

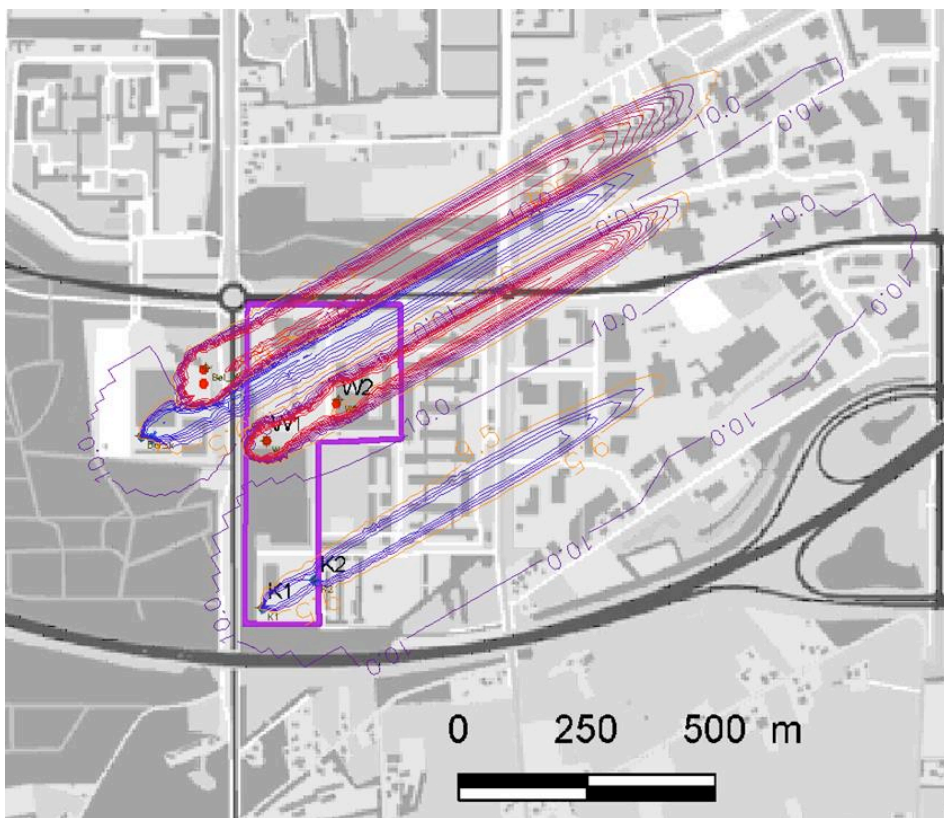
Slimme exploitatiestrategie voor bodemenergie bij hoge grondwaterstroomsnelheid

Joris Groot (Universiteit Utrecht), Martin Bloemendal (Tauw/TU Delft), Erik Donkers (Tauw)

Grondwaterstroming is een probleem bij de open winning van bodemenergie met warmte-koudeopslag. Hierdoor kunnen warm en koud water wegstromen van de bronnen. Bij systemen met meerdere warme en koude bronnen is hier iets aan te doen. Tauw bv en Universiteit Utrecht ontwikkelden een nieuw beheermodel.

Bij open bodemenergiesystemen vindt vaak (onnodig) energieverlies plaats als de grondwaterstroomsnelheid in het gebied hoog is. In dit onderzoek is voor bodemenergiesystemen met meerdere bronnen een rekenmodel ontwikkeld. Het model berekent een efficiënte beheerstrategie die het energierendement van de bronnen verbetert. Op basis van de grondwaterstroomsnelheid en de energievraag worden de infiltratie- en onttrekkingsvolumes voor de warme en koude bronnen bepaald. De hiermee geoptimaliseerde exploitatiestrategie leidt aantoonbaar tot minder energieverlies, lagere pompkosten en een hogere SPF (Seasonal Performance Factor) voor het systeem.

Bij het toepassen van open bodemenergiesystemen in watervoerende pakketten stroomt een deel van de opgeslagen energie met de natuurlijke grondwaterstroming weg van de bodemenergiebron (afbeelding 1).



Afbeelding 1. Verplaatsing van geïnfilteerde warmte en koude, ten gevolge van grondwaterstroming (een situatie in Apeldoorn) Het resultaat van 20 jaar pompen en infiltreren volgens de 50/50 beheerstrategie. De bronnen zijn niet compact gebleven, er zijn 'pluimen' van warm en koud water ontstaan.

Bij een hoge grondwaterstromingsnelheid gaat daardoor een substantieel deel of zelfs alle opgeslagen energie verloren, omdat de opgeslagen energie gedurende de opslagperiode (veelal een half jaar) buiten het aantrekkingsgebied van de betreffende bron stroomt. Dit effect heeft een negatieve invloed op de energieprestatie van een bodemenergiesysteem.

Bij grotere bodemenergiesystemen met meerdere warme en koude bronnen, kunnen deze in lijn met de grondwaterstroming worden geplaatst. Met de benedenstroomse bron kan de opgeslagen energie nuttig worden ingezet in plaats van dat hij verloren gaat. Hiervoor moet bekend zijn in welke verhouding in de boven- en benedenstroomse bronnen warmte en koude moet worden opgeslagen en teruggewonnen. In feite is dit ook de enige sturingsmogelijkheid die de exploitant heeft. In de huidige exploitatiestrategie wordt op jaarbasis het geïnfilterde en onttrokken volume gelijk verdeeld over alle bronnen. In dat geval stroomt dus een deel van de opgeslagen energie weg bij de laatste bronnen. Door zowel voor warmte als voor koude te spelen met de verhouding van opslag tussen de boven- en de benedenstroomse bron kan worden gestuurd op optimale brontemperatuur of het voorkomen van energieverlies. Hiervoor moet er rekening gehouden worden met de energievraag - die afhankelijk is van de buitentemperatuur - en de snelheid van de grondwaterstroming die het veranderen van de verhouding zullen beïnvloeden.

Het onttrekken en infiltreren van warm en koud water voor het koelen en verwarmen van bovengrondse ruimtes (gebouwen) is een grillig proces. Er is een sterke piek van warmteopslag in de zomer en warmteterugwinning in de winter en omgekeerd voor koude. De thermische opslag- en onttrekkingsfluxen variëren echter sterk en kunnen in het voorjaar en najaar wisselen van richting. Dit gegeven maakt het lastig om de verdeling tussen infiltreren en onttrekken van warmte en koude in boven- en benedenstroomse bronnen te bepalen.

Het doel van de studie was om inzicht te krijgen in de dynamiek van een bodemenergiesysteem (met meerdere warme- en koude-bronnen) in een gebied met een hoge grondwaterstromingsnelheid. Met inzicht in deze dynamiek kan een optimale exploitatiestrategie worden vastgesteld om energieverlies te verminderen en de SPF van het bodemenergiesysteem te verbeteren.

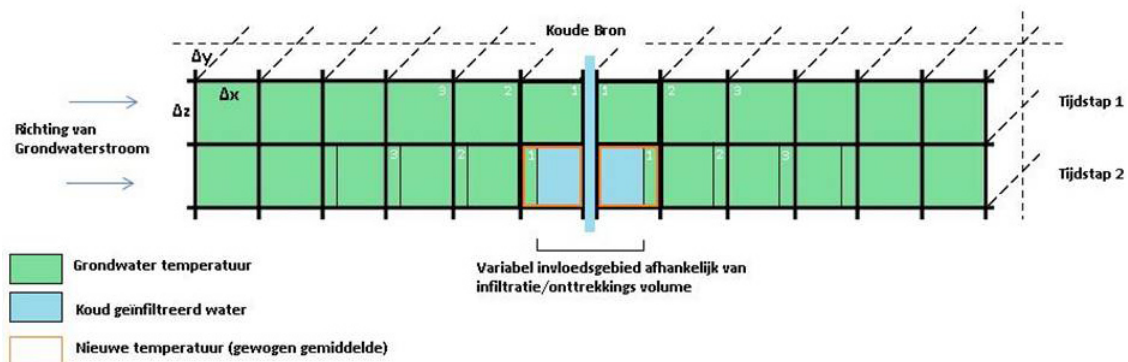
Methode

Het infiltreren en onttrekken van thermische energie in een bodem waar de grondwaterstromingsnelheid hoog is, beïnvloedt de lokale temperatuurverdeling in de bodem. Om de huidige exploitatiestrategie zo te veranderen dat de energieprestatie verbetert, moet bekend zijn na hoeveel tijd er hoeveel warmte van de bovenstroomse bron bij de benedenstroomse bron terecht komt. Evenzo voor koude. Het inzichtelijk maken van het transport van warmte en koude in de bodem onder invloed van het pompregime en de achtergrondstroming is gedaan met een analytisch model. De beschikbare numerieke modellen, bijv Modflow, zijn zo complex en vereisen zoveel rekenkracht dat ze in het dagelijks beheer geen rol kunnen spelen. Er is gekozen voor een analytisch model zodat de energievraag eenvoudig kan worden aangepast en het model ook als beheertool kan worden gebruikt. Doel was om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen en een optimale exploitatie dichterbij te brengen. De werking van het analytische model is getoetst met een numeriek model.

Analytisch model: bakjesmodel

Om de grondwatertemperatuur te berekenen is een zogenaamd bakjesmodel gemaakt in Excel. De grondwatertemperatuur wordt berekend in alle bakjes, waarbij het grondwater van de bovenstroomse bakjes langs de bronnen naar de benedenstroomse bakjes tot de modelrand stroomt (afbeelding 2). In

de bakjes waarin de bronnen zitten kan het infiltreren en onttrekken van warm en koud water worden gesimuleerd. In dit bakjesmodel wordt de thermische invloed berekend van geïnfiltreerde en onttrokken volumes water. De bakjes zijn ongeveer zo groot als het thermische invloedgebied van de bronnen. De bakjes bevatten een constant volume water met een variërende gemiddelde temperatuur.



Afbeelding 2. Bakjesmodel, schematisch overzicht met één koude bron

Het onttrekken en infiltreren van grondwater en de natuurlijke grondwaterstroming zorgen ervoor dat er water van bakje naar bakje stroomt. Hoeveel, in welke richting en met welke temperatuur is afhankelijk van de energievraag, de tijdsperiode waarover gerekend wordt en de geometrische afmetingen van de bakjes. De verplaatsing van water van een bakje naar een ander bakje, met een andere temperatuur, leidt tot een nieuwe gemiddelde temperatuur in allebei de bakjes. De nieuwe temperatuur in een bakje is gelijk aan het gewogen gemiddelde van de verschillende volumes met verschillende temperaturen die zich na infiltratie, onttrekking en doorstroming in de bakjes bevinden.

Analytisch model: energievraag

In het bakjesmodel is de energievraag opgelegd, er moet immers aan de energievraag worden voldaan. Om het model zo goed mogelijk te maken moet de tijdstap en de afmetingen van de bakjes juist worden gekozen. Hiervoor hebben we gebruik gemaakt van de Courant conditie [1]. Deze conditie zegt dat de verhouding tussen tijdstap en de afmeting van je ruimtelijke discretisatie van gelijke orde grootte moet zijn als de fysieke processen die je tracht te modelleren.

Analytisch model: tijdstap en afmetingen van de bakjes

Om ver genoeg in de toekomst te kunnen modelleren, maar niet te ver in detail te treden is als tijdsperiode ‘maanden’ gekozen. Deze keuze is gemaakt op basis van expert judgement van de resultaten van enkele proefberekeningen met tijdstappen van weken, maanden en kwartalen. De variatie in energievraag sluit het beste aan bij de tijdstap van een maand.

Voor de geometrische afmetingen van de bakjes leidt het voorgaande tot de orde grootte van het gemiddelde thermische invloedgebied van de bronnen per maand. Hiermee wordt ook een andere belangrijke vereenvoudiging zo goed mogelijk gemodelleerd. Infiltratie, onttrekking en achtergrondstroming worden voor iedere tijdstap berekend voor elk bakje. In het model wordt gewerkt met 1 rij bakjes (zie afbeelding 2). Het is dus een 1-dimensionaal model. Dit betekent dat water in het model alleen lateraal (in de richting van de grondwaterstromingsrichting) kan stromen; er is geen transversaal transport van warmte en/of koude. Er kan daarom alleen warm en/of koud water in de benedenstroomse rand van het model verloren gaan. De foutmarge die dit oplevert is geminimaliseerd door de afmetingen van de bakjes zo te kiezen dat de gemiddelde oppervlakte van de thermische straal vermenigvuldigd met de filterlengte van de bronnen gedurende een tijdstap overeenkomt met de

volumes van de bakjes. In andere woorden: het volume van de bakjes komt zo goed mogelijk overeen met het volume van het thermische-invloedgebied (NB in feite werkt het model met twee rijen bakjes of secties. Één sectie in het model berekend de temperatuur in de bodem voor de twee warme bronnen, en één sectie betekent dat voor de koude).

In de praktijk varieert de energievraag. Een hogere energievraag per tijdstap zorgt voor een grotere infiltratie en groter onttrekkingsvolume. Dit heeft een groter effect op de temperatuurverdeling in de ondergrond en dus op de afmeting van onze bakjes. Daarom hebben we het model gekalibreerd om de afmeting van de bakjes zo goed mogelijk kunnen aanpassen bij de wisselende energievraag.

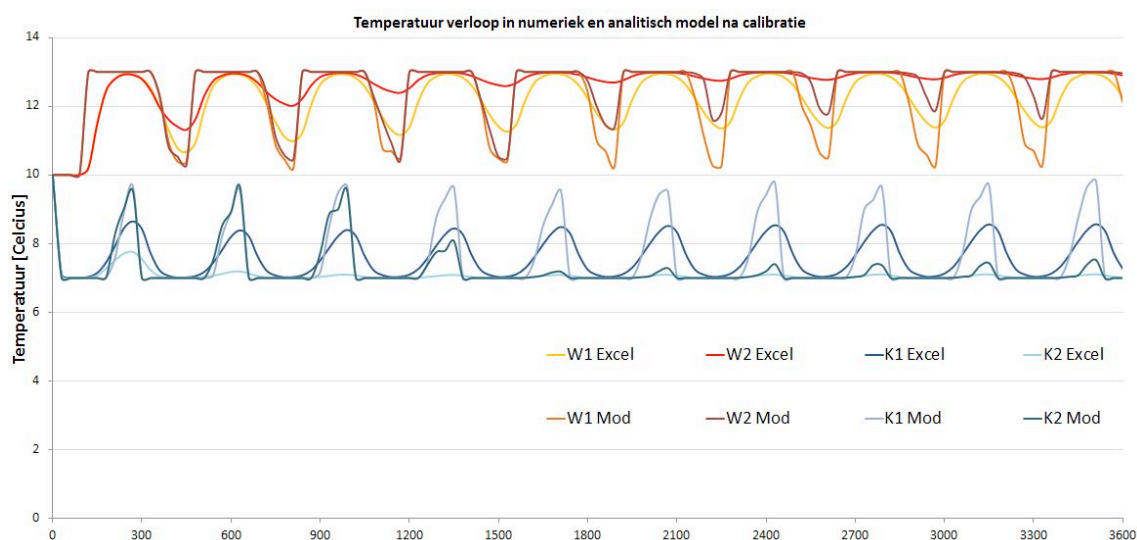
Kalibreren van het analytische model

De infiltratie- en onttrekkingsdebieten zijn voor wisselende energievraagscenario's gesimuleerd in een numeriek grondwaterstromingsmodel (Modflow) en in het analytische model. Hierbij zijn de validatieparameters (de afmetingen van het bakje) zodanig aangepast dat de uitkomsten van beide modellen goed overeenkomen. Er zijn twee typen testsimulaties uitgevoerd waarbij met automatische solver functie van Excel de afmeting van de bakjes is bepaald om een zo goed mogelijke "fit" te krijgen.

1. Bij testsimulatie 1 werd gedurende 1 jaar warm water geïnfiltreerd. Hierna werd 9 jaar niets gedaan. De warme bel moet in beide modellen op hetzelfde moment bij de benedenstroomse warme bron aankomen.

2. In de tweede testsimulatie werden gedurende 10 jaar maandelijks realistische hoeveelheden warmte en koude geïnfiltreerd en onttrokken, waarbij het verloop van de temperatuur in de bronnen in beide modellen zo goed mogelijk overeen moet komen.

Het verschil in het temperatuurverloop in de bronnen tussen de modellen was gemiddeld 0,4 °C (afbeelding 3). Op basis van deze kleine temperatuurverschillen en de goede 'fit' werd gesteld dat het bakjesmodel dus een goede weergave is van de temperatuur in de bodem. Het meer grillig verloop van de temperaturen uit Modflow is te verklaren doordat de gridcellen en tijdstappen in modflow een stuk kleiner zijn dan in het analytische model, dat geeft dus een gedetailleerder beeld.



Afbeelding 3. Resultaat van testsimulatie 2 Overzicht van temperatuur en temperatuurverschil in de bodem volgens het bakjesmodel (Excel) en volgens Modflow (numeriek model).

Optimalisatie exploitatiestrategie

Door de hoge grondwaterstromingsnelheid stroomt er een bepaald volume per tijdstap door het aantrekkingsgebied van de bronnen. Er zijn verschillende optimalisatiestrategieën gevolgd. In alle gevallen werd gebruik gemaakt van de *Solverfunctie* van Excel om voor alle bedrijfstoestanden en verschillende klimaat- en energievraag scenario's de optimale strategie te vinden. Een greep uit de gevolge aanpakken:

3. minimaliseren van energieverlies benedenstrooms
4. minimaliseren van het energieverlies in een bepaalde temperatuurrange
5. minimaliseren van het pompvolume
6. sturen van het correctiepercentage op basis van natuurlijke grondwaterstromingssnelheid.

De laatstgenoemde aanpak bleek de beste strategie op te leveren. De effectiviteit ervan is goed verklaarbaar. Het totale volume dat jaarlijks onder invloed van de grondwaterstroom uit het aantrekkingsgebied van de benedenstroomse bronnen wegstroomt, wordt bij deze strategie onttrokken uit de benedenstroomse bron en na gebruik weer geïnfiltrerd in bovenstroomse bronnen. Dit wordt gedaan door infiltratie- en onttrekkingsdebiëten te variëren en slim te verdelen over de bronnen. Op deze manier wordt het geïnfiltrerde warme en koude water, dat dus een andere energiewaarde heeft dan het grondwater, zo goed mogelijk in het bodemenergiesysteem gehouden.

Resultaten

De verhouding tussen geïnfiltrerde en onttrokken volumes – in de huidige exploitatiestrategie 50/50 voor de bovenstroomse en de benedenstroomse bron – verschuift in de geoptimaliseerde exploitatiestrategie met minder dan 7% (afbeelding 4). Omdat het zulke grote hoeveelheden water zijn, zorgen deze procentueel kleine verschillen er toch voor dat een aanzienlijke hoeveelheid energie (warmte) binnen het aantrekkingsgebied van de bronnen blijft. En belangrijker nog: er treedt geen verstoring van benedenstroomse WKO-installaties op.

maand	Verwarmingsbedrijf				Koelbedrijf			
	W1 ont	W2 ont	K1 inf	K2 inf	W1 inf	W2 inf	K1 ont	K2 ont
januari	44%	56%	56%	44%	50%	50%	50%	50%
februari	44%	56%	57%	43%	50%	50%	50%	50%
maart	46%	54%	54%	46%	52%	48%	48%	52%
april	48%	52%	52%	48%	54%	46%	46%	54%
mei	49%	51%	51%	49%	55%	45%	45%	55%
juni	50%	50%	50%	50%	56%	44%	44%	56%
juli	50%	50%	50%	50%	56%	44%	44%	56%
augustus	50%	50%	50%	50%	56%	44%	44%	56%
september	48%	52%	52%	48%	54%	46%	47%	53%
oktober	46%	54%	54%	46%	52%	48%	48%	52%
november	45%	55%	55%	45%	51%	49%	49%	51%
december	44%	56%	56%	44%	50%	50%	50%	50%
gemiddeld	47%	53%	53%	47%	53%	47%	47%	53%

Afbeelding 4. Een optimale exploitatiestrategie Voorbeeld van een jaaroverzicht van de verdeling over boven- en benedenstroomse bronnen van infiltratie en onttrekken voor verwarming (linker plaatje) en koeling (rechter plaatje).

De nieuwe exploitatiestrategie reguleert het systeem zo dat in de winter meer warmte uit de benedenstroomse warme bron wordt onttrokken en meer koude in de bovenstroomse koude bron wordt geïnfiltrerd. In de zomer wordt juist meer koude uit de benedenstroomse koude bron onttrokken en meer warmte in de bovenstroomse warme bron geïnfiltrerd. Door het toepassen van deze methode heeft er een significante vermindering in energieverlies plaatsgevonden – circa 20-25% ten opzichte van

de 50-50 strategie, wat neerkomt op 2-3% van de totale vraag naar energie uit de bodem. Omdat het totaal verpompte volume omlaag gaat, daalt ook de benodigde elektrische energie voor de pompen met circa 2-3% per jaar. Afhankelijk van de energievraag stijgt de SPF van het bodemsysteem (dus van de bronnen, exclusief warmtepomp) met 1 tot 2 punten ten opzichte van de evenredige verdeling tussen boven- en benedenstreams.

De robuustheid van deze nieuwe exploitatiestrategie is getest door hem toe te passen op wisselende energievragen, waarmee extreme klimatologische omstandigheden worden gesimuleerd. In achttien verschillende energievraagscenario's bleek steeds dat de besparingen en de SPF gemiddeld 0,7 hoger waren dan met de huidige exploitatiestrategie. De conclusie is dat de geoptimaliseerde exploitatiestrategie een redelijk robuuste beheerstrategie is. Ook bij variërende energievraag blijft de verbetering ten opzichte van de huidige strategie bestaan. Het resultaat geeft wel aan dat bijsturing van de energieverdeling tussen boven- en benedenstreamse bronnen op basis van werkelijke energievraag nog meer kan bijdragen rendementsverbetering.

Discussie en conclusie

In de simulaties in dit onderzoek is de infiltratietemperatuur constant gehouden. In werkelijkheid echter hebben de buitentemperatuur en het hydraulisch functioneren van het gebouwsysteem invloed op de infiltratietemperatuur. Afwijkingen van de gekozen constante temperatuur zullen de temperatuurverdeling in de bodem beïnvloeden. Dit betekent dat dan een andere verdeling nodig is voor de optimale exploitatiestrategie. Dit is een argument om dit model als beheerinstrument te gebruiken in de operationele fase. Zodoende kunnen de werkelijke infiltratie temperaturen worden meegenomen en kan de optimale beheerstrategie periodiek worden bijgesteld.

De energievraag bepaalt dus voor een belangrijk deel de te volgen strategie. Daarnaast spelen ook de grondwaterstroomsnelheid en de afstand tussen de bronnen een belangrijke rol. Uit simulaties blijkt dat verschillen in grondwaterstroomsnelheid vragen om andere verhoudingen voor infiltreren en onttrekken in boven- en benedenstreamse bronnen. Hoe groter de grondwaterstroomsnelheid, hoe meer de verhouding onttrekking/infiltratie afwijkt van de huidige exploitatiestrategie.

Behalve voor het uitstippelen van de optimale exploitatiestrategie is het model ook geschikt voor het managen van de bronnen in de gebruiksfase. Maandelijks kunnen de daadwerkelijk verpompte hoeveelheden grondwater en bijbehorende temperaturen in het model worden geïmporteerd en kan de beheerstrategie relatief eenvoudig worden *gefine-tuned*. In het model zijn de tijdstappen, de afstand tussen de bronnen, de diepte van de bronnen, de infiltratietemperaturen en de geohydrologische parameters als variabelen in te voeren. Dat maakt het bruikbaar als managementtool voor systeembeheerders van open bodemenergiesystemen in gebieden met hoge grondwaterstroomsnelheid.

Het analytisch model, voortgekomen uit dit onderzoek, laat zien hoe kleine veranderingen in de exploitatiestrategie bijdragen aan het verminderen van energieverlies en het verhogen van de SPF. Gezien de gebruiksvriendelijkheid van het model en de robuustheid van de geoptimaliseerde exploitatiestrategie is een goede stap gezet in het efficiënter maken van open bodemenergiesystemen met meerdere warme en koude bronnen in gebieden waar de grondwaterstroomsnelheid hoog is.

De basisgedachte achter de optimale beheerstrategie is simpel, waardoor de optimale verdeling tussen bovenstreams en benedenstreams infiltreren en onttrekken relatief eenvoudig te bepalen is. De meerwaarde van deze aanpak zit hem in het moment waarop compensatie voor grondwaterstroming wordt uitgevoerd. Juist omdat de natuurlijke dynamiek van bodemenergieopslag in het voor- en najaar

zijn meegenomen, kan er in bepaalde maanden van het jaar heel gericht worden gestuurd op optimaal gebruik van de opgeslagen warmte en koude.

De belangrijkste winst zit hem niet in verbeteringen van het systeem, maar in de implicaties voor het gebruik van de bodem. Waar er bij de 50-50 strategie op termijn benedenstrooms een enorme warme en koude pluim ontstaat die andere bodemenergiesystemen benedenstrooms belemmert of verstoort, is dat nu niet aan de orde. Er stroomt nog steeds enige thermische energie weg, maar dat is grondwater dat maar een enkele graad warmer of kouder is dan de achtergrondtemperatuur. Dat verklaart ook waarom het afstromende volume met maar 25% vermindert. Het is ook mogelijk om een strategie vast te stellen die geen afstroming meer toelaat, maar dan wordt het temperatuurverschil tussen de bronnen zo klein dat de warmtepompen heel veel extra water moeten rondpompen om aan de energievraag te voldoen.

Literatuur

1. Courant, R.; Friedrichs, K.; Lewy, H. (1928), "Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik", *Mathematische Annalen* 100 (1): 32–74.
2. Groot, J.H. (2013). *Optimizing energy storage and reproduction for Aquifer Thermal Energy Storage*. Msc-Thesis, Utrecht, Nederland.