van de situaties), maar zijn door een aantal van de toegepaste vereenvoudigingen in de methodiek niet uit te sluiten.

Een ‘foute beslissing’ zou bijvoorbeeld kunnen ontstaan in een situatie waarin er grote variatie is in de verschillende energieprofielen, waarbij de systemen met een kleinere energievraag (nieuwere woningen) overwegend stroomafwaarts gelegen zijn (Figuur 25).

Het kan dan voorkomen dat het ‘gemiddelde energieprofiel’ van de berekening de negatieve effecten op afstand veroorzaakt door de stroomopwaarts gelegen grotere systemen onderschat, terwijl positieve effecten op de kleinere systemen worden overschat. ITGBES zal in dat geval geen veilige (conservatieve) schatting van negatieve temperatuureffecten geven.

De gebruikers van ITGBES en de toetsingstabel grondwaterstroming dienen per project altijd af te wegen of de specifieke situatie gebruik van de toetsingstabel grondwaterstroming en ITGBES toestaat.

Figuur 25. Schematisch voorbeeld van ruimtelijke indeling GBES, waarbij het totale aantal systemen kleiner is dan het maximale aantal in de toetsingstabel voor deze situatie, maar waarbij enkele systemen mogelijk alsnog een te groot negatief temperatuureffect zouden kunnen ondervinden.



7. Samenvatting en Conclusies

De thermische interferentie die op kan optreden tussen bodemenergiesystemen moet binnen acceptabele grenzen blijven. In de praktijk wordt tussen gesloten bodemenergiesystemen (GBES) een cumulatief temperatuureffect van -1,5K toegelaten. Bij de melding of vergunningaanvraag van een nieuw aan te leggen GBES-systeem wordt dit door de initiatiefnemer aangetoond door een effectenberekening. Om deze effectenberekeningen mogelijk te maken is door het SIKB een geautomatiseerde tool (Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen, ITGBES, Groenholland 2020) beschikbaar gesteld, voor de berekening van temperatuureffecten tussen gesloten bodemenergiesystemen met een bodemzijdig vermogen tot maximaal 70 kW en voor situaties waarin maximaal 20 van deze systemen in een gebied aanwezig zijn.

Bij transport van warmte in de bodem spelen twee processen: warmtetransport door geleiding (temperatuurverschillen) en warmtetransport door grondwaterstroming (massatransport). Rekenmethoden voor gesloten bodemwarmtewisselaars, waaronder standaard ontwerpmethoden en ook de interferentieberekening van ITGBES, nemen grondwaterstroming niet mee als warmtetransportmechanisme. Daarmee is de vraag tot welke mate van grondwaterstroming een rekenmethode die alleen met warmtetransport door geleiding rekent, toegepast mag worden. In de praktijk wordt bij ontwerp van GBES systemen aangenomen dat de effecten van grondwaterstroming positief zijn. Voor de berekening van temperatuureffecten op andere systemen (interferentie) kan grondwaterstroming echter een versterkend effect hebben.

Bij het ontwikkelen van de eerste versie van de interferentiemethode (Groenholland, 2011) is een toetstabel voor toepasbaarheid onder grondwaterstromingregimes opgesteld. In die tabel is met name gefocust op de afwijking die grondwaterstroming veroorzaakt ter plaatse van een bodemwarmtewisselaar zelf. Na het vernieuwen en automatiseren van de methode om interferentie te bepalen medio 2020, is aansluitend in 2021 ook een nieuwe analyse van de effecten van grondwaterstroming gemaakt. Bij deze herijking van de analyse van grondwaterstromingseffecten zijn de volgende aspecten betrokken:

- Toepassen van een nieuw geavanceerd numeriek model (FEFLOW) waarmee bodemwarmtewisselaars expliciet kunnen worden gemodelleerd. Hierdoor worden de effecten van grondwaterstroming realistischer benaderd.
- Actualisatie van de gekozen "worst case" op basis van de evaluatie van gegevens uitgevoerd bij het ontwikkelen van ITGBES (rapport GHNL180760).
- Naast het berekenen van effecten in een "worst case" energienscenario is ook het beschouwen van andere cases relevant. Hiermee wordt een betere differentiatie van grenswaarden beoogd waarmee duidelijker inzichtelijk wordt wanneer de ITGBES-methode gebruikt kan worden en wanneer er een complex grondwatermodel opgezet dient te worden.
- Heroverweging van het toe te passen temperatuurcriterium, waarbij het eenvoudige interferentiemodel (ITGBES) niet meer toepasbaar is omdat de effecten van grondwaterstroming te groot zijn.

- Uitbreiden van de analyse van één enkele verticale bodemwarmtewisselaar naar scenario's met drie en met zes bodemwarmtewisselaars.
- Uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse voor geselecteerde thermische bodemparameters:
 - Effect van warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (1,5 ; 2,0 ; 2,5 W/mK)
 - Effect van warmtecapaciteit bodem (2,25 ; 2,5 ; 2,75 MJ/m³K)

In dit rapport zijn de resultaten van deze herijking gepresenteerd. Op basis van de resultaten is een nieuwe toetstabel grondwaterstroming ontwikkeld. Deze toetstabel geeft aan, voor verschillende energievraagpatronen, onder welke voorwaarden van aantal te beoordelen systemen en mate van grondwaterstroming ITGBES toegepast mag worden.

De conclusies zijn onder andere:

- Het uitgangspunt met betrekking tot ongestoorde bodemtemperatuur geen effect op de resultaten heeft.
- Simulatieduur van 10 jaar voor scenario's met geringe mate van grondwaterstroming te kort is, de simulatieduur is voor die scenario's verhoogd.
- De diepteligging van het watervoerende pakket (ondiep of diep) de resultaten niet beïnvloedt.
- Warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem wel een effect heeft (bij een lage warmtegeleidingscoëfficiënt zijn de effecten wat groter), maar een lage warmtegeleidingscoëfficiënt wordt vooral in minder watervoerende (klei) pakketten gevonden. Voor watervoerende pakketten is de warmtegeleidingscoëfficiënt van 2,0 representatief en conservatief ten opzichte van hogere warmtegeleidingscoëfficiënt.
- Effecten van warmtecapaciteit zijn verwaarloosbaar.
- Negatieve effecten die een BWW op afstand kan veroorzaken zijn het grootst bij lage tot matige stromingssnelheden (1,5 – 5 Darcy).
- In berekeningen met meerdere systemen kunnen de potentiële negatieve effecten op afstand benaderd worden door de effecten van de individuele GBES te sommeren (tot een maximaal aantal van ca. 15 systemen, bij meer dan 6 systemen zorgt variatie in locatie en dispersie ervoor dat de effecten steeds minder optellen).
- Effecten op de locatie van de BWW's zelf zullen louter positief zijn, en hiervoor geldt dat deze groter worden naar mate de stromingssnelheid ook groter wordt.

Op basis van al de resultaten is een nieuwe toetsingstabel opgesteld. Hierin kan aan de hand van de gemiddelde energiebehoeften van de te beoordelen systemen en de lokale grondwaterstromingssnelheid afgelezen worden tot en met hoeveel systemen ITGBES toegepast kan worden.

Gezien er een aantal vereenvoudigingen zijn doorgevoerd op de dataset om de bruikbaarheid van de toetsingstabel te vergroten, is een disclaimer toegevoegd.

Referenties

Blomberg, T., Claesson, H., Eskilson, P., Hellström, G. & Sanner, B. 2019: Earth Energy Designer (EED).

Diersch, Hans-Jörg G., 2014: *FEFLOW – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*, Springer, 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., Claesson, J. 1988. Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer* 13: 149 – 165.

Groenholland 2020: GHNL 180760 ITGBES, Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen. Groenholland Geo-energiesystemen. https://www.sikb.nl/doc/GHNL%20180760_Rapportage.pdf.

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. Blomberg, T., Claesson, J., Eskilson, P., Hellström, G, Sanner, B. 2019. Earth Energy Designer - EED verion 4.2.

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.

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

Bijlage I: Verantwoording

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

Annelies de Graaf – SIKB (Opdrachtgever)

Alexander Obermeijer – RUD Utrecht

Charles Geelen – DHPA

Charles van der Pijl – Omgevingsdienst Haaglanden

Christian de Wit – Provincie Gelderland

Dirk van Scherpenzeel – Nathan

Hein van der Linden – Bergmans Bergeijk

Ine Flinkers – Gemeente s'Hertogenbosch

Jan Frank Mars – Bodem+

Leon van Bohemen – ITHO

Mariëtte Bilius – DCMR

Marijn Beekman – Giesbers

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

Wouter Wienk – RVO

Bijlage II Bepalen grondwaterstroming op projectlocatie

Om te bepalen of de ITGBES-rekentool voor het berekenen van thermische effecten tussen gesloten bodemenergiesystemen gebruikt mag worden, moet eerst worden vastgesteld of de op de locatie aanwezige grondwaterstroming binnen de vastgestelde grenzen valt. Deze grenswaarde (Tabel 3) is gebaseerd op de *Darcy* grondwaterstromingssnelheden, die worden uitgedrukt in m/j.

Voor het bepalen van de Darcy grondwaterstromingssnelheid (in meter per jaar) op een projectlocatie zijn een aantal basisgegevens nodig:

- De lokale grondwatergradiënt (ook wel verhang genoemd), bepaald uit het verschil in stijghoogte tussen twee meetpunten parallel aan de stromingsrichting en de afstand tussen deze twee meetpunten (in meter/meter).
- De horizontale doorlatendheid van het watervoerende pakket (meter/jaar; wordt de doorlatendheid in meter/dag gegeven dan wordt deze met 365 vermenigvuldigd).

De Darcy grondwaterstromingssnelheid wordt hieruit bepaald door de grondwatergradiënt, het verschil in stijghoogte tussen twee punten gedeeld door de afstand, te vermenigvuldigen met de doorlatendheid van het pakket:

$$q_{darcy} = \frac{\Delta h}{\Delta L} * K$$

Waar:

q_{darcy} : Darcy stromingssnelheid (m/jaar)

K : Hydraulische doorlatendheid (m/jaar)

Δh : Stijghoogteverschil tussen twee punten (m)

ΔL : Afstand tussen twee punten met stijghoogteverschil Δh (m)

Wanneer er meerdere watervoerende pakketten aanwezig zijn dan wordt de gemiddelde Darcy grondwaterstroming bepaald door het berekenen van het (met dikte van de lagen gewogen) gemiddelde te berekenen over de pakketten.

Bepalen horizontale doorlatendheid

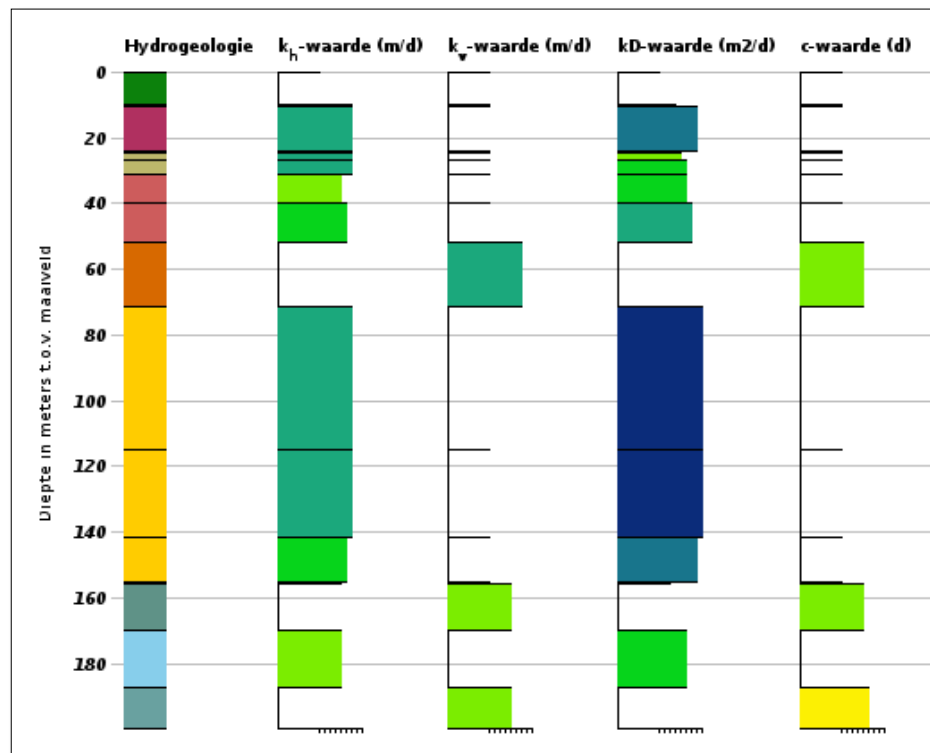
De meest eenvoudige en toegankelijke manier om de horizontale doorlatendheid van een watervoerende laag te benaderen is door deze voor een projectlocatie uit het REGIS II model af te lezen. Op basis van een database van geologische boringen geeft het REGIS II model geïnterpoleerde geohydrologische parameters voor een locatie. Dit model geeft voor iedere in het model gedefinieerde modellaag (e.g. watervoerend pakket of scheidende laag) die op de projectlocatie in de bodem aanwezig is een bereik van de voorspelde parameters (Figuur II 1).

Het is bij gebruik van deze informatie van belang de doorlatendheid voor de juiste diepte intervallen te verzamelen en te verwerken tot een representatieve (gemiddelde) waarde voor het betreffende watervoerende pakket of dieptetraject.

Samenvatting stappenplan bepalen horizontale doorlatendheid:

1. Ga naar <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>. Selecteer het BRO REGIS II v2.2 model en maak een appelboorprofiel op de projectlocatie.
2. Bepaal de gemiddelde einddiepte t.o.v. maaiveld van de te beschouwen systemen (zowel nieuw als al aanwezig), en stel deze in voor het appelboorprofiel.
3. De gebruikersinterface op het Dinoloket geeft een aantal grafieken die betrekking hebben op de eigenschappen van de geologische formaties die in de ondergrond te verwachten zijn op de locatie (zie Figuur II 1). De k_h -waarde (2^e van links in Figuur II 1) is de horizontale doorlatendheid nodig voor het berekenen van de Darcy grondwaterstromingssnelheid. De k_h - waarden worden gegeven als bereik (e.g. 5 – 10 m/d of 50 – 100 m/d). Ter vereenvoudiging dient van deze intervallen een gemiddelde waarde genomen te worden (e.g. lagen aangeduid als 5 – 10 m/d krijgen 7,5 als k_h -waarde). Lagen die wit zijn, zijn geclassificeerd als niet-watervoerend of scheidend, hierin treedt geen grondwaterstroming op.
4. Bepaal het totale percentage zandige (=watervoerend) lagen binnen het traject tot de einddiepte bepaald in stap 2, en bereken een met dikte gewogen gemiddelde voor de k_h -waarde over al deze watervoerende lagen.

Figuur II 1. Weergave interface REGIS II v2.2. Model waarop de geïnterpoleerde geohydrologische parameters voor de ondergrond kunnen worden opgevraagd. Meest linker kolom laat zien welke stratigrafische eenheden er aanwezig zijn op een locatie. Tweede kolom van links geeft de horizontale doorlatendheid weer. <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>



Bepalen stijghoogtegradiënt

De stijghoogten van het grondwater kunnen worden bepaald aan de hand van isohypsenbeelden. Dat zijn kaartbeelden waarop de lijnen van gelijke stijghoogten (isohypsen) van het grondwater staan weergegeven. De gradiënt van de stijghoogte is altijd loodrecht op de isohypsen (lijnen van gelijke stijghoogte).

Door de afstand tussen twee isohypsen nabij een projectgebied, loodrecht op de richting van de isohypsen te bepalen, kan een inschatting van de grondwatergradiënt (verhang) op een projectlocatie worden gemaakt.

Omdat de stijghoogtegradiënten kunnen verschillen per watervoerend pakket, is het van belang te bepalen welke formaties uit de geologische bodemopbouw tot welk watervoerend pakket behoren, en vast te stellen welke watervoerende pakketten onderdeel uitmaken van het relevante dieptetraject van de bodemwarmtewisselaars. Vervolgens dient voor ieder watervoerend pakket dat voorkomt binnen het traject (waar mogelijk) een stijghoogtegradiënt te worden bepaald.

Op de website *Grondwatertools* (<https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld>), kan voor iedere locatie een isohypsenkaart gecreëerd worden voor een bepaald jaar per watervoerend pakket. De watervoerende pakketten die op deze tool te selecteren zijn komen overeen met de schematisatie van het landelijk lagenmodel van het Nationaal Hydrologisch instrumentarium (NHI). Wanneer een selectie in een bepaald gebied gemaakt is op de isohypsentool, wordt een overzicht (keuzehup) gegeven waarin kan worden afgelezen welke LHM laag bij welke formatie hoort in dat gebied.

Op basis van deze indeling kan voor alle watervoerende pakketten binnen het dieptetraject van de BWW's op een projectlocatie de stijghoogtegradiënt berekend worden. Vervolgens dient hiermee wederom een met dikte gewogen gemiddelde bepaald te worden voor het gehele traject.

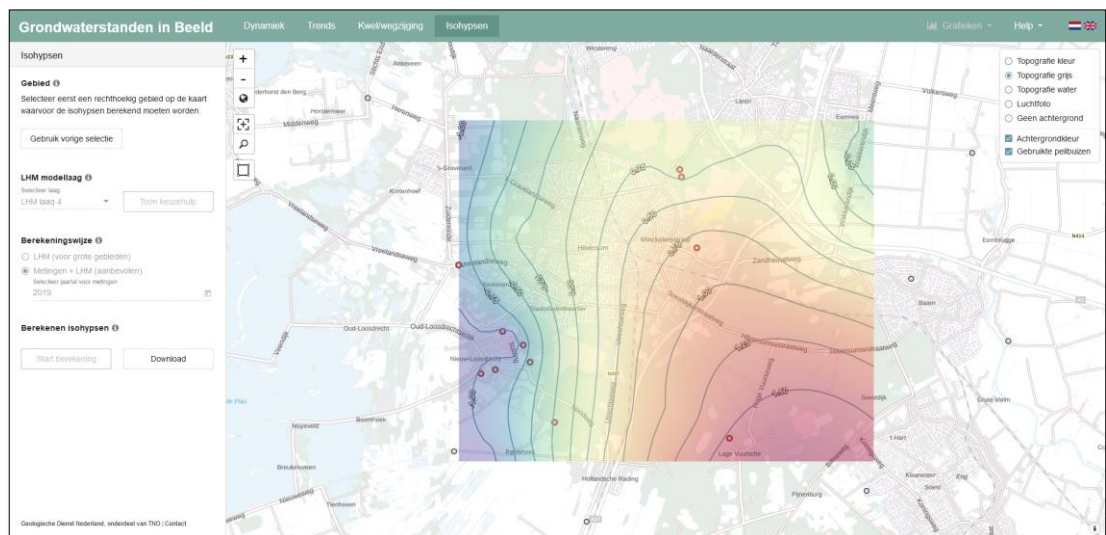
Samenvatting stappenplan bepalen stijghoogtegradiënt:

1. Ga naar het kopje 'isohypsen' op <https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld>. Navigeer op de kaart naar de projectlocatie en bepaal op basis van de keuzehulp op de isohypsentool en de eerder gebruikte geologische indeling o.b.v. het BRO REGIS II v2.2 model, welke watervoerende pakketten er voorkomen op het dieptetraject, en uit welke formaties deze zijn opgebouwd.
2. Gebruik de functie 'selecteer gebied' om een isohypsenkaart te maken voor een watervoerend pakket rondom de locatie. Hierbij dient over het algemeen een wat groter gebied gebruikt te worden (>10 km bij >10km) om succesvol een isohypsenkaart te kunnen genereren. Kies voor het moment van het isohypsenbeeld een zo recent mogelijke jaar waarop er genoeg data beschikbaar is (grijze punten op de kaart).
3. Wanneer het isohypsenbeeld geladen is (zie Figuur II 2), kan het stijghoogteverschil worden afgelezen. Het stijghoogteverschil wordt afgelezen uit de stijghoogten van de gebruikte lijnen (e.g. -3,0 en -2,0, het verschil is dan 1,0m in stijghoogte). De

stijghoogtegradiënt in (m/m) kan vervolgens berekend worden door het stijghoogteverschil te delen door de horizontale afstand tussen de twee lijnen (bijvoorbeeld 0,5m over ca. 360m, geeft een gradiënt van 0,0014 m/m).

4. Stappen 2 en 3 dienen herhaald te worden voor alle bij stap 1 bepaalde aanwezige watervoerende pakketten. Op locaties waar er sprake is van een groot aantal scheidende lagen betekent dit dat er voor 5/6 verschillende lagen een stijghoogtegradiënt bepaald moet worden. Wanneer er sprake is van een gedeeld watervoerend pakket (e.g. gedeeld 2^e & 3^e WVP) hoeft maar van één van de LHM lagen een isohypsenbeeld gegenereerd te worden.
5. Wanneer er voor alle bij stap 1 bepaalde watervoerende pakketten een stijghoogtegradiënt bekend is, kan een met dikte gewogen gemiddelde berekend worden over alle watervoerende lagen.
6. Samen met de gemiddelde doorlatendheid kan met deze waarde eenvoudig de gemiddelde Darcy grondwaterstromingsnelheid bepaald worden over het relevante bodemtraject.

Figuur II 2. Weergave interface Isohypsentool. Model waarmee op basis van gemeten stijghoogtes isohypsenpatronen voor een bepaalde locatie kunnen worden gegenereerd.

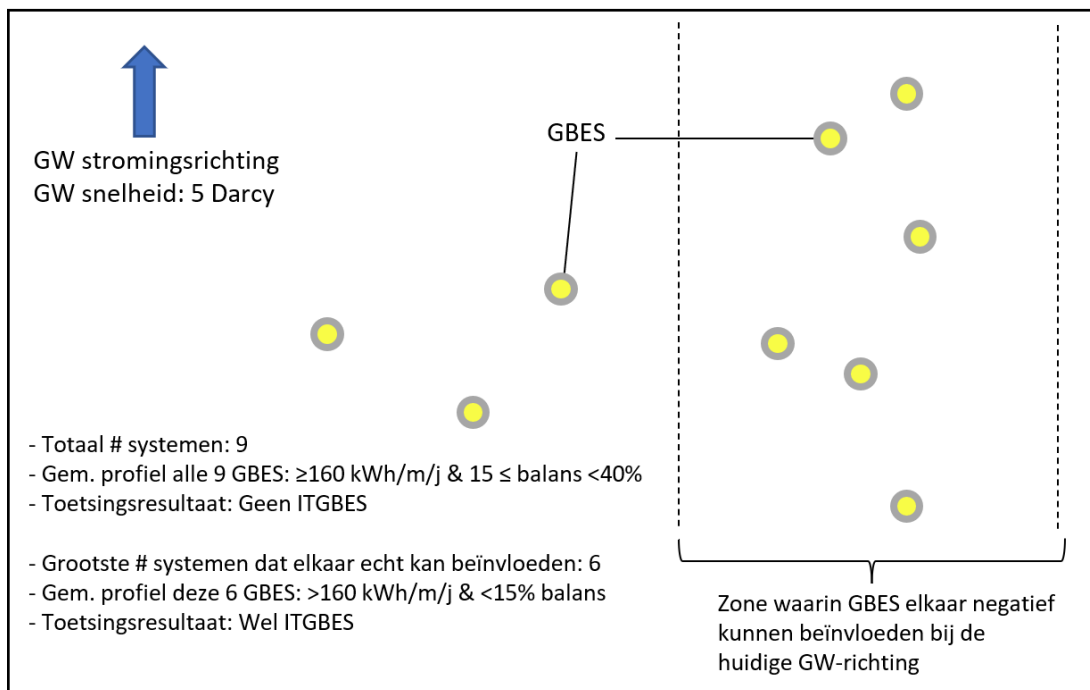


Bijlage III Beoordelen ligging systemen ten opzichte van grondwaterstromingsrichting

Bij het toepassen van Tabel 3, de toetstabel grenswaarden grondwaterstroming, kan blijken dat ITGBES niet zonder meer toegepast kan worden omdat er mogelijk te grote effecten van grondwaterstroming zijn. Dan is het mogelijk om allereerst te beoordelen hoe de systemen ten opzichte van de grondwaterstromingsrichting gesitueerd zijn. Bijvoorbeeld, wanneer alle systemen loodrecht op de grondwaterstromingsrichting gesitueerd zijn, zijn er geen benedenstrooms gelegen systemen en kan ITGBES toegepast worden.

Als stap voor het uitvoeren van een hydro-thermische modelstudie kan, met behulp van de ruimtelijke indeling van de GBES in kwestie op een locatie door de initiatiefnemer beargumenteerd worden dat ITGBES alsnog toepasbaar is. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur III.1.

Figuur III 1. Schematisch voorbeeld van mogelijke ruimtelijke indeling GBES, waarbij het totale aantal systemen groter is dan het maximale aantal in de toetsingstabel voor deze situatie, maar waarbij wel duidelijk is dat niet alle systemen elkaar negatief kunnen beïnvloeden.



Alhoewel er in totaal meer systemen in de berekening zijn meegenomen dan de in de toetsingstabel opgenomen waarde voor het specifieke scenario (gemiddeld energieprofiel ≥ 160 kWh/m/j met 15 – 40% balans en een grondwaterstromingssnelheid van 4 – 6 Darcy: max aantal systemen 8), is duidelijk dat niet alle systemen elkaar negatief kunnen beïnvloeden. Op basis van een afbeelding waarop de locaties van de systemen en de lokale grondwaterstromingsrichting zijn aangegeven kan beargumenteerd worden dat er maximaal 6 systemen zijn die elkaar negatief kunnen beïnvloeden. Uitgaand van dat kleinere aantal, en eventueel een nieuw gemiddeld energieprofiel, blijkt dat ITGBES in dat geval wel toepasbaar is.

Bijlage IV Validaties FEFLOW

Vergelijking FEFLOW en HST3D

Om te kijken in hoeverre het modelprogramma FEFLOW in staat is om de resultaten uit het eerdere onderzoek naar de effecten van grondwaterstroming op de gesloten bodemenergiesystemen te reproduceren, is allereerst een vergelijking uitgevoerd voor 2 modellen in een statische situatie waarbij er geen sprake is van grondwaterstroming.

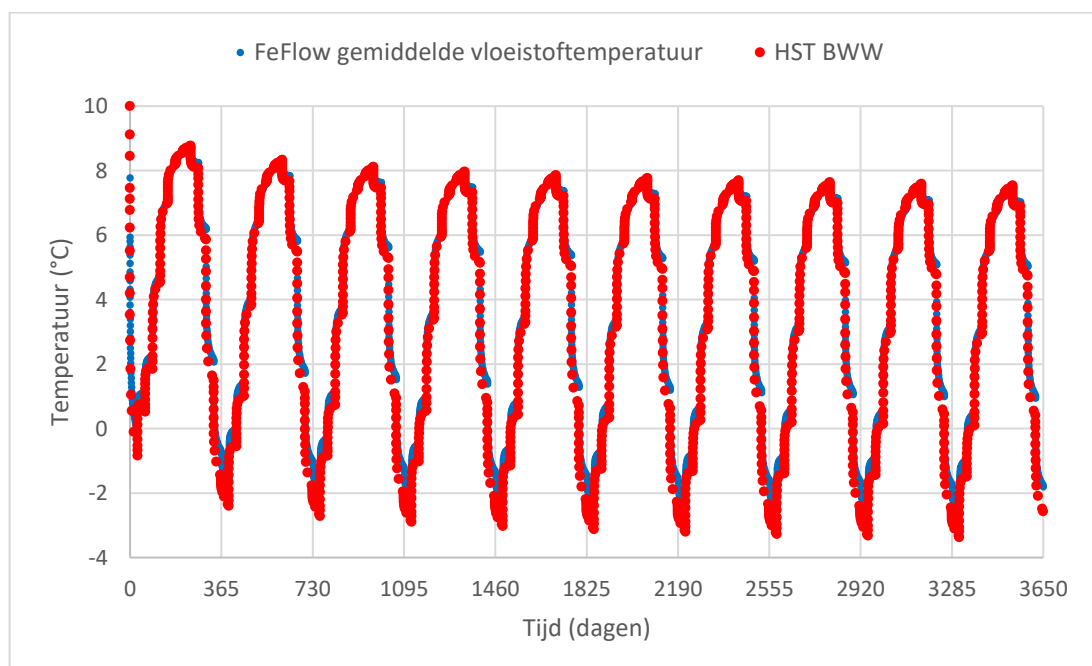
De modelparameters van het HST3D rekenmodel zijn hiervoor overgenomen en zo goed als mogelijk vertaald naar een model dat is opgebouwd in FEFLOW, waarbij vergelijkbare randvoorwaarden zijn ingesteld. De simulatieduur is evenals bij het HST3D model gesteld op 10 jaar.

Voor de vergelijking zijn de uitkomsten gebruikt van een model met de maximale energieonttrekking van 130 kWh/m/j, dit was voor het onderzoek uit 2011 het “worst case” scenario. Deze is in HST3D ingevoerd als een puntbron met een maandelijks energieprofiel in Joules per seconde (J/s) welke voor een periode van 730 uur geldt.

In het FEFLOW-model is dit vertaald naar een energie-uitwisselingsprofiel voor de bodemzijdige kant van een warmtepomp die jaarlijks 13 MWh warmte aan de bodem onttrekt (verdeeld over een vaste maandverdeling) en verbonden is aan een enkele U-lus tot een diepte van 100 meter onder maaiveld.

Voor de validatie van het model zijn de uitkomsten van FEFLOW voor de temperatuur van de circulatievloeistof die de warmtepomp in en uitgaan gemiddeld, en vergeleken met de uitvoer voor “BWW” uit het HST3D model. De vergelijking van de uitkomsten van deze modellen is gegeven in Figuur IV 1.

Figuur IV 1. Vergelijking FEFLOW (gemiddelde vloeistoftemperatuur) en HST3D (BWW) voor 130 kWh/m/j warmteonttrekking.



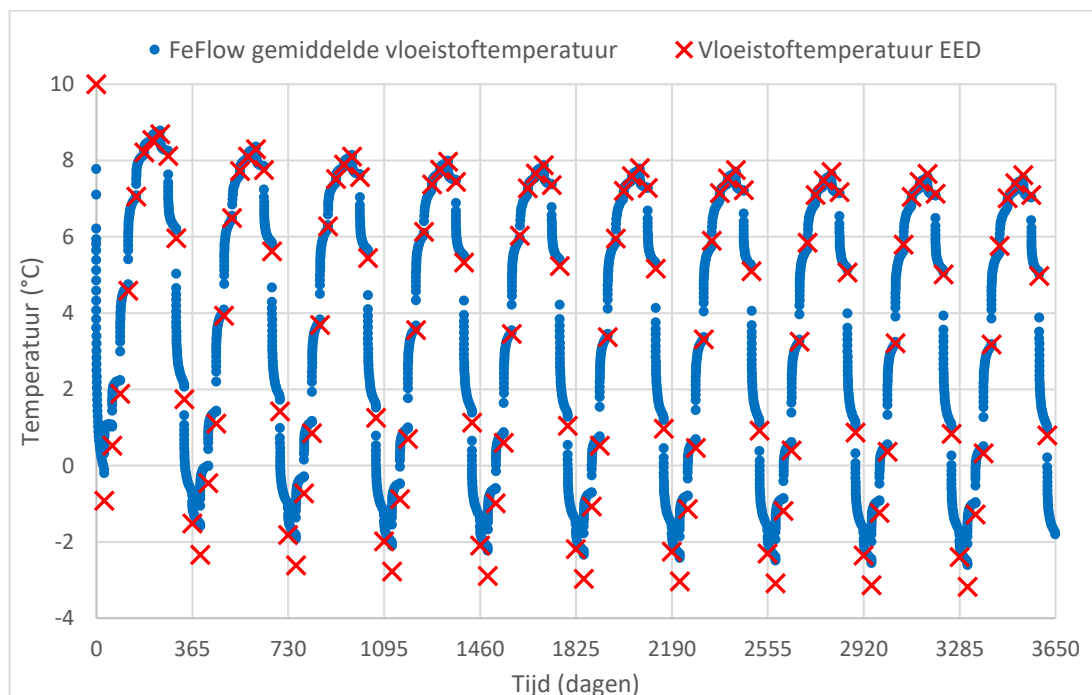
Het blijkt dat de oplossingen voor “BWW” welke afkomstig zijn uit het HST3D model en het gemiddelde van vloeistoftemperaturen uit FEFLOW significant overlappen. Wel zijn de uitkomsten voor HST3D “BWW” op de koudste momenten tot circa 1 graad koeler dan de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de vergelijkbare FEFLOW-berekening. Tijdens de periode van lagere warmteonttrekking is het verschil een stuk kleiner.

Vergelijking met Earth energy Designer

Het programma Earth Energy Designer (EED) bevat een model voor het doorrekenen van ontwerpen voor simpele verticale gesloten bodemenergiesystemen en wordt hiervoor veelvuldig gebruikt in Nederland. In het rekenmodel van Earth Energy Designer wordt geen rekening gehouden met de effecten van grondwaterstroming, de berekende uitkomsten van EED voor de vloeistoftemperaturen in de bodemwarmtewisselaars gaan dus uit van een statisch grondwatervolume.

De resultaten van vloeistoftemperaturen berekend met FEFLOW voor een model zonder grondwaterstroming zijn vergeleken met de resultaten van een gesloten bodemenergiesysteem dat door Earth Energy Designer wordt gegeven voor identieke invoer parameters. In Figuur IV 2 wordt de gemiddelde vloeistoftemperatuur berekend in FEFLOW uitgezet tegen de gemiddelde vloeistoftemperatuur uit EED aan het einde van iedere maand. Het valt op dat in deze vergelijking de uitkomsten voor de gemiddelde vloeistoftemperatuur in EED lager zijn dan in FEFLOW, voornamelijk in de winterperiode waarin hogere warmteonttrekkingen uit de bodem plaatsvinden.

Figuur IV 2. Uitkomsten gemiddelde vloeistoftemperatuur FEFLOW en EED modellen voor identieke casus (130 kWh/m/j).



Dit is uitgewerkt in Figuur IV 3, waarin de afwijking tussen de resultaten van de gemiddelde vloeistoftemperaturen van FEFLOW en EED aan het einde van iedere maand zijn uitgezet

tegen de tijd. De uitkomsten van het gemiddelde van de vloeistoftemperaturen van FEFLOW zijn over het algemeen goed in overeenstemming met de resultaten van EED, echter tijdens de perioden dat de grootste warmteonttrekking plaatsvindt (wintermaanden) kunnen de afwijkingen van de uitkomsten in FEFLOW tot circa 1 graad oplopen ten opzichte van de EED.

De in deze grafiek uitgezette afwijkingen blijven gedurende de simulatieduur jaarlijks ongeveer even groot, maar er is wel sprake van een iets aflopende trend van de afwijking.

Deze afwijkingen tussen de verschillende modellen zijn toe te schrijven aan het gebruik van het meer geavanceerd en complexe simulatieprogramma FEFLOW waarbij gebruik wordt gemaakt van een aparte bodemwarmtewisselaarsmodule.

Figuur IV 3. Berekende afwijkingen tussen EED en FEFLOW-modellen voor identieke casus.

