

De verborgen kant van steden

Martin Bloemendaal¹

Open bodemenergiesystemen (ook bekend als Warmte-koudeopslag/WKO-systemen) leveren duurzame verwarming en koeling voor gebouwen. Door de verduurzaming van de energievoorziening zijn in de toekomst veel gebouwen in gematigde klimaten afhankelijk van bodemenergie. De ruimte die er in de bodem is voor de opslag van warmte is beperkt. Daarnaast is er een trade-off tussen het individuele rendement van een systeem en de toename in energiebesparing van een groter gebied als er meer systemen kunnen worden geaccommodeerd. Het is daarom belangrijk om de volledige potentie van de ondergrond op een duurzame manier te benutten voor bodemenergie. In mijn proefschrift 'The hidden side of cities' zijn methoden voor governance, ontwerp en planning van bodemenergiesystemen gepresenteerd. Om te bepalen waar in de wereld deze methoden nodig zijn, is een globale kaart ontwikkeld die op basis van ondergrond- en klimaatgegevens laat zien waar WKO kan worden toegepast. De resultaten laten zien dat in gebieden met veel gebouwen, verbeterde planning van bodemenergiesystemen ervoor zorgen dat meer systemen geplaatst kunnen worden dan in de huidige praktijk is toegestaan, waardoor er meer energie bespaard wordt.

Aanleiding en doel

Het energieverbruik van gebouwen bedraagt circa 40 % van het totale energieverbruik in Nederland. Bij het verduurzamen van het energiesysteem is het daarom belangrijk om duurzame technieken voor verwarmen en koelen te ontwikkelen en te implementeren, zoals bodemenergie (of Warmte-koudeopslag). Een belangrijk voordeel van bodemenergie is dat je het niet ziet of hoort. In Nederlandse steden kan het percentage gebouwen met een bodemenergiesysteem in de toekomst oplopen tot 25%. Bij een dergelijke grote rol voor de ondergrond is het belangrijk om vast te stellen op welke manier de volledige potentie van de ondergrond op een duurzame manier kan worden benut.

Bodemenergiesystemen concentreren zich in stedelijke gebieden waar veel gebouwen dichtbij elkaar staan. De verspreiding van warm en koud grondwater rondom de bronnen van bodemenergiesystemen varieert in de Nederlandse praktijk tussen de 20 en 150 m en hangt af van de eigenschappen van de ondergrond en de energievraag van het gebouw. De warmte komt door die verspreiding vaak onder het perceel van de nabijgelegen gebouwen. Het overlappen van warme en koude zones in de onder-

¹ Technische Universiteit Delft & KWR Watercycle research Institute (j.m.bloemendaal@tudelft.nl).

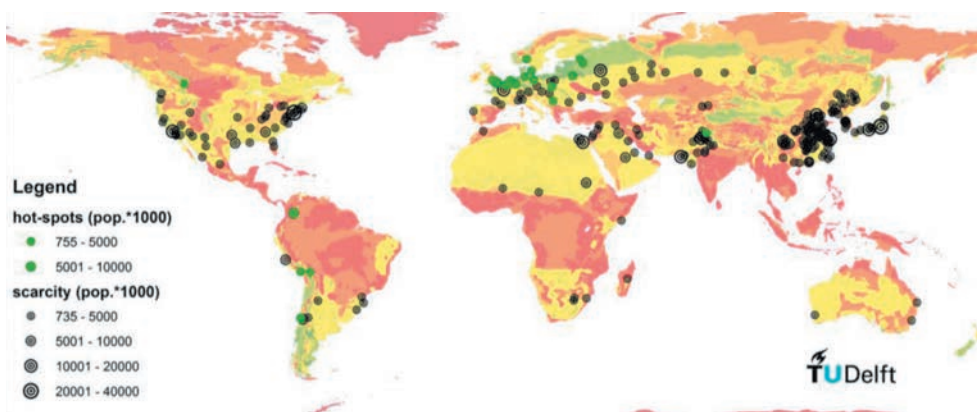
grond vermindert het rendement en moet dus worden voorkomen. Daarom wordt de vergunde capaciteit van bodemenergiesystemen in de huidige praktijk overgedimensioneerd en daarnaast worden de bronnen op te grote, veilige afstand van elkaar gehouden, wat ervoor zorgt dat bodemenergiesystemen de ruimte in de bodem niet volledig benutten. De veiligheidsmarge volgt uit onzekerheden over de weersomstandigheden, het klimaat en het gebruik van gebouwen, wat tot gevolg heeft dat de energievraag van een gebouw erg lastig te voorspellen is. Tegelijkertijd is het ook erg lastig en duur om inzicht te krijgen in de verspreiding van warm en koud grondwater in de bodem. Dit geeft aan dat het in stedelijk gebied een uitdaging is om zoveel mogelijk bodemenergiesystemen in de ondergrond te accommoderen en tegelijkertijd het individuele rendement van deze systemen zo hoog mogelijk te laten zijn. Zoals bij vele gemeenschappelijk natuurlijke hulpbronnen (in de internationale literatuur omschreven als common pool resources (CPR)) is er een trade-off tussen het belang van de individuele gebruiker en het collectief: Meer bodemenergiesystemen toelaten vermindert de totale uitstoot van broeikasgassen in dat gebied; maar tegelijkertijd wordt het rendement van de individuele systemen daardoor mogelijk slechter. Dus in gebieden met veel vraag naar bodemenergie is een institutioneel en technisch kader nodig om bodemenergiesystemen te organiseren en aan te leggen.

Om optimaal gebruik van de bodem te garanderen, moeten zowel het ontwerp als beheer en organisatie van deze systemen worden verbeterd om zo optimaal en doelmatig gebruik van de bodem te garanderen. Deze uitdaging leidde tot het volgende doel van mijn promotieonderzoek:

Het vaststellen van ontwerpmethoden en organisatieprincipes die leiden tot optimaal en doelmatig gebruik van de bodem door bodemenergiesystemen in (drukke) stedelijke gebieden.

Resultaten

Gezien de wereldwijde verduurzaming van de energievoorziening is het te verwachten dat de bovengenoemde problemen ook in andere landen zullen ontstaan. Om vast te stellen waar in de wereld de behoefte is aan een technisch en organisatorisch kader voor het plannen van bodemenergiesystemen, heb ik in hoofdstuk 2 van mijn proefschrift een kartering uitgevoerd van de globale potentie van bodemenergie. Hiervoor is een methodiek ontwikkeld om voor sterk variërende omstandigheden de geschiktheid voor bodemenergie waar ook ter wereld te bepalen. Deze potentie hangt af van de aanwezigheid van watervoerende zandlagen en geschikte klimatologische omstandigheden. Om te voorkomen dat de ondergrond niet over langere termijn wordt afgekoeld of opgewarmd, is het belangrijk dat de energievraag voor verwarming en koeling ongeveer gelijk zijn. Hierdoor zijn vooral gematigde klimaten met een warme en koude periode in het jaar geschikt. In het onderzoek is ook rekening gehouden met klimaatverandering op basis van de IPCC-klimaatscenario's. Met behulp van gegevens over verstedelijking zijn de toekomstige "hot-spots" voor bodemenergie vastgesteld. Hieruit bleek dat er in veel Noord-Amerikaanse, Europese en Aziatische steden potentie is voor bodemenergie en de energievraag de aanwezige ruimte in de bodem kan overschrijden (afbeelding 1).



Afbeelding 1. Geschiktheid en hot-spots voor de toepassing van open bodemenergiesystemen. Groen: bodem en klimaat zijn geschikt, rood: bodem en/of klimaat zijn ongeschikt. Hot spot: steden in zeer geschikte gebieden, Scarcity: steden op klimatologisch geschikt, maar geohydrologisch matig geschikte plekken.

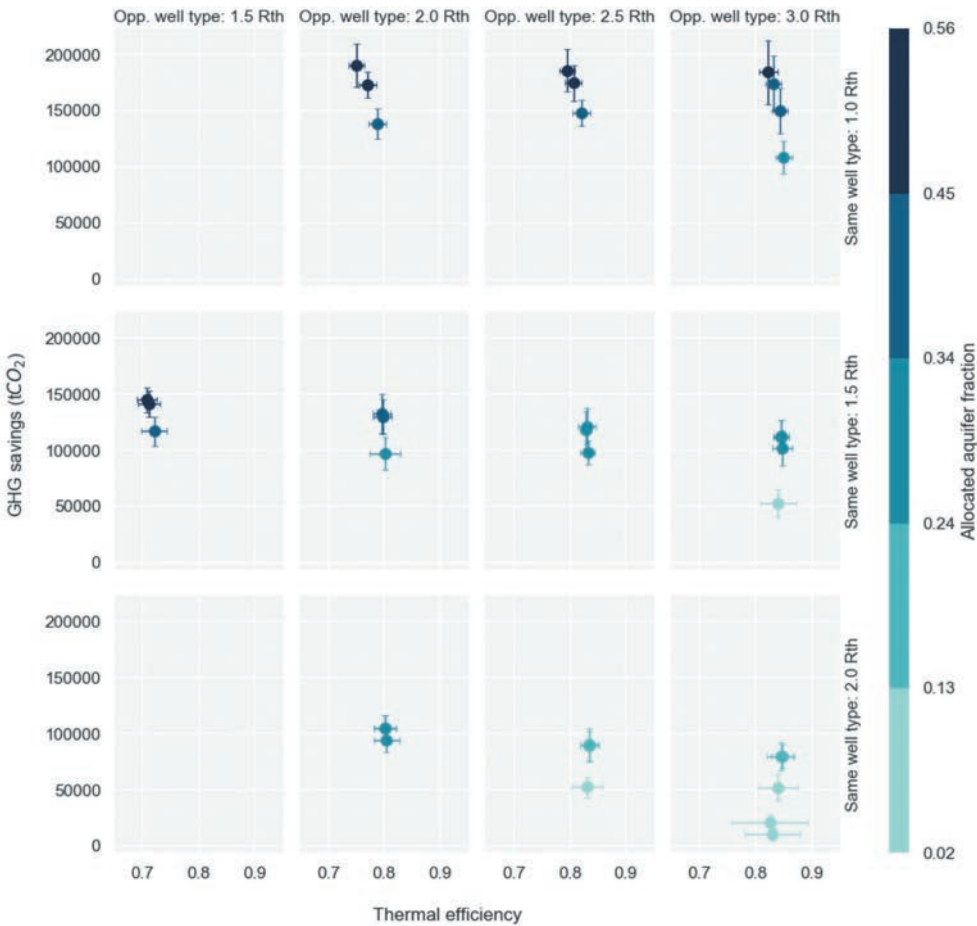
De trade-off tussen individueel versus regionaal rendement bij WKO-systemen, treedt ook op bij andere common pool resources (bijvoorbeeld overbevissing, luchtvervuiling), en in andere disciplines zijn methodes ontwikkeld om hier mee om te gaan. Deze methoden zijn in hoofdstuk 3 geanalyseerd op hun bruikbaarheid voor bodemenergie. Met informatie-uitwisseling en feedback over de actuele status van de temperatuurverdeling in de ondergrond, kan een netwerk van bodemenergiesystemen zelfstandig toewerken naar optimaal gebruik van de bodem, voor zowel het individuele gebouw als het collectief. De focus van governance kan daardoor verschuiven naar de operationele fase, zodat op basis van werkelijk gebruik de ruimte worden beheerd, in plaats van op basis van voorspeld gebruik met alle onzekerheden die daarbij horen. Deze vorm van “self-governance” staat erg ver af van de Nederlandse uitvoeringspraktijk en past ook niet in het huidige wettelijke kader. Daarnaast vergt het de ontwikkeling van communicatie-, compensatie- en beheerstructuren. In samenwerking met marktpartijen, gebruikers en collega’s van andere faculteiten vindt momenteel vervolgonderzoek plaats om de hiervoor benodigde gebouw-beheer-software, communicatiestructuren en institutionele regelingen te ontwikkelen².

Om het aantal bodemenergiesystemen te kunnen vergroten, wordt in hoofdstuk 4 een ontwerpkader vastgesteld voor het ontwerp van individuele bronnen dat leidt tot optimaal gebruik van de bodem en het hoogste rendement. Specifieke operationele condities zoals veranderende energievraag, totaal opslagvolume en energiebalans worden daarbij meegenomen, wat in de huidige praktijk nog niet gebeurt. Ontwerpmethoden voor specifieke geohydrologische omstandigheden, zoals hoge grondwaterstroming en variërende chlorideconcentratie, ontbraken en zijn in dit proefschrift geïntroduceerd. In dit hoofdstuk worden data uit de Nederlandse praktijk gebruikt om

² <https://www.tudelft.nl/en/powerweb/research-projects/ursus-projects/aquifer-thermal-energy-storage-smart-grids-ates-sg-ursus/>

de ontwikkelde concepten te toetsen en illustreren. Uit de resultaten blijkt dat de dispersieverliezen verwaarloosbaar zijn bij bodemenergiesystemen. De verliezen worden door conductie gedomineerd en zijn dus afhankelijk van de filterlengte en het opslagvolume die samen de verhouding tussen thermische straal en filterlengte bepalen.

Er is een analytisch verband afgeleid tussen terugwinefficiëntie en achtergrondstroming als deze laag is (<25 m/j). Voor situaties met een hogere stroomsnelheid is inzichtelijk gemaakt hoe met meerdere bronnen in elkaars verlengde de grondwaterstroming kan worden gecompenseerd, om zo de efficiëntie te vergroten. De onder-



Afbeelding 2. De modelresultaten voor elk van de zelf-organisatiescenario's, gegroepeerd per onderlin-ge-afstandregel voor dezelfde typen bronnen (bijvoorbeeld de afstand tussen twee warme bronnen; sub-plots langs de y-as) en tegenovergestelde typen bronnen (afstand tussen warme en koude bron, subplots langs de x-as). Omdat het model bronlocaties willekeurig plaatst, is één simulatie niet representatief; elke afstandsregel die ik wilde evalueren is daarom 64 keer doorgerekend. Elke marker in de afbeelding is het gemiddelde van die 64 modelrealisaties voor het betreffende scenario. De foutmarges geven de in-ter quartile range van de resulaten aan. Voor elk gesimuleerd bodemenergiesysteem is ook de inzet van de warmtepomp gemodelleerd. Het effect van negatieve interactie op extra inzet van de warmtepomp komt dus terug in de resultaten van CO₂-besparing.

linge afstand moet circa 0,4 keer de jaarlijkse grondwaterstromingssnelheid zijn. Een dichtheidsgradiënt in het grondwater (toenemende zoutconcentratie met de diepte), zoals vaak aanwezig in kustgebieden, heeft geen significant effect op bodemenergiesystemen onder praktijkcondities in Nederland.

Tot slot is in hoofdstuk 5 inzichtelijk gemaakt welke ordenings-structuren leiden tot het meest optimale gebruik van de bodem. De keuze voor de bronlocatie is van veel verschillende factoren afhankelijk: bestaande bronnen, vorm en grootte van de percelen en gebouwen, infrastructuur boven en onder de grond. Dit maakt de plaatsing van bodemenergiebronnen ondoorzichtig en lastig te plannen en te sturen. De momenteel toegepaste “master-planning” methode is verbeterd door de methode en 24 van zulke plannen te analyseren en uitgebreide simulaties uit te voeren.

Met behulp van simulaties zijn grenswaarden bepaald die aangeven wanneer het nodig is om een bodemenergieplan te maken (afbeelding 2). De kleuren geven aan tot welke intensiteit de bodem in de simulatie wordt benut. Ik kon die benuttingsfractie begrenzen of het model systemen laten plaatsen tot het gebied vol was. In de simulatie van afbeelding 2 genereerde het model zelf willekeurige bronlocaties, maar moest daarbij wel bepaalde afstandsregels hanteren. Die afstandsregels zijn een functie van de thermische straal van het systeem en zijn gevarieerd en afhankelijk van of het om dezelfde of tegenovergestelde typen bronnen gaat. Bij grote afstand tussen de bronnen (subplot rechtsonder) wordt er weinig ruimte in de aquifer benut. Dat leidt tot beperkte CO₂-besparing, maar de efficiëntie van individuele systemen is wel hoog. Wat opvalt, is dat de spreiding in de efficiëntie bij lage benutting groot is ten opzichte van hoge benutting. Dat komt omdat er bij lage benutting minder clustering van dezelfde type bronnen optreedt.

Zodra de onderlinge afstand verkleint (bovenliggende en/of linker subplots) neemt de benutting en daarmee ook de besparing flink toe. Pas zodra de onderlinge afstand tussen verschillende typen bronnen kleiner wordt dan tweemaal de thermische straal wordt de individuele efficiëntie minder dan 80%, maar de CO₂-besparing blijft hoog. Zo zijn er nog veel meer simulaties gedaan: het effect van volledige en onvolledige filters, ordenen volgens verschillende breedtes, afstand van warme en koude “lanen”, het toepassen van collectieve systemen en het effect van grondwaterstroming in een druk gebied.

Ook zijn er ontwerpparameters voor bodemenergieplannen en een beoordelingskader vastgesteld waarmee verschillende ordeningsalternatieven objectief tegen elkaar kunnen worden afgewogen. De resultaten geven inzicht in hoe bronontwerp en plaatsing van bronnen het gebruik van de bodem beïnvloedt en in de trade-off tussen individueel rendement en totale energiebesparing. De verbeterde planningsmethode voorziet nu in duidelijke ontwerpregels en objectieve afwegingsmethoden om optimaal gebruik van de bodem te realiseren.

Discussie

De toekomst voor bodemenergie ziet er goed uit, energiebesparingsdoelstellingen staan hoger dan ooit op de agenda. Bodemenergie kan significant bijdragen aan energiebesparingsdoelen, vooral in steden in gematigde klimaten. Om deze vorm van energiebesparing te kunnen blijven gebruiken, is het van belang om de bodem zo optimaal en effectief mogelijk te gebruiken voor deze techniek. De prestaties van bo-

demergiesystemen zijn helemaal niet zo gevoelig voor een klein beetje onderlinge interactie, wat efficiëntere benutting van de potentiële opslagcapaciteit in de bodem mogelijk maakt. De concepten die in dit proefschrift zijn gepresenteerd dienen daarmee als een solide basis waarop het gebruik van de bodem met bodemergiesystemen kan worden geïntensiveerd.

Omdat het aanpassen van bodemergiebronnen relatief duur en complex is, heeft een eenmaal geïnstalleerde bron een grote invloed van een gebouw op de lange termijn. De concepten voor planning en ontwerp van bodemergiebronnen in mijn proefschrift helpen om slimme keuzes te maken met betrekking tot bronontwerp en locatie. Vergelijken met de huidige praktijk, resulteren alle voorgestelde strategieën tot relatief beperkte extra installatiekosten, maar in een veel robuuster netwerk van bodemergiesystemen. Gezien de verwachte levensduur van bodemergiesystemen van meerdere decennia en de onzekerheden over het gebruik van de bodem over die periode, weegt die kleine stijging in aanlegkosten op de lange termijn altijd op tegen de baten.

De resultaten van dit onderzoek vormen een goede basis om het ontwerp en beheer van bodemergiesystemen verder te verbeteren in meer complexe omstandigheden zoals met gestratificeerde, sterk heterogene/anisotrope en/of zandsteen aquifers, in aquifers onder invloed van getij, in gebieden waar zowel open als gesloten bodem-energie gezamenlijk worden toegepast en bij de toepassing van hoge-temperatuuropslag.

Meer informatie

Het proefschrift van Martin Bloemendal: *The hidden side of cities* is beschikbaar op <http://repository.tudelft.nl> en is verdedigd op 16 mei 2018 aan de TU-Delft. Promotor: prof. Dr. Ir. T.N. Olsthoorn.

The hidden side of cities

Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) provides sustainable heating and cooling for buildings and is increasingly applied in moderate climates. The subsurface space available for heat storage is however limited and there is a trade-off between individual ATES system efficiency and minimizing regional greenhouse gas emissions in an area by maximizing the number of ATES systems installed. Therefore, it is important to explore how aquifers can be utilized in a sustainable way to maximize energy saving with ATES. In this dissertation methods for design, governance and planning of ATES systems in densely populated areas are presented. It is also identified where in the world suitable aquifers and climatic conditions coincide with urban areas; the future hot-spots for ATES, where these methods are needed. The presented design methods result in a more efficient use of the subsurface and lower heat losses during storage for individual systems. This in turn results in a much higher energy saving on a regional scale by sustainably accommodating more ATES system than is done and allowed in current practice.
