



Mei 2020

Rapportnummer: KWR 2020.055

Optimale ondergrondse inpassing van open bodemenergiesystemen

Bepaling van plaatsingsregels voor de toepassing van open bodemenergie met hoge ruimtelijke dichtheid ter verlaging van de gebiedsuitstoot van CO₂

Optimale ondergrondse inpassing van open bodemenergiesystemen

Bepaling van plaatsingsregels voor de toepassing van open bodemenergie met hoge ruimtelijke dichtheid ter verlaging van de gebiedsuitstoot van CO₂

Mei 2020

Rapportnummer: KWR 2020.055

Opdrachtnummer: 402408

Projectmanagers:

dr.ir. Johan Valstar (Deltares) / ir. Jan Willem Kooiman (KWR)

Kwaliteitsborgers:

H1, H2, H5: dr. Niels Hartog (KWR)

H1, H3, H4, H5: Sophie Moinier (Deltares)

Auteurs:

H1, H5: dr.ir. Martin Bloemendal, dr. ir. Johan Valstar

H2: dr.ir. Martin Bloemendal, ir. Stijn Beernink, ir. Rob Kleinlugtenbelt,

H3, H4: dr.ir. Johan Valstar, dr. Rutger van den Brugge

Eindredactie: dr.ir. Martin Bloemendal

Meelezers vanuit de samenwerkingspartners:

Marlous van der Meer, Laura Tack (RUD Utrecht), ir. Marian van Asten (Provincie Utrecht), Harry Boerma (Gemeente Utrecht), Jan Frank Mars (KIBO/Bodem+)

Deze activiteit is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken en Klimaat met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's), het kennisplatform bodemenergie en het Kennis en Innovatieprogramma Bodem en Ondergrond (KIBO).



Jaar van publicatie: 2020

Meer informatie:

dr. ir. Martin Bloemendal

T +31306069606

E Martin.bloemendal@kwrwater.nl

dr. Johan Valstar

T +31646914608

E johan.valstar@deltares.nl

ir. Rob Kleinlugtenbelt

T +31611781469

E r.kleinlugtenbelt@iftechnology.nl

KWR
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Deltares
Postbus 177
2600 MH Delft

IF Technology
Postbus 605
6800 AP Arnhem



Mei 2020 ©

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Aanleiding en doel.

Om klimaatverandering te beperken is door de Nederlandse overheid in verdragen afgesproken om de CO₂-uitstoot van Nederland terug te brengen. In 2050 wordt daarom circa 20% van de gebouwen gekoeld en verwarmd met open bodemenergiesystemen. Open bodemenergie is dus hard nodig bij energietransitie. Maar de potentie in de bodem wordt met de huidige praktijk van ontwerp en vergunningverlening niet optimaal benut.

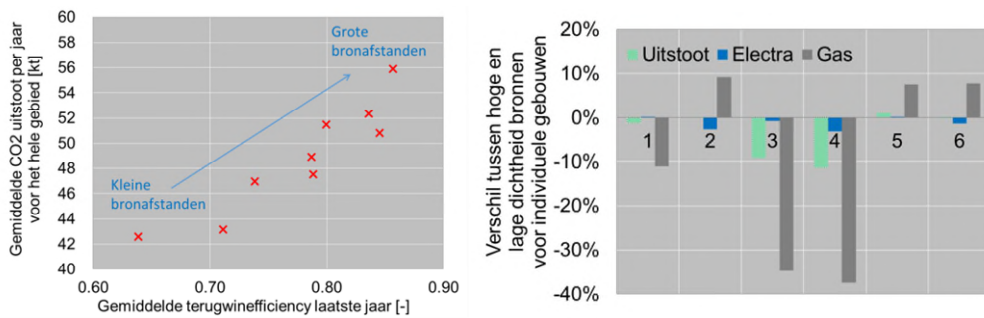
Open bodemenergiesystemen kunnen elkaar ondergronds beïnvloeden. Door het voorzorgsbeginsel dat bij vergunningverlening wordt gehanteerd worden er ruime afstanden aangehouden tussen bodemenergiebronnen wat voor kunstmatige schaarste zorgt. Het aanvragen van overcapaciteit door individuele gebruikers versterkt deze kunstmatige schaarste: grote delen van de bodem in stedelijk gebied worden nu feitelijke onbenut gelaten voor de toepassing van open bodemenergie (vaak meer dan 50%). Om de energiebesparingsdoelen te halen moet juist in deze drukke gebieden de beschikbare ruimte in de bodem zoveel mogelijk worden ingezet om warmte en koude in op te slaan en terug te winnen. Deze uitdaging speelt in 2020 in vrijwel alle Nederlandse steden. Omdat het aantal bodemenergiesystemen richting 2050 circa 20x groter wordt is het noodzakelijk dat er een generiek kader komt voor het plaatsen van bodemenergiebronnen.

In dit onderzoek is een kader vastgesteld voor het plaatsen van open bodemenergiebronnen. Dit kader geeft handvaten voor optimaal en duurzaam gebruik van de ondergrond bij een sterk toenemend aantal bodemenergiesystemen. Daarnaast is er uitgezocht binnen welke randvoorwaarden het gebruik van de bodem met open bodemenergiesystemen kan worden geïntensiveerd. Hiervoor is inzichtelijk gemaakt wat het gevolg is van het vergroten van de dichtheid van bodemenergiesystemen op de positieve en negatieve onderlinge interactie, en wat optimale bronafstanden zijn.

Aanpak en resultaten.

Als eerste is inzichtelijk gemaakt hoe ondergrondse interactie tussen de bronnen doorwerkt op het energierendement (besparing) van individuele bodemenergiesystemen. Het resultaat van deze analyse is dat de ondergrondse interactie tussen bronnen effect heeft op de onttrekkingstemperatuur van het grondwater als de bronnen dichterbij elkaar worden gezet. Het totale energiegebruik van het bodemenergiesysteem verandert daarbij beperkt, soms positief, soms negatief.

Omdat de onderlinge interactie weinig effect heeft op het energiegebruik van een individueel bodemenergiesysteem, zorgt het toelaten van meer bodemenergiesystemen tot een spectaculaire daling van de totale CO₂ uitstoot van het gebied, omdat er dan veel meer gebouwen toegang hebben tot deze duurzame technologie. Door het tot 2 keer vergroten van de dichtheid van open bodemenergiesystemen neemt de totale CO₂-uitstoot significant tot wel 30% af. Deze afname wordt in de simulaties nog geremd door de hoge emissie die nog moet worden toegerekend aan de grijze elektriciteit die in 2019 van het Nederlandse elektriciteitsnet wordt betrokken.

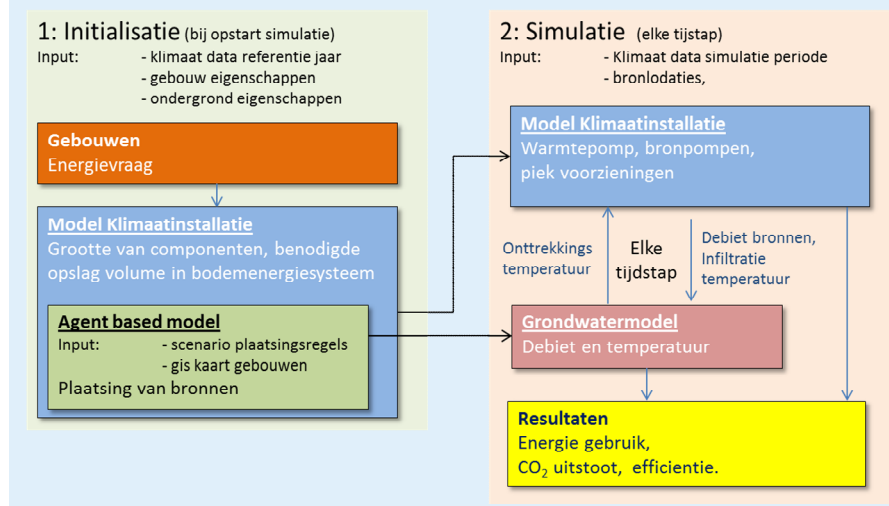


Links: Het algemene effect van het toelaten van meer bodemenergiesystemen op de terugwinefficiëntie van de bronnen en de totale CO₂ uitstoot in een gebied. Rechts: Ter illustratie: het effect van verkleinen van de bronafstanden op 6 gebouwen uit de simulaties.

Gebruikte simulatie tools

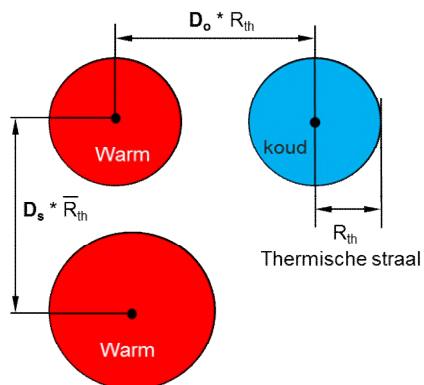
De resultaten zijn gegenereerd door 3 modellen aan elkaar te koppelen en die vervolgens simultaan en interactief gekoppeld te runnen. Dit is de state-of-the-art op het gebied van simulatie van bodemenergiesystemen om de dynamiek van de onderlinge interacties tussen het plaatsen van de bronnen, het functioneren van de warmtepomp en andere opwekkers en de ondergrondse interactie tussen de bronnen.

Een agent-based model is gebruikt voor de plaatsing van de bronnen op basis van plaatsingsregels en onder praktijkcondities. Voor het functioneren van het gebouwssysteem (pompen, warmtepomp, regeneratie/peik voorzieningen) is in deze studie een hoog gedetailleerd model gebouwd en gevalideerd. Dat model is vervolgens gekoppeld aan een veel gebruikt model voor warmtetransport berekeningen in de ondergrond: SEAWAT. Alle dynamische processen zijn in onderlinge afhankelijkheid en in hoog detail niveau gemodelleerd. In een aanvullende model-exercitie zijn de uitkomsten aan de hand van een case studie gevalideerd en op toepasbaarheid onder praktijkcondities getest.



In deze studie is vastgesteld dat de optimale onderlinge afstand voor dezelfde type bronnen (warm-warm, koud-koud) 0.5 keer de thermische straal is, niet veel groter maar ook niet veel kleiner. Voor tegenovergestelde type bronnen is de optimale afstand

tenminste 2 keer de thermische straal. Veel groter is ongewenst, om lege ruimten die te klein zijn voor benutting door andere bodemenergie initiatieven te voorkomen.



Plaatsing van bronnen vindt plaats op basis van de thermische straal, waarbij voor bronnen van hetzelfde type (D_s) kleinere afstanden kunnen worden gehanteerd (positieve interactie) dan voor bronnen van een ander type (D_o) (mogelijke negatieve interactie) (Duijff, 2019).

Met deze generieke plaatsingsregels voor open bodemenergiesystemen kan tot 50% van een aquifer worden benut. Daarboven zijn er maatwerk oplossingen nodig, of is de ruimte in de bodem simpelweg niet toereikend om aan alle vraag te kunnen voldoen. Deze regels zijn goed toepasbaar onder praktijkcondities.

Vertaling naar beleid

Onder de Omgevingswet is het mogelijk om hogere dichtheden van open bodemenergiesystemen toe te staan. Dit kan door in een Omgevingsplan of Omgevingsverordening op te nemen dat de afstand tussen bronnen van bodemenergiesystemen minimaal 0.5 maal de thermische straal moet zijn voor bronnen van hetzelfde type en minimaal 2 maal de thermische straal voor bronnen van het tegenovergestelde type. Daarnaast kunnen ook eisen worden opgelegd aan het daadwerkelijk benutten van de vergunde volumes te verpompen grondwater, het bronontwerp en de productiviteit.

Conclusies

1. Het toelaten van een hogere ruimtelijke dichtheid van open bodemenergiesystemen geeft een aanzienlijke CO₂ reductie doordat meer gebouwen gebruik kunnen maken van bodemenergie.
2. Het effect van de hogere dichtheid op de energie-efficiëntie van bestaande open bodemenergiesystemen is beperkt. De effecten van onderlinge ondergrondse interactie op het energieverbruik van het totale systeem zijn zeer beperkt omdat veranderingen in brontemperatuur niet 1 op 1 doorwerken in energiegebruik van componenten in de klimaat installatie.
3. De afstanden tussen de bronnen waarbij de onderlinge beïnvloeding beperkt is en bijdraagt aan het accommoderen van zoveel mogelijk bodemenergiesystemen is 0.5 maal de thermische straal voor bronnen van hetzelfde type en 2 maal de thermische straal voor bronnen van het tegenovergestelde type.
4. De Omgevingswet biedt bevoegde gezagen voldoende ruimte om intensief gebruik van de ondergrond op een verantwoorde manier toe te staan

Inhoud

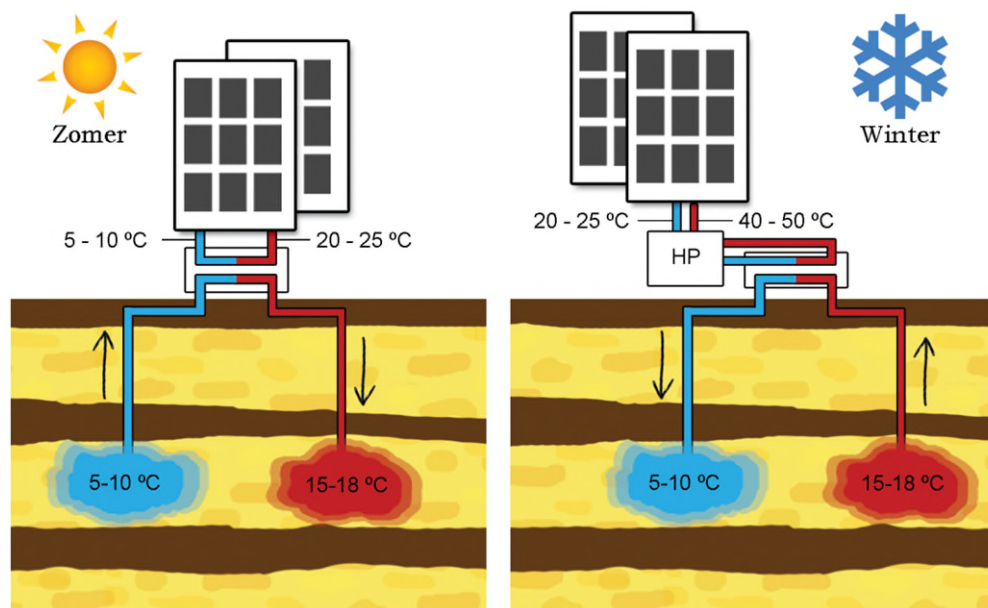
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding en doel	7
1.2	Gevolgde aanpak	10
1.3	Wat is er al bekend?	11
2	Het effect van verdichting op CO₂ besparing en individueel rendement	15
2.1	Methode	15
2.2	Resultaten	22
2.3	Discussie & Conclusies	30
3	Hoge dichtheid in de praktijk	34
3.1	Inleiding	34
3.2	Actoren	34
3.3	Analyse werking bestaande systemen	35
3.4	Optredende thermische straal en opslagvolume	36
3.5	Opzet modelberekeningen verhogen dichtheid van open bodemenergiebronnen	38
3.6	Resultaten	40
3.7	Discussie en conclusies	41
4	Wetgeving en beleid	44
4.1	Bodemenergiebeleid	44
4.2	Toestaan van hogere dichtheid	47
4.3	Andere aspecten	49
4.4	Conclusies	50
5	Conclusies en aanbevelingen	51
5.1	Conclusies	51
5.2	Aanbevelingen	51
	Referenties	53
	Bijlage I	55
	Bijlage II	57
	Bijlage III	80
	Bijlage IV	87
	Bijlage V	90
	Bijlage VI	94
	Bijlage VII	97

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

1.1.1 Achtergrond: bodemenergie nodig bij energietransitie

Om klimaatverandering te beperken is door de Nederlandse overheid in verdragen afgesproken om de CO₂-uitstoot van Nederland terug te brengen (UN, 2015). Concrete aanpak hiervoor is tot stand gekomen in het SER energieakkoord (SER, 2013). Eén van de technieken die een belangrijk deel van de CO₂-uitstootreductie moet realiseren is bodemenergie. Recent is in de uitwerking van het energieakkoord de ambitie vastgesteld dat van de huidige warmtevraag in de gebouwde omgeving circa 25% wordt ingevuld met zowel open als gesloten opslagsystemen in 2050. Van deze technieken wordt dus een significante groei verwacht de komende decennia. Met name van seizoensopslag met open bodemenergiebronnen (Figuur 1-1) wordt veel verwacht omdat met deze techniek een groot aantal verschillende typen en grootten gebouwen zowel kunnen worden verwarmd als gekoeld.



Figuur 1-1. Werkingsprincipe van open bodemenergie.

1.1.2 Uitdaging: potentie in de bodem beter benutten

Bodemenergiebronnen bevinden zich vooral in steden omdat ze nabij de gebouwen die ze van thermische energie voorzien worden geïnstalleerd. In gebieden met een hoge bebouwingsdichtheid kunnen deze systemen elkaar ondergronds gaan beïnvloeden omdat in zulke gebieden A) de bodemenergiebronnen relatief dichtbij elkaar staan en B) hun ondergronds ruimtebeslag bovengemiddeld groot is¹. Regelgeving staat negatieve

¹ Hoe groter het gebouw hoe meer energie er moet worden opgeslagen, hoe groter het ondergronds ruimtebeslag

onderlinge interactie niet toe. Bij de vergunningverlening worden verschillende instrumenten² gehanteerd om negatieve onderlinge interactie tussen bodemenergiesystemen te voorkomen (Schultz van Haegen, 2013). Als gevolg daarvan worden er ruime afstanden aangehouden tussen bronnen wat voor kunstmatige schaarste zorgt (Bloemendal et al., 2014).

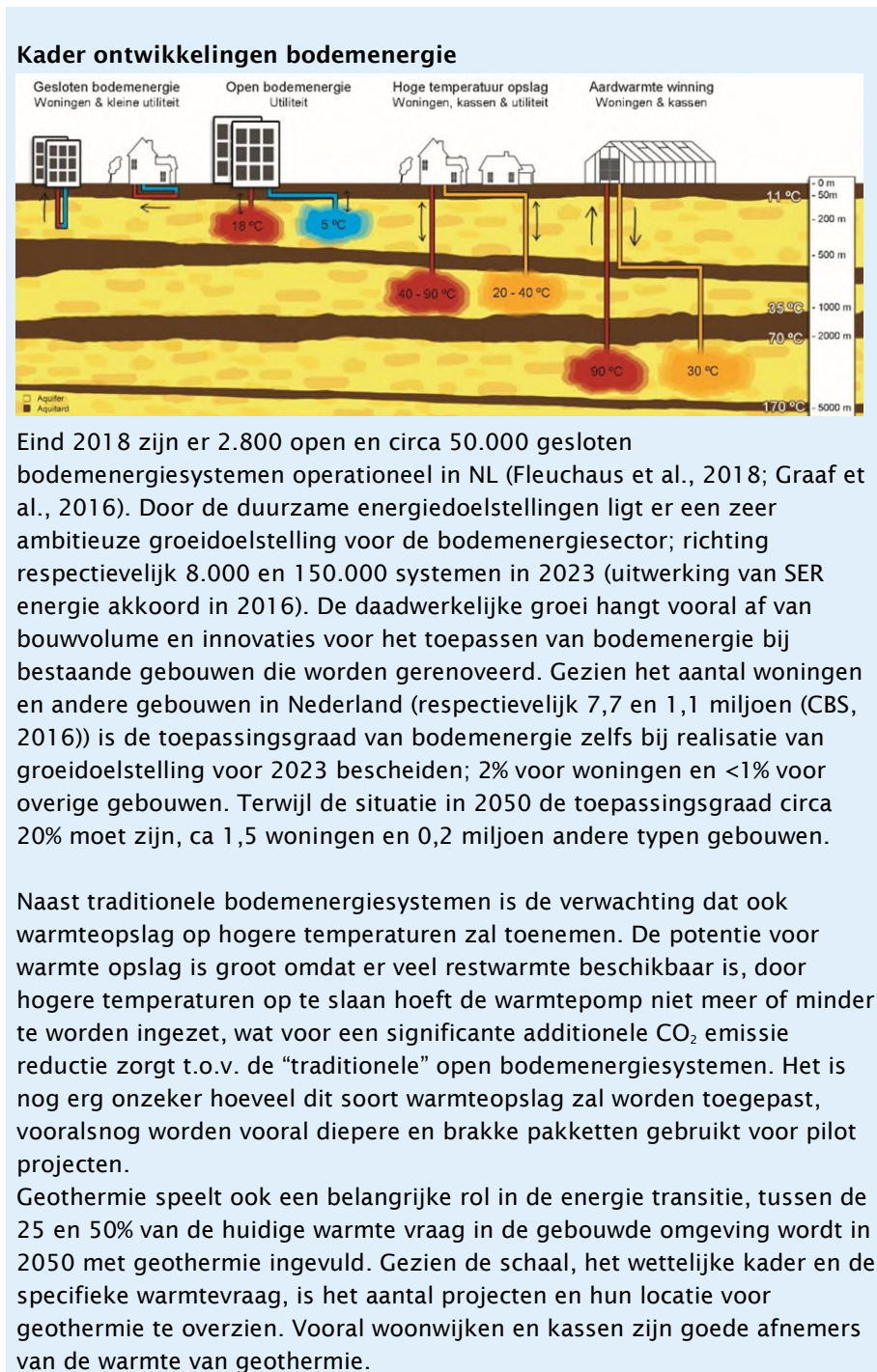
Daarnaast hebben eigenaren en gebruikers van bodemenergiesystemen een individueel belang om zoveel mogelijk ruimte in de bodem te claimen, zodat ze zelf flexibel zijn in de hoeveelheid energie die ze opslaan (i.v.m. variaties in seizoenen en gebruik van het gebouw). Dit leidt ertoe dat eigenaren/gebruikers maar een deel van de ruimte in hun vergunning gebruiken, gemiddeld circa 40% volgens recent onderzoek (Beernink et al., 2019; SIKB, 2015; Willemsen, 2016).

Voor gebieden waar alleen een relatief dunne aquifer beschikbaar is voor bodemenergie, is er beperkte ruimte in de bodem voor bodemenergiesystemen. Daarnaast kan door een hoge bebouwingsdichtheid de vraag naar bodemenergie erg groot zijn. Deze (combinatie van) omstandigheden komt in vrijwel alle steden in Nederland voor, op die plekken is het belangrijk om de ruimte in de bodem zo doelmatig mogelijk in te zetten. Door voorzichtigheid m.b.t. negatieve interactie aan de ene kant en opportunistisch gedrag van individuele gebruikers aan de andere, worden grote delen van de bodem in stedelijk gebied nu onnodig onbenut gelaten voor de toepassing van bodemenergie. Om de energiebesparingsdoelen te halen moet juist in deze drukke gebieden elke geschikte m³ bodem worden ingezet om thermische energie in op te slaan en terug te winnen. Zie kader "Centrumgebied Utrecht" ter illustratie van het hier geschetste probleem.

Gemeenten, en in sommige gevallen provincies, hebben de mogelijkheid om interferentie gebieden aan te wijzen. Het beoordelingscriterium om interferentiegebieden aan te wijzen is het voorkomen van ondoelmatig gebruik van bodemenergie. Het gaat in principe om het daarmee voorkomen van negatieve onderlinge interactie en om een optimale onderlinge ordening van bodemenergiesystemen. Bij de invoering van de omgevingswet hebben gemeenten en provincies de mogelijkheid om een bredere afweging te maken. Om die optimale indeling te realiseren worden er veelal bodemenergieplannen opgesteld.

In 2019 zijn er al meer dan 50 gebieden in Nederland die zijn aangewezen als interferentiegebied of die een bodemenergieplan hebben, terwijl het aantal bodemenergiesystemen nog significant zal groeien (Bloemendal et al., 2018). Momenteel heeft circa 0.5% van de gebouwen die potentieel geschikt zijn voor open bodemenergie een systeem, terwijl dat de komende decennia richting ongeveer 20% moet groeien. Het aantal van dergelijke drukke gebieden zal dus navenant toenemen, en daarmee het aantal gebieden met specifieke regels. De minister heeft in 2013 met Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen (Schultz van Haegen, 2013) juist getracht bodemenergie te stimuleren door de regelgeving te uniformeren. De versnippering in regelgeving voor vele honderden gebied is daarom onwenselijk, los van de praktische bezwaren rondom het actueel houden en toegankelijk maken van al die bodemenergieplannen. Om te voorkomen dat er voor al die gebieden aparte ordeningsplannen moeten worden gemaakt is het wenselijk dat er een duidelijk kader wordt ontwikkeld hoe er ook bij toenemende dichtheid van bodemenergiesystemen doelmatig gebruik kan worden gemaakt van de ondergrond met generieke regels. Daarnaast moet inzichtelijk worden wanneer het essentieel/nuttig en nodig is om met gebied specifieke regels in en ordeningsplan/bodemenergieplan te werken, opgenomen in het omgevingsplan en de omgevingsverordening.

² Standaard regels, verkorte vergunningsprocedure, interferentie gebieden



1.1.3 Doel: hogere dichtheid van bodemenergiesystemen

In dit onderzoek is uitgezocht binnen welke randvoorwaarden het gebruik van de bodem met open bodemenergiesystemen kan worden geïntensiveerd. Hiervoor is inzichtelijk gemaakt wat het gevolg is van het vergroten van de dichtheid van bodemenergiesystemen op de positieve en negatieve onderlinge interactie, en welke rol de (zelf-)ordening van bronnen hierin speelt.

Om aan dit doel te voldoen zijn de volgende inhoudelijke kernvragen beantwoord:

1. Hoe werken thermische energie verliezen als gevolg van onderlinge interferentie in de bodem door op het energie rendement (besparing) van individuele systemen?
2. Wat is de afname van totale CO₂-uitstoot in een gebied door het vergroten van de dichtheid van open bodemenergiesystemen?
3. Welke voorschriften voor onderlinge bron afstanden en bronontwerp kunnen er gelden voor bodemenergiesystemen in gebieden die nu nog niet druk zijn, maar dat op termijn mogelijk wel worden?
4. Tot welke ruimtelijke dichtheid van open bodemenergiesystemen kan een aquifer optimaal worden benut voor open bodemenergie? En wat zijn geschikte parameters om dergelijke grenzen te definiëren?

Na het vaststellen van deze inzichten is het ook nodig om te bepalen hoe

5. De vastgestelde regels in een praktijk situatie functioneren, praktische inpasbaarheid, draagvlak bij belanghebbende etc.
6. de transitie naar een nieuwe manier van ordening het beste kan worden vormgegeven. In veel gebieden waar het druk wordt in de bodem zijn er reeds (veel) bodemenergiesystemen. Hoe kan rekening houdend met gevestigde vergunningen/belangen, de nieuwe methode worden geïmplementeerd?

1.2 Gevolgde aanpak

1.2.1 Afbakening en onderverdeling

De vragen die in dit onderzoek worden aangepakt omvatten verschillende vakgebieden en zijn sterk verweven met sociale en bestuurlijke aspecten. Om het overzicht te bewaren, een heldere aanpak te kunnen volgen en duidelijke uitkomsten te kunnen schetsen

Het onderzoek richt zich op reguliere open lage temperatuur doublet-bodemenergiesystemen (WKO) zoals die in Nederland veelal worden toegepast tot een diepte van circa 250 meter. Open mono-bronnen en recirculatiesystemen, gesloten bodemenergie, ondergrondse warmteopslag bij hogere (>25°C) en geothermie vallen buiten de scope van het onderzoek. Gesloten bodemenergie komt naar verwachting in beperkte mate voor in gebieden met veel open systemen, daarnaast zijn ook bij gesloten systemen andere fysische processen dominant wat het lastig maakt om die gezamenlijk te modelleren en beoordelen. Voor warmte opslag is nog geen standaard beleid, ook daarbij spelen specifieke fysische processen die dan moeten worden meegenomen. Geothermie is een andere technologie en heeft ander wettelijk kader (Mijnbouwwet).

1.2.2 Generiek modelmatig onderzoek

In hoofdstuk 2 van dit rapport zijn de resultaten weergegeven van generiek modelmatig onderzoek die inzicht geven in het effect van onderlinge interactie tussen bronnen op het rendement en de energiebesparing. Hoofdstuk 2 heeft betrekking op de kernvragen 1 t/m 4 uit §1.1.3. De inzichten uit de simulaties worden gebruikt om vragen 1 t/m 4 te beantwoorden.

- Vraag 1 wordt beantwoord door inzichtelijk te maken in welke mate van verlies van warmte/koude in de bodem toelaatbaar is. Dit kan door een relatie vast te stellen tussen verlies in de bodem en energiebesparing van het bodemenergiesysteem. Hiervoor wordt er een gekoppeld model gemaakt van een klimaat installatie van een gebouw en een grondwatermodel.

- Vraag 2 en 3 worden beantwoord door met verschillende onderlinge afstandsregels een gebied te vullen met bodemenergiesystemen en inzichtelijk te maken hoeveel energiebesparing en CO₂-reductie er met bodemenergie extra valt te halen door meer systemen te faciliteren.
- Vraag 4 wordt beantwoord door de simulatie resultaten te analyseren en vast te stellen bij welke mate van gebruik sturing/ordening nodig is om energiebesparing te vergroten.

Het resultaat van deze simulaties zijn uniforme beoordelingscriteria en sturingsmiddelen voor bodemenergiesystemen in drukke gebieden. Deze criteria en middelen zijn vervolgens getest en nader uitgewerkt in de case studie in Hoofdstuk 3. Om de bovengrondse beperkingen voor de plaatsing van bronnen mee te kunnen nemen moeten de generieke simulaties ook voor een specifieke locatie worden uitgevoerd. Hiervoor wordt dezelfde case gebruikt als voor de case studie.

1.2.3 Case studie: hogere ruimtelijke dichtheid in de praktijk

Generieke simulaties geven inzicht in hoe systeemcomponenten elkaar beïnvloeden en waar gevoeligheden liggen. Hoewel in de generieke simulaties is getracht recht te doen aan de complexe werkelijkheid zijn er in de praktijk altijd gebieds-specifieke aspecten waar rekening mee moet worden gehouden. Daarnaast zijn de bestaande vergunningen een belangrijk aandachtspunt bij het vergroten van de dichtheid van bodemenergiesystemen; in hoeverre zijn vergunninghouders bereid om een deel van de aan hen toebedeelde ruimte in de ondergrond met burens te delen?

Voor een goede doorvertaling van de beoordelingscriteria en sturingsmiddelen naar de praktijk is daarom in hoofdstuk 3 een case studie uitgevoerd op het centrumgebied van Utrecht. Hoofdstuk 3 heeft daarmee betrekking op de onderzoeksvragen 5 en 6 (zie paragraaf 1.1.3).

Doel van de case studie is om kernvragen 5 en 6 te beantwoorden:

- om vast te stellen hoe in een situatie met of zonder gevestigde vergunningen/belangen de dichtheid van bodemenergiesystemen kan worden vergroot.
- Het verkennen van mogelijkheden voor nadere afbakening, uitwerking en verankering van een handreiking voor ontwerp en ordening van bodemenergiesystemen in drukke gebieden.

Aan de hand van de case stationsgebied Utrecht is met de betrokken partijen en de kennis uit de generieke simulaties het gebied geanalyseerd om te bepalen hoeveel nieuwe bodemenergiesystemen erbij kunnen. Of en hoe je de bestaande situatie kunt aanpassen bijvoorbeeld door het verplaatsen van bronnen, het koppelen van systemen en/of aanpassen van bestaande vergunningen. Beschrijving van de eigenschappen van het gebied is opgenomen in Bijlage I.

1.3 Wat is er al bekend?

Het probleem is een klassiek zgn. "common pool resource" (CPR) probleem (Bloemendal et al., 2014; Hardin, 1968; Ostrom, 1990). Een CPR is een gemeenschappelijk hulpbron waarbij individuen het overmatig gebruiken waardoor het collectief minder optimaal wordt benut (bijvoorbeeld lucht vervuiling of overbevissing van de zee). Er is dus vaak een trade-off is tussen individueel en gemeenschappelijk belang voor dezelfde grondstoffen/bronnen. Er is reeds veel literatuur en praktijkervaring over het oplossen van andersoortige common pool resource problemen. Daarnaast hebben verschillende

bedrijven en instellingen er ook al onderzoek naar gedaan en oplossingen geïdentificeerd voor dit probleem specifiek voor bodemenergie. Dit onderzoek heeft voortgebouwd op eerder werk, daarom is in deze paragraaf een kort overzicht gegeven van wat er al bekend is.

1.3.1 Energetische verliezen in de bodem bij hoge dichtheid zijn beperkt

Er is al veel onderzoek gedaan naar het effect van onderlinge interactie tussen bronnen op het bron rendement in deze paragraaf een kort overzicht van hoe onderlinge interactie bron rendement beïnvloed. Zo heeft de WUR in een theoretische studie laten zien hoe verschillende ordeningspatronen het rendement van de bronnen beïnvloedt (Sommer et al., 2015), hieruit bleek dat bronnen dichterbij elkaar kunnen worden geplaatst zonder noemenswaardig verlies van rendement. De heterogeniteit van de bodem, en ordening van de bronnen blijken ook beperkt invloed te hebben op de verliezen door interactie tussen bodemenergiesystemen. IF Technology kwam in 2013 tot een gelijke conclusie: bodemenergiesystemen kunnen dichterbij elkaar geplaatst worden zonder dat dit significant effect heeft op het rendement van de bronnen (Jonge et al., 2013). Dit heeft ook effect op de benodigde "overcapaciteit" in de vergunning. Met overcapaciteit wordt de extra ruimte in de vergunning bedoeld waarmee de variaties in energievraag / seizoenen kunnen worden opgevangen, bovenop het jaarlijks te verwachten opslagvolume. Recente studies hebben laten zien dat met circa 50% overcapaciteit t.o.v. jaarlijks gemiddelde, interactie door variaties in seizoenen wordt voorkomen (Bloemendal and Hartog, 2018; Bloemendal et al., 2018). Dat is al een flink stuk minder dan de overcapaciteit van meer dan 100% die in de huidige praktijk van toepassing is.

1.3.2 Verhoging dichtheid heeft beperkt negatief effect op energiebesparing van individuele gebouwen en vergroot totale energiebesparing

DWA heeft met een simulatiestudie laten zien dat het weinig verschil is in CO₂ uitstoot van een bodemenergiesysteem met een kleine of een grote ΔT tussen warme en koude bron maar (Dekker, 2016). Dit betekent dus eigenlijk dat de energieprestatie (rendement en CO₂ uitstoot) van een bodemenergiesysteem niet erg gevoelig is voor gematigde verliezen in de bodem. Daarom is de hypothese van dit onderzoek dat enige interactie tussen bodemenergiebronnen een beperkt effect heeft op de energieprestatie, en dat deze dichterbij elkaar geplaatst kunnen worden.

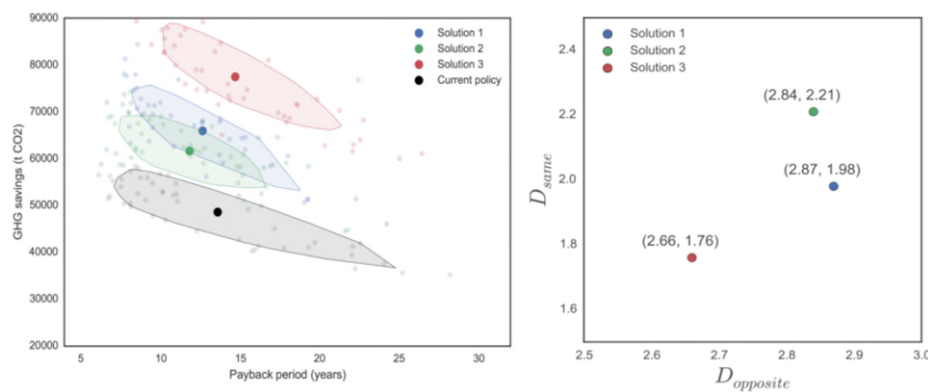
Daarnaast loopt er bij de TU Delft een onderzoeksprogramma met verschillende onderzoekers die kijken hoe bodemenergiesystemen door onderlinge communicatie en onderhandeling het gebruik van de bodem zelf het beste kunnen ordenen (Bloemendal et al., 2014). In het kielzog van deze theoretische/technische exercities is er veel gemodelleerd en gepubliceerd over de trade-off: hiervoor is gebruik gemaakt van agent-based-models, zodat ook de feedback van tegenvallend/teruglopend rendement op het gedrag van bodemenergiesysteem-eigenaren is meegenomen. Uit dit onderzoek blijkt dat de dichtheid tot een bepaalde grens kan worden vergroot, voorbij die grens verliezen systeemeigenaren vertrouwen in het systeem en neemt het aantal systemen af (Jaxa-Rozen et al., 2015). Op basis van een optimalisatie is vastgesteld dat voor een fictief studiegebied (met de bodemeigenschappen en dichtheid aan bodemenergiesystemen als in Utrecht) er veel winst te behalen valt met het dichterbij elkaar plaatsen van bronnen (Figuur 1-2, (Jaxa-Rozen et al., 2016)).

1.3.3 Conclusies uit eerder onderzoek:

Resultaten uit eerder onderzoek geven aan dat:

- de onderlinge interactie tussen bronnen beperkt effect heeft op het terugwin-efficiëntie van de bronnen,
- de uitstoot (reductie) van een bodemenergiesysteem weinig gevoelig is voor de brontemperatuur,
- en dat door meer systemen in een gebied te accommoderen de totale energiebesparing toeneemt.

Deze aspecten zijn echter nog nooit in samenhang met elkaar onderzocht. Op basis van deze separate onderzoeken valt niet met zekerheid te zeggen dat verdichten inderdaad een positief effect heeft, hoewel de eerder resultaten daar wel op wijzen. In hoofdstuk 3 van dit rapport daarom geïntegreerde simulaties om bovenstaande hypothese te verifiëren en detailleren. En in hoofdstuk 4 hoe aangepaste ordeningsregels in de praktijk kunnen worden geïmplementeerd.



Figuur 1-2. Links: Resultaten van verschillende simulaties met verschillende afstand regels tussen bronnen. Rechts: $D_{same}/D_{opposite}$ zijn factoren waarmee de thermische straal wordt vermenigvuldigd om de afstand tussen bronnen te bepalen. $D_{opposite}=3$ is huidige beleid. Op de x-as terugverdien tijd, wat een maat is voor het rendement van de systemen en op de y-as de totale emissie reductie van het gemodelleerde gebied, wat een maat is voor overall rendement. Op basis van de resultaten is de "kernel density estimator" vastgesteld en weergegeven in het rechter figuur, waaruit blijkt dat de beste resultaten worden bereikt met de kleinste onderlinge afstanden. Beide figuren komen uit (Jaxa-Rozen et al., 2016)

Kader: centrumgebied Utrecht

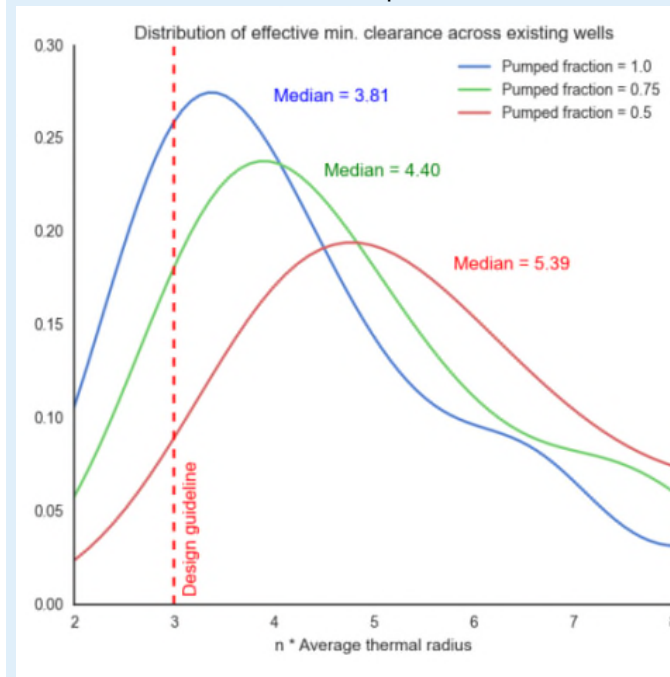
Ter illustratie van het probleem en de kansen voor extra energiebesparing met bodemenergie is in dit kader een korte beschrijving van de situatie in de bodem rondom het centraal station van Utrecht gegeven.

In een gebied van circa 160 ha bevinden zich ruim 80 bodemenergiebronnen die gezamenlijk circa 50% van de beschikbare ruimte in de bodem gebruiken, zie figuur met plankaart van destijds voorziene ontwikkelingen (Boerefijn et al., 2010). Omdat alleen het eerste watervoerende pakket mag worden gebruikt voor bodemenergie en omdat op het spoor geen bronnen kunnen worden geplaatst is het ruimtegebruik relatief beperkt. Er is echter geen ruimte meer voor nieuwe systemen, ondanks dat maar een beperkt deel van de gebouwen in het gebied nu is voorzien van bodemenergie.



(Boerefijn et al., 2010)

Bij het opstellen van de plankaart is al een grotere afstand aangehouden dan 3x de thermische straal. De systemen gebruiken bovendien maar een deel van hun vergunde capaciteit. Ter illustratie is inzichtelijk gemaakt wat de verdeling is van onderlinge afstand tussen bronnen in termen van hun werkelijke thermische straal voor verschillende gebruiksscenario's van de vergunde capaciteiten. Dit omdat de systemen maar een deel van hun vergunde capaciteit gebruiken. Hieruit blijkt dat de gemiddelde afstand tussen omliggende bronnen al hoger is dan de standaard regel van 3x de thermische straal. Rekening houdend met de verminderde pomphoeveelheden blijkt dat de werkelijke afstand tussen bronnen zo groot is dat interactie zeker niet zal optreden.



2 Het effect van verdichting op CO₂ besparing en individueel rendement

In dit hoofdstuk zijn generieke simulaties uitgevoerd om het effect van verdichten op de totale uitstoot en individueel rendement in een gebied in beeld te brengen. Hiervoor is een gedetailleerd model van een bodemenergie-installatie ontwikkeld dat is gekoppeld aan een model dat het gedrag van de warme en koude bronnen in de ondergrond simuleert.

2.1 Methode

Om inzicht te verkrijgen in hoe de mate van verdichting van open bodemenergiesystemen doorwerkt op de totale CO₂-uitstootreductie en op het rendement van individuele systemen moet:

- A) De totale CO₂ uitstoot door het verwarmen en koelen van alle gebouwen en;
- B) Het effect van de bronnen op de werking van de klimaatinstallaties in een gebied worden meegenomen.

Om dit te bereiken is dezelfde aanpak gevolgd als in eerder onderzoek door Bloemendal et al. (2018). Er is een gebied gedefinieerd met een "x" aantal gebouwen die een bodemenergiesysteem kunnen krijgen. Als door (ruime) plaatsingsregels een gebouw geen bodemenergiesysteem kan krijgen, gebruikt dit gebouw een conventionele gasketel en koelmachine³. In elke simulatie wordt de CO₂ uitstoot die is gemoeid met het verwarmen en koelen van alle gebouwen berekend en bij elkaar opgeteld. Voor elk scenario kan de totale uitstoot vervolgens worden vergeleken met scenario's met andere plaatsingsregels. De verschillen in CO₂ uitstoot tussen de simulaties maken inzichtelijk hoe verschillende dichtheden van bodemenergiesystemen doorwerken in individueel en collectief rendement. NB. Het doel is dus niet om het energiegebruik en de werking van het bodemenergiesysteem van elk gebouw in het gebied exact na te bootsen. Het gedrag van het bodemenergiesysteem in de modellen moet representatief zijn voor de werking in de praktijk, maar hoeft die voor de locatie waarvoor de simulaties worden uitgevoerd niet de werkelijkheid exact te reproduceren.

Om deze analyse te kunnen doen is het gebruikte modelinstrumentarium opgebouwd uit 3 hoofdcomponenten:

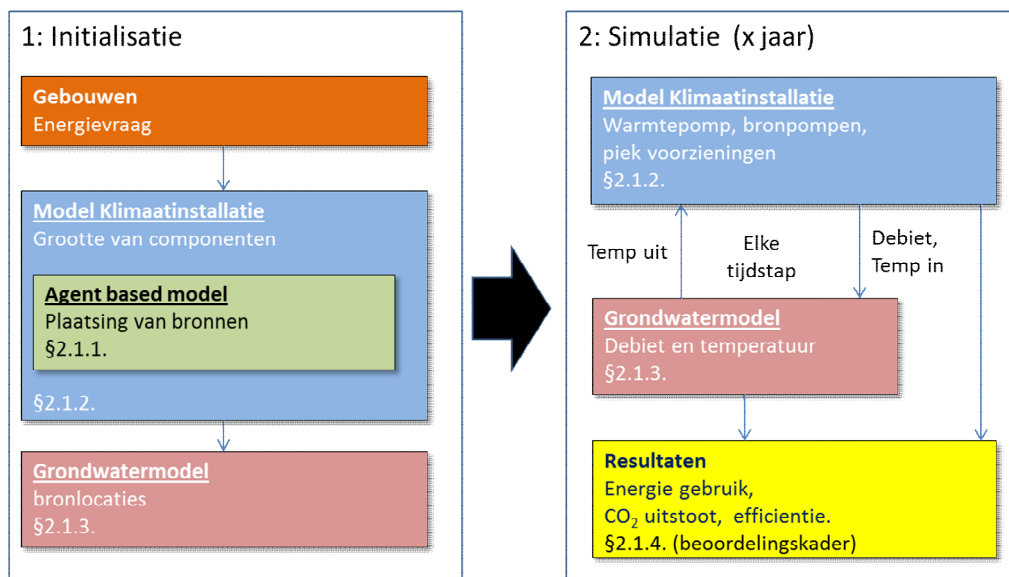
- A) Een Agent-Based model voor de plaatsing van bodemenergiebronnen met willekeur, onzekerheden en restricties die gelden in een druk binnenstedelijk gebied → op welke onderlinge afstand kunnen bronnen worden geplaatst onder verschillende plaatsingsregels?
- B) Een grondwatermodel om het gedrag van het warme en koude grondwater in de ondergrond te simuleren → met welke efficiëntie/temperatuur wordt opgeslagen energie teruggewonnen?
- C) Een klimaat installatie model gekoppeld aan het grondwater model, (door)ontwikkeld in dit project om het gedrag van het de klimaatinstallatie te

³ In de praktijk zou een gebouw zonder bodemenergie ook een ander duurzaam energie systeem kunnen krijgen.

simuleren → hoeveel elektriciteit (o.b.v. net-mix in 2019) en gas wordt er door de gebouwen in een gebied gebruikt voor verwarming en koeling? (met inachtneming van eventuele verliezen in de bronnen)

Door het koppelen van deze modellen is het mogelijk om zowel de plaatsing als de werking/uitstoot van de gebouwinstallaties in beeld te brengen, afhankelijk van de onderlinge interactie tussen de bronnen. In deze paragraaf is de opbouw van en de interactie tussen de modellen en de gevolgde aanpak m.b.t. de simulaties en evaluatie beschreven. Dit is in de hoofdttekst van dit rapport op hoofdlijnen gedaan, een uitgebreide beschrijving met alle vergelijkingen is beschikbaar in Bijlage I.

De werking van deze gekoppelde modellen loopt in twee stappen, zie Figuur 2-1 en §1 in Bijlage I. In de initialisatie stap wordt voor elk gebouw de energievraag, de grootte van de componenten van de klimaatinstallatie (§2.1.2) en de bronlocaties bepaald (§2.1.1). Op basis van de bronlocaties en lokale bodemeigenschappen wordt vervolgens het grondwatermodel opgebouwd (§2.1.3). Als alle modellen zijn geïnitieerd start de feitelijke simulatie waarin het agent-based model geen functie meer heeft en waarbij het model van de klimaatinstallatie en het grondwatermodel elkaar bij elke tijdstap van input en output voorzien.



Figuur 2-1. Globale opbouw en onderlinge afhankelijkheid van model instrumentarium.

2.1.1 Plaatsing van bronnen

Het plaatsen van bronnen wordt in de praktijk en in deze studie gedaan op basis van de thermische straal van de bodemenergiesystemen (zie kader “plaatsing op basis van thermische straal”). Voor de minimale afstand tussen bronnen wordt onderscheid gemaakt tussen dezelfde en tegenovergestelde type bronnen (warm resp. koud). Hierbij vindt zelf-ordening plaats. Door te sturen op minimale/maximale afstand tussen bronnen van hetzelfde of tegenovergestelde type clusteren bronnen van hetzelfde type, dit wordt zelf-ordening genoemd (Bloemendal et al., 2014; Ostrom, 1990).

Voor het simuleren van het plaatsen van de bronnen is gebruik gemaakt van een zgn. agent based model: NetLogo, (Wilensky, 1999). In NetLogo zijn alle gebouwen die worden gesimuleerd gedefinieerd en die gebouwen leggen bij de initialisatie van elke run in

willekeurige volgorde een bodemenergiesysteem aan. Afhankelijk van de plaatsingscriteria (minimale D_o en D_s , zie kader "plaatsing op basis van thermische straal") die voor elke run wordt opgegeven zoekt NetLogo (NL) naar geschikte plekken voor de bronnen van elk gebouw. Als er bij de laatste gebouwen geen ruimte meer is om bronnen te plaatsen zullen die gebouwen geen bronnen en dus ook geen open bodemenergiesysteem krijgen. Bij elke run van het model hebben dus andere gebouwen bronnen op andere plekken. Een enkele run van NL gevolgd door simulatie met een grondwatermodel (MODFLOW) en het gebouwmodel geeft daarom geen eenduidig beeld van hoe effectief een bepaalde plaatsingsregel is. Door NL het indelen vaak te laten herhalen voor elke plaatsingsregel ontstaat een verzameling van resultaten die gezamenlijk een goed beeld geven van hoe effectief plaatsingsregels zijn t.o.v. elkaar.

Waar Bloemendal et al. (2018) random plaatsing zonder ruimtelijke beperkingen gebruikten in hun simulaties, is in dit onderzoek de ruimtelijke inpassing een belangrijke detailleringstap. In NL is met behulp van GIS voor elk gebouw in het simulatiegebied het perceel aangegeven met daarop het omvang van het gebouw. Verder zijn ook de straten, spoorlijnen, watergangen aangegeven. Alleen in de vrije ruimte op eigen percelen en in de stoep van aanpalende straten kan NL voor elk gebouw bronlocaties identificeren. Omdat dit een specifieke praktijklocatie vereist zijn ook voor de generieke model studie de eigenschappen van het centrumgebied van Utrecht gekozen als inpassingscondities, evenals de percelen en gebouwen. Hierbij zijn de gebouwen met een bodemenergiesysteem⁴ meegenomen in de simulaties, maar ook de gebouwen die dat nu nog niet hebben maar wel potentieel geschikt zijn. In Bijlage I is een lijst opgenomen met alle gebouwen en hun ingeschatte verwarmings- en koelingsvraag.



Figuur 2-2. Screen-shot van NetLogo na plaatsing van bronnen met $D_o=1$ en $D_s=2.5$

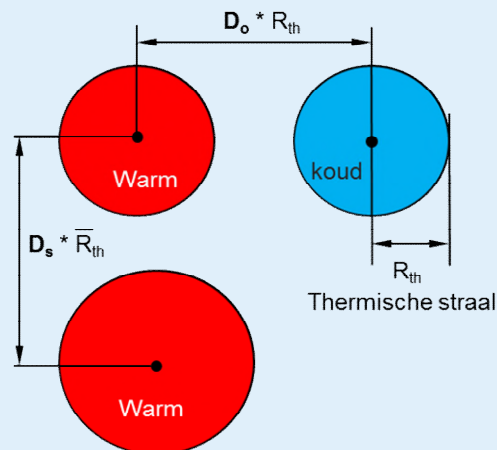
⁴ In dit generieke deel van het onderzoek zijn de huidige bronlocaties van de gebouwen met een open bodemenergiesysteem niet meegenomen. Alle gebieden beginnen dus zonder bronnen. De invloed van huidige bronnen wordt nader onderzocht in hoofdstuk 3.

Plaatsing op basis van de thermische straal

Bij het infiltreren van warm of koud water in een bron ontstaat een cilinder vormig volume met afwijkende temperatuur rondom de bron. Van bovenaf gezien is dat een cirkel met een straal, die afhankelijk is van het jaarlijks geïnjecteerde volume (V), Filterlengte / Dikte van de aquifer (L), de warmte capaciteit van water (c_w) en de warmte capaciteit van het aquifer materiaal (c_{aq}):

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w V}{c_{aq} \pi L}} \quad (1)$$

Plaatsing van bronnen vindt plaats op basis van de thermische straal, waarbij voor bronnen van hetzelfde type (D_s) kleinere afstanden kunnen worden gehanteerd (positieve interactie) dan voor bronnen van een ander type (D_o) (mogelijke negatieve interactie).



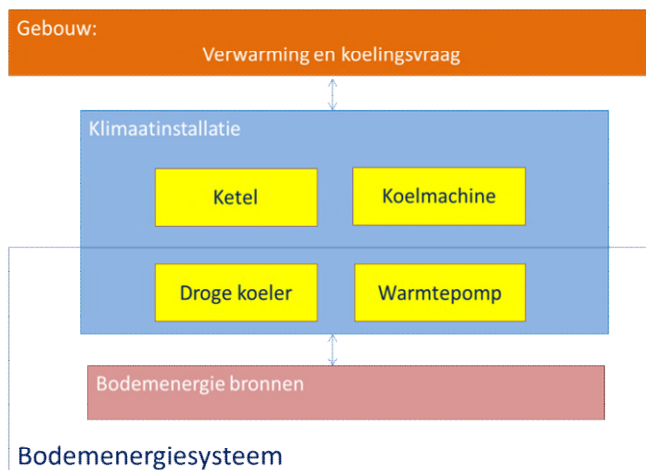
(Duijff, 2019)

Bij grote waarden voor D_o en D_s komen bronnen dus ver uit elkaar te staan, voor lage waarden dichtbij elkaar. Als bronnen niet dezelfde thermische straal hebben wordt het gemiddelde van de thermische stralen van de 2 betreffende bronnen gebruikt.

Een combinatie van D_o en D_s is in dit onderzoek gedefinieerd als een plaatsingsregel of plaatsingsscenario. D_o wordt gevarieerd van 1.5 tot 3 en D_s van 0.5 tot 2, waarover meer in §2.1.5.

2.1.2 Klimaatinstallatie

Voor het in beeld brengen van de CO₂-uitstoot van gebouwen met een conventionele en met een open bodemenergie installatie moet voor elke component het energiegebruik in beeld worden gebracht. Voor een conventionele installatie met een ketel en koelmachine is dat relatief straight-forward omdat er maar 2 apparaten zijn die energie gebruiken en 2 bedrijfssituaties, 1) koelen met de koelmachine en 2) verwarmen met een ketel. Bij een open bodemenergiesysteem is dat lastiger omdat het systeem uit verschillende componenten bestaat en er daardoor verschillende bedrijfssituaties zijn. Welke bedrijfssituaties optreden hangt af van de energievraag en de grootte van de verschillende componenten van het open bodemenergiesysteem.



Figuur 2-3. Schematische weergave opbouw en onderdelen van het model van de klimaatinstallatie. Afhankelijk van het scenario kunnen componenten niet of wel aanwezig zijn (bijv koelmachine of ketel).

Initialisatie

Voor elk gebouw wordt op basis van de grootte (m^2 vloer oppervlak) en de specifieke warmte en koelvraag ($kWh/m^2/jaar$) de gemiddelde jaarlijkse energievraag (MWh/j) berekend. Vervolgens wordt deze jaarlijkse warmte- en koelvraag op basis van een referentie jaar en de gebruikstijden van het gebouw per uur over het jaar verdeeld. De maximale benodigde koel- en verwarmingsvermogens die daarbij optreden worden gebruikt om de grootte van de componenten van de klimaatinstallatie te bepalen.

Het belangrijkste bij het bepalen van de grootte van de componenten is de warmtepomp, wat impact heeft op het aantal bronnen en het opslagvolume per bron. In de huidige praktijk wordt de warmtepomp op ongeveer 35% van het maximale vermogen uitgelegd. Alleen op de koudste dagen van het jaar is de grootste capaciteit nodig, wat dus een beperkt aantal dagen per jaar is. De warmtepomp kan in dat geval circa 80% van de totale warmtevraag leveren. De overige 20% van de warmte vraag wordt ingevuld met een gasketel. Als de warmtepomp op 100% van de benodigde capaciteit wordt gedimensioneerd zijn er meer bronnen nodig, met een relatief kleiner verpompt volume per bron.

Het aantal bronnen volgt vervolgens uit de benodigde capaciteit om aan de koel- en verwarmingsvraag te voldoen. Deze is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de bronnen, de warmte capaciteit van water en het maximale debiet dat uit een bron in de betreffende aquifer kan worden gehaald.

De ketel en (eventuele) koelmachine worden vervolgens uitgelegd op de capaciteit die niet kan worden ingevuld met de bronnen/warmtepomp.

Simulatie

Bij het simuleren wordt voor elk gebouw de klimaatinstallatie doorgerekend met een temperatuurreksen gemeten door het KNMI om zo de werkelijkheid beter te representeren. Dit wijkt dus af van de temperatuur reeks die is gebruikt om alle componenten uit te rekenen (referentiejaar). In de praktijk wijkt de echte energievraag ook altijd af van de verwachte energievraag. Voor elk uur is er weer een benodigde koel- en verwarmingsvraag die met de klimaatinstallatie wordt ingevuld. Bij het bepalen van het

energiegebruik van de installatie en het benodigde debiet is tijdens elk uur rekening gehouden met:

- De deellast situatie van de warmtepomp → dit heeft effect op COP en energiegebruik
- Het energiegebruik van droge koelers voor balans herstel van de bronnen
- Het energiegebruik van circulatie- en bronpompen
- Het energiegebruik van de gasketel voor pieken

In Bijlage II, §4 zijn de rekenstappen uitgebreid beschreven.

2.1.3 Grondwatermodel

Om het effect van de onderlinge interactie tussen bodemenergiebronnen in beeld te brengen gebruikt het model van de klimaatinstallatie de onttrekkingstemperatuur van de bronnen die is gemodelleerd met een dynamisch grondwatermodel⁵. Hiervoor is een FloPy MODFLOW/MT3DMS (Harbaugh et al., 2000; Zheng and Wang, 1999) grondwatermodel gebruikt. De modellagen zijn opgebouwd volgens de bodemopbouw in het centrum van Utrecht.

Om alle energiestromen correct in beeld te brengen zijn de tijdstappen van het model van de klimaatinstallatie een uur. Het grondwatermodel met zulke kleine tijdstappen laten draaien is niet nodig en zorgt daarnaast voor zeer lange reketijden. De debieten in/uit de bronnen en infiltratie temperaturen worden geaggregeerd over een maand, zodat het MODFLOW model met tijdstappen van een maand reket.

MODFLOW is een veel gebruikte code voor simulatie van bodemenergiesystemen e.g. (Bloemendal and Hartog, 2018; Bloemendal et al., 2018; Caljé, 2010; Li, 2014; Sommer et al., 2015) en wordt daarom hier niet verder in detail behandeld, de details m.b.t. parameterwaarden en discretisatie staan in Bijlage II.

2.1.4 Beoordelingskader

Voor het vergelijken van verschillende simulaties is het van belang om een eenduidig beoordelingskader te hebben. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de totale CO₂-uitstoot per scenario en het gemiddelde terugwin-efficiëntie van alle bronnen per scenario.

Om inzicht te genereren in hoe verschillende plaatsing-scenario's van bodemenergie bronnen zich verhouden tot andere locaties zijn de resultaten ook inzichtelijk gemaakt afhankelijk van de mate van gebruik van de ondergrond, de benuttingsgraad. Voor het bepalen van de uitstoot zijn de emissiefactoren uit Tabel 2.1 toegepast. Detail beschrijving van hoe de beoordelingscriteria zijn berekend staat in Bijlage II, §5.

Tabel 2.1. Emissie factoren gas en elektriciteit.

Gas	1.77	tCO ₂ /m ³
Elektriciteit	0.32	tCO ₂ /kWh

⁵ Achtergrondstroming is in deze studie niet meegenomen. Bij lage achtergrondstroming (<25m/y) heeft dit verwaarloosbaar effect op de terugwin efficiëntie van de bronnen, en daarmee dus ook geen effect op het totale systeem rendement. Nader onderzoek kan zich richten op de versturende werking van achtergrondstroming op het functioneren van bodemenergiesystemen.

2.1.5 Scenario's

Base case

De basis modelopbouw is gebruikt om een range van plaatsing-scenario's te evalueren, ter vergelijking met de scenario's die zijn behandeld door Bloemendal et al. (2018), Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Plaatsings regels voor de negen verschillende base case scenario's.

#	D_s	D_o
1	0.5	2
2	0.5	2.5
3	0.5	3
4	1	2
5	1	2.5
6	1	3
7	2	2
8	2	2.5
9	2	3

Energievraag variatie

Door de energievraag van de gebouwen te variëren voor de afstandsregels uit base case scenario's 4 ($D_s=1$, $D_o=2$) en 9 ($D_s=2$, $D_o=3$) (Tabel 2.2) wordt inzicht verkregen in hoeverre de resultaten van de plaatsingsregels gevoelig zijn voor variaties in energievraag. Dit is belangrijk omdat in de praktijk bodemenergiesystemen altijd een andere energievraag hebben dan verwacht en dat die ook nog sterk kan veranderen over de levensduur van het systeem. De volgende aanvullende verschillende energievraag scenario's worden geanalyseerd ten opzichte van het basis scenario waarbij elk systeem energiebalans heeft:

- A. Geen energie balans voor elk individueel systeem.
Het bodemenergiesysteem wordt enkel ingezet om aan de energievraag van het gebouw te voldoen, er wordt niet aan balans-herstel gedaan.
- B. Willekeurige en variabele energie vraag
De specifieke energievraag van de gebouwen wordt binnen 50% interval van de basis waarden random gekozen bij elke simulatie, in plaats van gelijk kentallen voor alle gebouwen. Dit is dichterbij de realiteit, maar kan de resultaten ook vertroebelen, vandaar dat dit niet is gedaan in het basis scenario
- C. Toekomstige klimaat (2050)
hoe werkt een veranderende energievraag (door klimaatverandering) door in hoe bodemenergiesystemen nu worden ontworpen.

Systeemconcept variatie

Ook het gekozen systeemconcept is gevarieerd om te zien hoe dat effect heeft op de resultaten van de verschillende plaatsingsregels. Ook hiervoor zijn weer scenario's 4 en 9 van de base case genomen, Tabel 2.2. Tegenwoordig worden bodemenergiesystemen nog veelal als bivalent (met piek ketel) uitgevoerd en met een relatief lage ΔT tussen de warme en koude bronnen. In de toekomst kan dat mogelijk veranderen. Deze simulaties laten zien wat het effect daarvan is.

D. Monovalent (zonder piek ketel)

Wat als alle gebouwen volledig van het gas af gaan? De warmtepompen worden dan 2 tot 3x zo groot evenals het aantal bronnen. Het vereist opslagvolume neemt echter maar met 20-30% toe. Er moeten dus meer bronnen met een kleinere thermische straal worden geplaatst.

E. Grotere ΔT

In het basis scenario is uitgegaan van praktijk waarden voor de ΔT (Beernink et al., 2019; Willemsen, 2016) waar door provincies al op wordt gestuurd om die te maximaliseren, grotere ΔT is immers minder ruimte beslag voordezelfde hoeveelheid warmte. Als het beheer/de werking van bodemenergie installaties verbeterd kan de ΔT tussen de bronnen wellicht iets groter worden, en daarmee leiden tot een kleiner ruimtebeslag in de ondergrond. Het effect daarvan is onderzocht in dit scenario.⁶

F. Monovalent en grotere ΔT

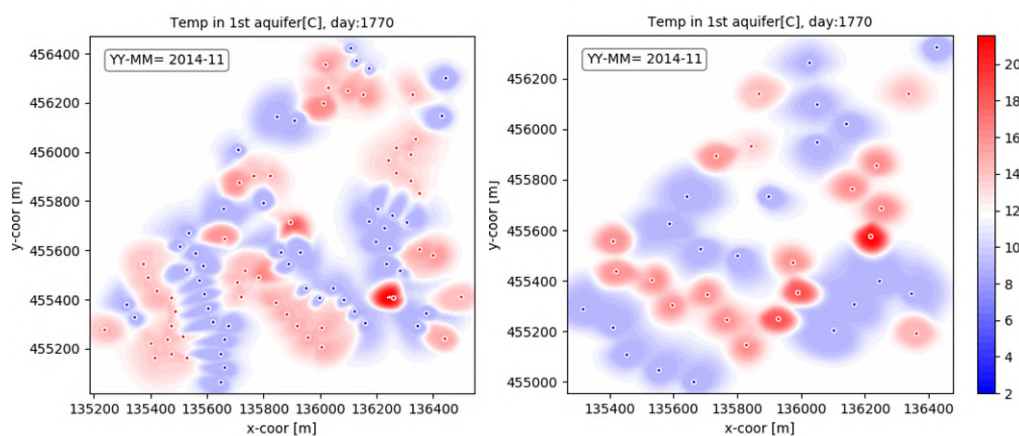
De D en E scenario's gecombineerd.

Gedetailleerde beschrijving van de scenario's staat in Bijlage II, §6.

2.2 Resultaten

2.2.1 Base case

In Figuur 2-4 is ter indicatie de temperatuurverdeling in de ondergrond opgenomen voor een simulatie met kleine en grote afstand tussen de bronnen.



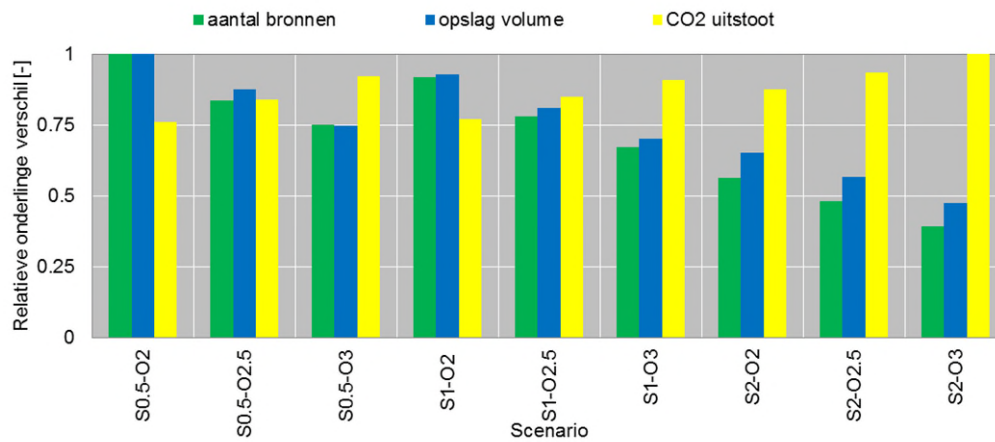
Figuur 2-4. Voorbeeld resultaten van de temperatuurverdeling in de ondergrond aan het einde van de simulatie periode voor een willekeurige run van de S1-O2 (links) en S2-O3 (rechts) base case scenario's (S=distance Same type of wells, O=distance opposite type of wells).

De energieprestatie en algemene kentallen van de 9 base case scenario's zijn weergegeven in Figuur 2-5, Figuur 2-6 en Figuur 2-7.

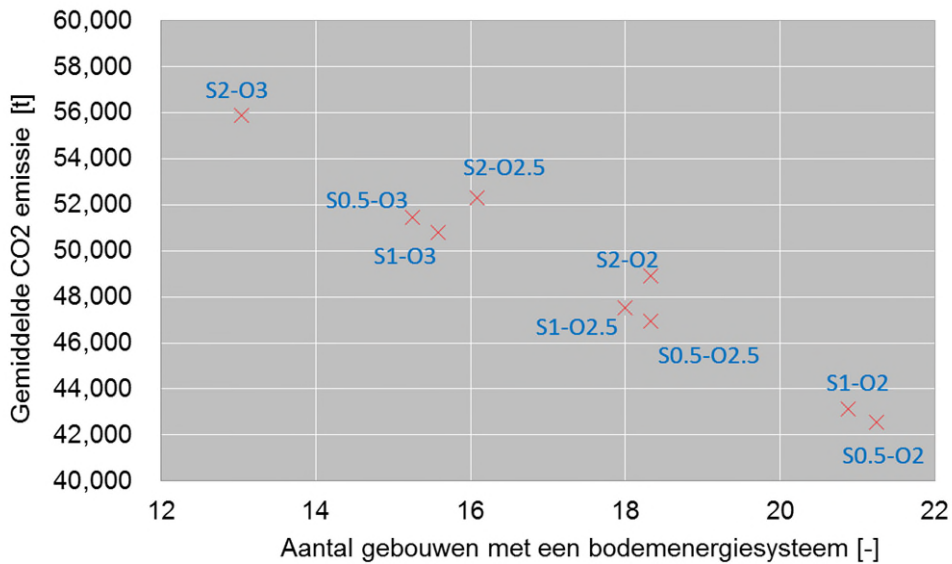
De resultaten van de basisscenario's staan in Figuur 2-6 en Figuur 2-7. De hoogste uitstoot is telkens voor de scenario's met 2.5 en 3 keer de thermische straal afstand

⁶ In de vergunningsvoorschriften van bodemenergiesystemen worden al eisen gesteld aan een minimale ΔT tussen de bronnen. Door de gewenste temperatuur in gebouwen en de werkingstemperatuur van warmtepompen is het in de praktijk erg lastig om de ΔT heel sterk te verbeteren. In dit scenario gaan we uit van een milde verbetering van 2°C t.o.v. het basis scenario waar de infiltratietemperatuur in de warme bron varieert tussen de 13 en 16°C afhankelijk van het gevraagde koelvermogen (in dit scenario E is de verdamper temperatuur met 1°C verlaagd en de retour temperaturen vanuit het gebouw met 1°C verhoogd).

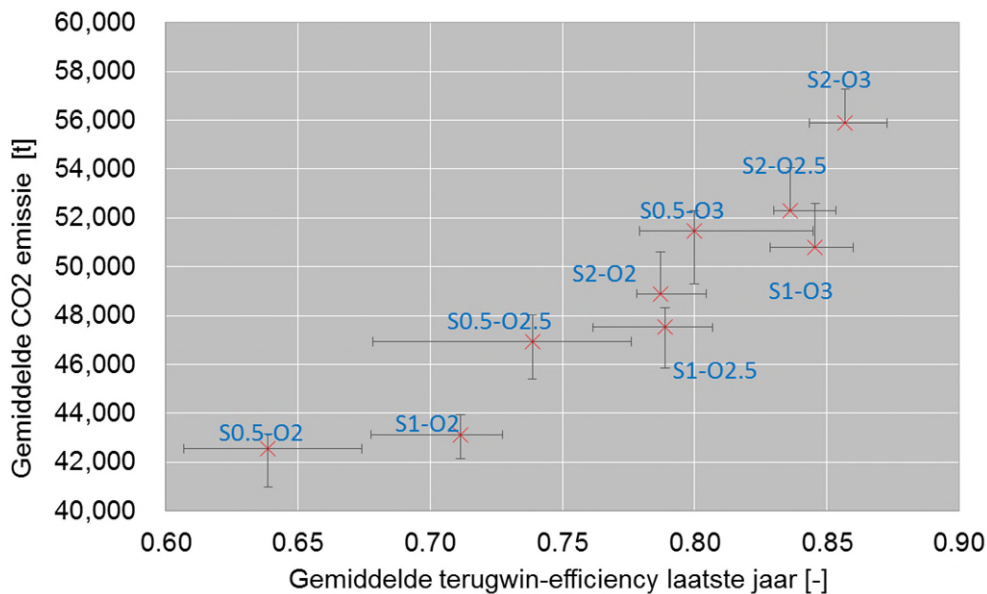
tussen tegenovergestelde type bronnen. Terwijl de laagste uitstoot optreedt bij 0.5 tot 1 keer de thermische straal afstand tussen dezelfde type bronnen. Het is opvallend dat zelfs bij de hoogste dichtheid niet alle gebouwen een bodemenergiesysteem krijgen.



Figuur 2-5. Onderlinge relatieve verschil in aantal bronnen, opslagvolume en totale CO₂ uitstoot voor de verschillende plaatsingsscenario's: links de meest hoge dichtheid van bronnen, rechts de meest lage dichtheid van bronnen. Aantal bronnen = het totaal aantal bronnen dat onder betreffende plaatsingsregel is gerealiseerd. Opslagvolume = toegepaste totale opslagvolume van alle bodemenergiesystemen onder betreffende plaatsingsregel. CO₂ uitstoot = de totale uitstoot van alle gebouwen onder betreffende plaatsingsregel.



Figuur 2-6. Aantal gebouwen in de simulatie met een bodemenergiesysteem tegen de CO₂ uitstoot voor de base-case scenario's, voor de energiemix van het elektriciteitsnet in 2019.



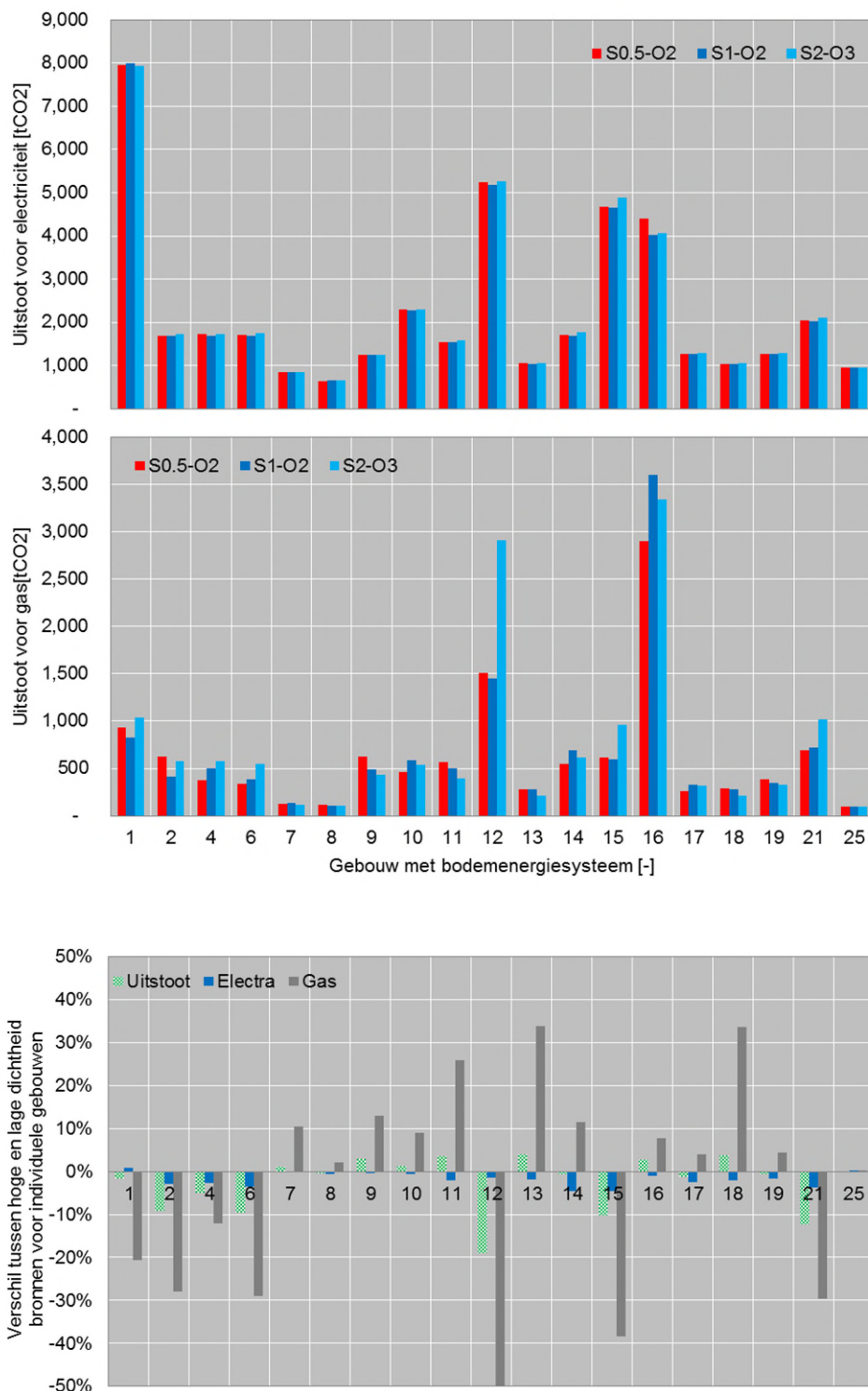
Figuur 2-7. Gemiddelde terugwin-efficiëntie en CO₂ uitstoot voor de base-case scenario's, inclusief de kwartielen, voor de energiemix van het elektriciteitsnet in 2019.

Deze resultaten bevestigen het beeld uit eerdere studies: bij hogere toegestane dichtheid neemt het aantal bodemenergiesystemen toe en daarmee de totale de CO₂ emissie af ondanks dat de hogere dichtheid voor een slechter individuele terugwin-efficiëntie zorgt (Bloemendal et al., 2018). Ten aanzien van de CO₂ uitstootreductie ligt voor dezelfde typen bronnen de optimale waarde voor de afstand telkens op circa 0.5 keer de thermische straal, terwijl voor tegenovergestelde typen bronnen dat telkens 2 keer de thermische straal is. Voor de gemiddelde terugwin-efficiëntie van de gesimuleerde gebouwen heeft verdichting wel een duidelijk negatief effect.

Uit het beeld van de geaggregeerde resultaten blijkt dat hogere dichtheid van bronnen zorgt voor veel minder CO₂ uitstoot in het gebied maar dat het terugwin-efficiëntie van de individuele systemen in het gebied verslechtert.

Het doel van bodemenergiesystemen is echter niet om een hoge terugwin-efficiëntie te hebben, maar om CO₂ uitstoot te verminderen. Gezien deze resultaten is het daarom ook van belang om in beeld te brengen hoe de prestatie van individuele bodemenergiesystemen verandert als de bronnen van nabijgelegen gebouwen zich dichterbij bevinden. In Figuur 2-8 is voor elk gebouw de gemiddelde uitstoot voor elektriciteit- en gasgebruik over de verschillende simulaties in beeld gebracht voor 3 verschillende plaatsing scenario's. Omdat niet alle gebouwen in alle simulaties een open bodemenergiesysteem hebben gekregen staan niet alle 26 gebouwen in deze lijst.

Voor het elektriciteitsgebruik zijn de verschillen erg klein en niet eenduidig. De ene keer is het verbruik iets lager bij hoge dichtheid, de andere keer juist weer bij lagere dichtheid. Bij het gasverbruik zijn de verschillen over het algemeen ook klein, hoewel de verschillen voor enkele gebouwen een stuk groter zijn bij lage dichtheid. Alleen gebouw 21 is daar een uitzondering op. In het algemeen blijkt uit deze resultaten dat het verdichten een beperkt effect lijkt te hebben op de energetische prestatie van individuele systemen (ondanks sterke afname in terugwin-efficiëntie) en dat het zelfs licht positief lijkt te zijn t.a.v. het gasverbruik.



Figuur 2-8. Boven: Elektriciteits- en gasverbruik van bodemenergiesystemen bij verschillende dichtheden. Onder: Relatief verschil in uitstoot en energiegebruik tussen lage dichtheid scenario (S2-O3) en de hoge dichtheidsscenario (O1-O2).

De resultaten per gebouwen worden vertroebeld door de grootte van het gebouw, kleinere gebouwen hebben immers ook een kleinere energievraag. In de onderste grafiek

van Figuur 2-8 is de procentuele verandering van de CO₂ uitstoot en elektriciteit en gas gebruik weergegeven voor het scenario met hoge dichtheid (S1-O2) t.o.v het scenario met lage dichtheid (S2-O3). Hieruit blijkt dat ook de relatieve verschillen beperkt zijn. met name het verschil in elektriciteitsgebruik is verwaarloosbaar. De verschillen in gasgebruik zijn procentueel wel significant, maar dat is even zo vaak positief als negatief. De grootste procentuele verschillen zijn vooral zichtbaar bij gebouwen met lage energievraag, wat die gebouwen ook gevoelig maakt voor grote relatieve verschillen (m.u.v. gebouw 12).

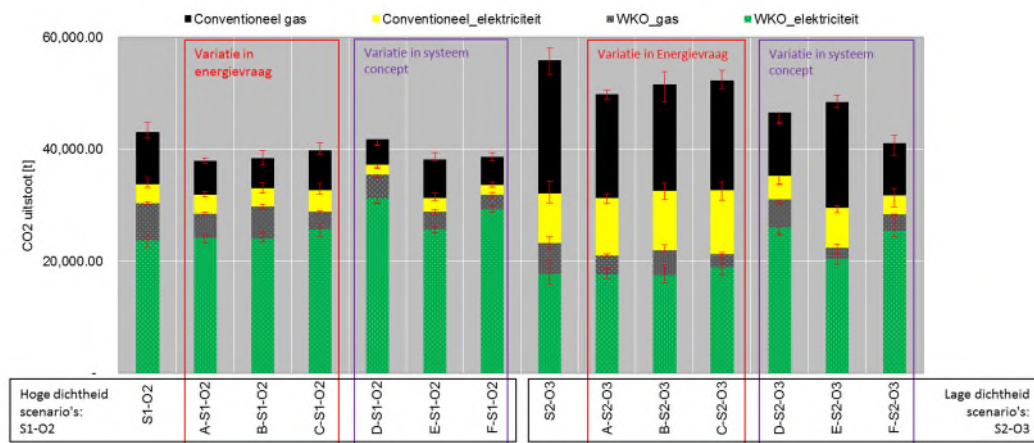
Uit Figuur 2-8 blijkt dat gebouwen 12 en 16 een relatief hoog gasgebruik hebben. Dit komt omdat er beperkte ruimte rondom het pand is om bronnen te kunnen plaatsen, deze gebouwen hebben daardoor wel vaak een bodemenergiesysteem maar altijd te weinig bronnen en daardoor broncapaciteit te kort. Dit zorgt voor een veelvuldige inzet van de piekkel met bijbehorend gasgebruik. Ook zijn er 6 gebouwen die ontbreken in Figuur 2-8. Deze gebouwen hebben niet te weinig simulaties van deze 3 scenario's een bodemenergiesysteem, omdat er geen bronnen geplaatst kunnen worden in de NetLogo simulatie. Het gaat om gebouwen in het oude deel van de binnenstad van Utrecht aan de rand van het plangebied met zeer weinig ruimte om bronnen in te kunnen passen (systemen 3, 5, 20, 22, 23 en 24).

Uit voorgaande blijkt dat een optimale afstand voor dezelfde type bronnen 0.5 tot 1 keer thermische straal is. Voor tegenovergestelde type bronnen is dat minimaal 2 keer de thermische straal. In verband met het ontstaan van ruimte tussen bronnen die niet door een ander systeem kunnen worden benut, is de afstand tussen tegenovergestelde typen bronnen t.b.v. het optimaal bodemgebruik beter niet veel groter dan 2 keer de thermische straal.

2.2.2 Variaties in energievraag en systeemconcept

In Figuur 2-9 zijn de resultaten van de base case S1-O2 en S2-O3 en aanvullende scenario's met gelijke afstandsregels opgenomen. Hierbij is alleen gekeken naar de CO₂ uitstoot waarbij er onderscheid is gemaakt tussen de verschillende componenten die bijdragen aan de uitstoot.

De drie energievraag scenario's geven redelijk hetzelfde beeld als de base cases. Het gas gebruik van de bodemenergie installaties neemt iets af als de energievraag sterker varieert (B) en de systemen niet individueel in balans hoeven te zijn (A). Bij klimaat verandering (C) neemt het stroomgebruik toe bij een monovalent systeem en het gasgebruik iets af, wat consistent is met de verandering in energievraag. Er is ook weinig verschil tussen hoe de hoge en lage dichtheid scenario's reageren op deze variaties. In beide gevallen presteren zowel de bodemenergie als de conventionele systemen vrijwel gelijk, waaruit wordt opgemaakt dat de energieprestatie niet erg afhankelijk is van variaties in energievraag.



Figuur 2-9. De gemiddelde CO₂ uitstoot per scenario uitgesplitst per type systeem. Linker helft zijn de scenario's met hoge dichtheid, rechts de scenario's met lage dichtheid.

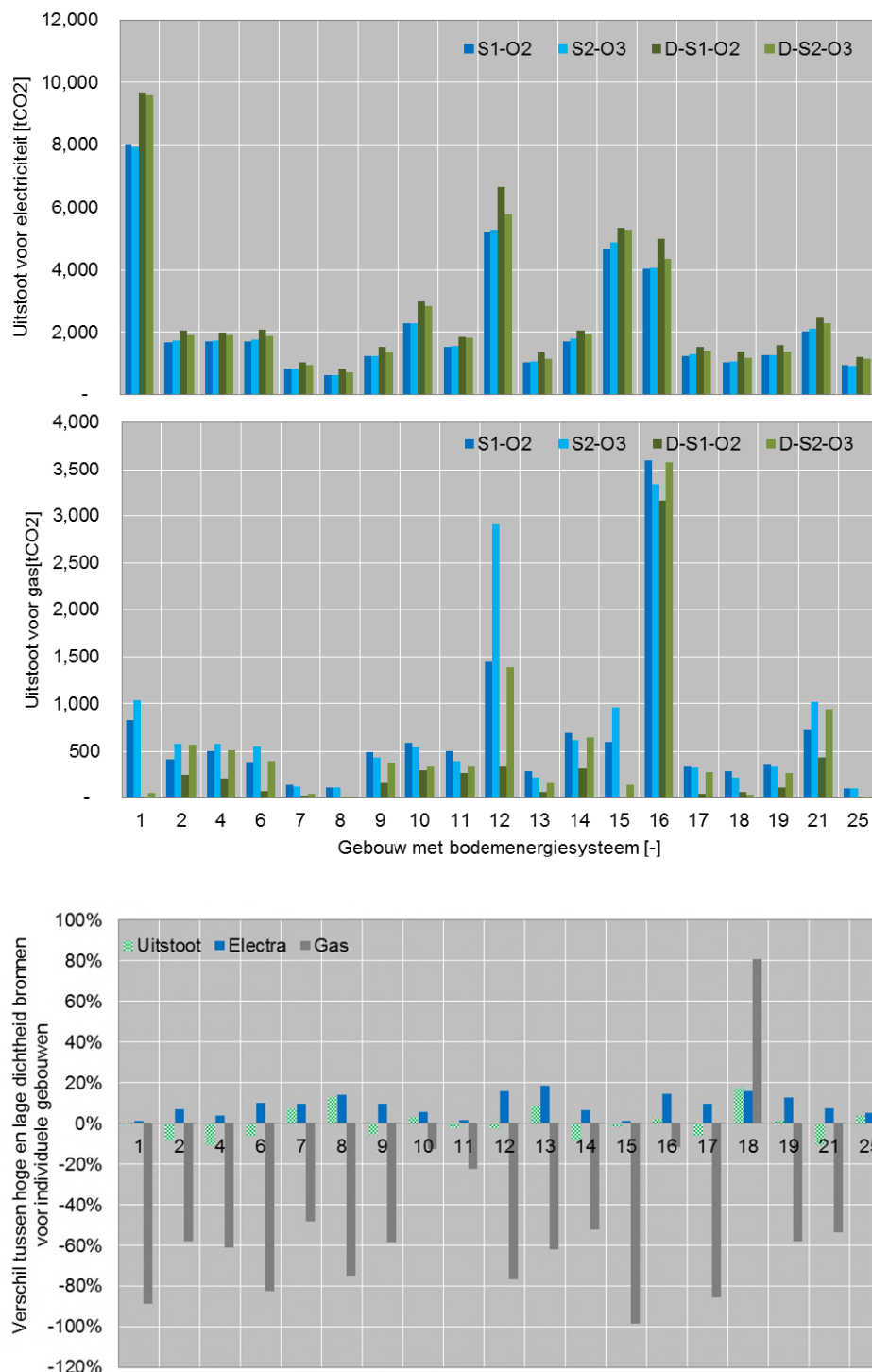
In meer detail over Figuur 2-9: De variaties in het systeemconcept laten duidelijkere verandering in de resultaten zien. Bij de monovalente systemen (D en F) neemt het stroomgebruik van de bodemenergiesystemen flink toe (40% bij lage en 25% bij hoge dichtheid), terwijl het gasgebruik van de conventionele installaties juist fors (50%) afneemt in beide gevallen. Het verschil in stroomgebruik van de bodemenergiesystemen komt doordat er relatief meer bodemenergiesystemen zijn in de hoge dichtheid scenario's waardoor de procentuele verandering van de toename beperkt is t.o.v. de lage dichtheid scenario's. De totale uitstoot neemt bij de hoge dichtheid daardoor wel (iets) toe: de toename in stroomgebruik zorgt voor de toename in uitstoot, het gasgebruik neemt wel af. Op termijn zou door verduurzaming van de electriciteitsmix van het net de uitstoot geassocieerd met stroomgebruik verder moeten dalen waardoor het opweegt tegen de verminderde ketel inzet. Dat is met de mix van het elektriciteitsnet in Nederland in 2019 nog niet het geval. Verhoogde ΔT (scenario E) laat zien dat het gas gebruik van de bodemenergiesystemen met 50% afneemt, wat logisch is omdat de bronnen een groter vermogen kunnen leveren. Ook het gasgebruik van de conventionele systemen neemt af omdat door de verhoogde ΔT het benodigde aantal bronnen kleiner is en er dus meer bodemenergiesystemen kunnen worden geaccommodeerd (ca 10% meer)

Het heeft dus vooral zin om monovalente systemen met een hogere ΔT tussen de bronnen aan te leggen als de CO₂-uitstoot per kWh in het elektriciteitsnet flink daalt. De systemen presteren /reageren gelijk onder hoge of lage dichtheid omstandigheden. Dus ook bij veranderende energievraag of toegepast systeemconcept is met hoge dichtheid meer energiewinst te halen in een gebied.

Energieprestatie gebouwen met bodemenergie

Voor de base case en scenario D is in beeld gebracht hoe de prestatie van individuele bodemenergiesystemen verandert als de bronnen van nabijgelegen gebouwen zich dichterbij bevinden. Uit Figuur 2-10 blijkt dat de toename in elektriciteit gebruik voor de monovalente systemen wordt veroorzaakt door de toename in energiegebruik van de open bodemenergiesystemen. Het elektriciteitsgebruik van de bronnen en de warmtepomp verandert beperkt door de toepassing van een monovalent systeem. Uit de data blijkt dat de inzet van de droge koeler significant toeneemt, omdat de toegenomen inzet van de warmtepomp in de winter, voor een grotere onbalans zorgt. Bij monovalente systemen zijn de individuele systemen iets gevoeliger voor negatieve interactie. De

verschillen zijn nog steeds erg klein, maar er zijn iets meer systemen die het onder kleinere afstanden iets minder goed doen.



Figuur 2-10. Boven: Elektriciteit- en gasgebruik bij bodemenergiesystemen bij verschillende dichtheden en systeemconcept. Onder: relatief verschil in uitstoot en energiegebruik tussen lage dichtheid scenario (D-S2-O3) en de hoge dichtheidsscenario (D-O1-O2).

Het gasgebruik verloopt een stuk grilliger bij de monovalente systemen, 1 uitzondering daargelaten neemt het gasgebruik bij de monovalente systemen echter flink af en is die juist vaak hoger bij de lage dichtheid scenario's. Dit wordt veroorzaakt doordat er minder bronnen kunnen worden geplaatst. Voor individuele gebouwen kan het voor het gasgebruik flink schelen of de bronnen met hoge of lage dichtheid kunnen worden geplaatst.

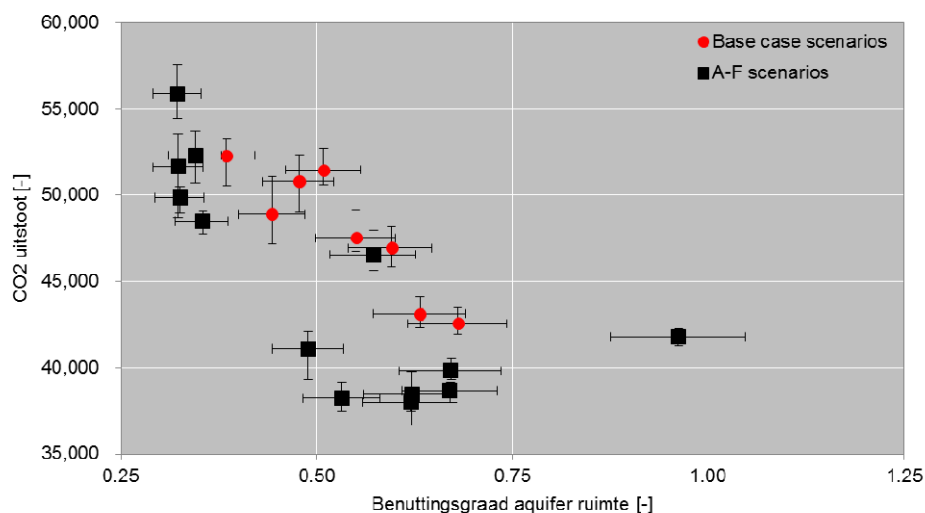
2.2.3 Mate van benutting

De benuttingsgraad is gedefinieerd als het jaarlijkse verpompte volume van alle bodemenergiesystemen in het gebied gedeeld door het volume van de aquifer (Bijlage II, §5). De gehanteerde benuttingsgraden zijn in Figuur 2-11 uitgezet tegen de gerealiseerde CO₂ uitstoot voor de verschillende scenario's.

Met de gehanteerde zelfordening en afstandsregels heeft toename van benuttingsgraad in ieder geval tot circa 0.75 afname van CO₂ uitstoot tot gevolg. Daarnaast neemt de spreiding in uitstoot ook af naarmate de dichtheid toeneemt. De spreiding in benuttingsgraad neemt wel toe over de model realisaties met toename in benuttingsgraad, wat een indicatie is dat ruimtelijke inpassingscondities nog wel een groot effect kunnen hebben op welke benuttingsgraad kan worden bereikt onder dezelfde afstandsregels.

Tot 0.75 benutting lijkt ordening/planning niet nodig, uit Figuur 2-6 blijkt echter dat zelfs in de scenario's met de hoogste dichtheid niet alle gebouwen een bodemenergiesysteem hebben.

Boven de 0.75 lijkt met zelf-ordening de uitstoot niet af te nemen (hoewel maar op basis van 1 punt). Dus dan is of de maximale potentie bereikt, of met ordening kan de bodem beter worden benut. Deze ranges komen goed overeen met die eerder zijn geïdentificeerd door Bloemendal et al. (2018).



Figuur 2-11. Benuttingsgraad en uitstoot voor elektriciteitsmix 2019 onder verschillende scenarios met de kwartielen. De waarde van bijna 1 is scenario D-S1-O2 (monovalente systemen). De error-bars geven de interkwartiel waarden.

N.B. De benuttingsgraad vergelijkt het benodigde opslagvolume met het volume in de aquifer. Door het verschil in volumetrische warmte capaciteit, neemt een volume water met een bepaalde temperatuur in de aquifer circa 1.5 keer meer ruimte in.

Bij hogere dichtheid zijn er meer plekken in de aquifer tussen warme en koude bronnen die aan het einde van de zomer warm zijn en aan het einde van de winter juist koud. De ruimte in de aquifer wordt dus eigenlijk dubbel gebruikt. Een reden dat deze hoge benutting beperkte impact heeft op de prestaties van de systemen heeft ook te maken met kort cyclische opslag en terugwinning gedurende het voor- en najaar. Op dag/week schaal warmte opslaan en terug winnen, draagt wel bij aan het totale opslagvolume maar niet aan vergroting van de thermische straal, circa 25% van het totale opslagvolume wordt in de herfst en lente periode kort cyclisch verpompt.

2.3 Discussie & Conclusies

Discussie

Overcapaciteit in vergunning

Zowel in de praktijk als in de simulaties in deze studie is het verwachte seizoenale opslagvolume het uitgangspunt voor de onderlinge afstand waarop bronnen worden geplaatst (de thermische straal hangt immers af van opslagvolume en de aquiferdikte (vergelijking (1))). In de simulaties wordt het van tevoren opgegeven/verwachte opslagvolume ook daadwerkelijk toegepast, het varieert een beetje door de variatie in klimatologische omstandigheden, maar vooraf geprognoseerde opslagcapaciteit wordt goed benut in de simulaties.

In de praktijk wordt door bodemenergiesysteem eigenaren op de verwachte opslagvolume echter altijd een veiligheidsfactor toegepast, waardoor de thermische straal waarop de vergunningaanvraag wordt gebaseerd veel groter is dan in de praktijk (Beernink et al., 2019; Willemsen, 2016). Daarnaast wordt er ook kort-cyclisch water de bronnen in en uitgepompt in de herfst en lente, door afwisselende warmte- en koelvraag. Daar door geeft zelfs het werkelijke totale seizoenale opslagvolume een overschatting van de werkelijke grootte van de thermische straal.

Het is daarom de vraag hoe de afstandsregels, die in deze studie als optimaal zijn geïdentificeerd, moeten worden vertaald naar de praktijk. Want $0.5 \cdot R_{th}$ is een grotere afstand wanneer het opslagvolume in de vergunningsaanvraag met een veiligheidsfactor is vermenigvuldigd. Zowel $0.5 \cdot R_{th}$ als $1 \cdot R_{th}$ resulteren tot ongeveer dezelfde reductie in CO₂ uitstoot. Rekening houdend met bovenstaande discussiepunten, lijkt het daarom verstandig om met relatief kleine vermenigvuldigingsfactoren te werken (D_s/D_o) op de opgegeven thermische stralen in vergunningsaanvragen.

Andere systeemconcepten

Het bodemenergie systeemconcept uit de ISSO39 is als uitgangspunt gebruikt voor alle open bodemenergiesystemen in deze simulaties. In de praktijk wijken systemen altijd een beetje tot erg veel van elkaar af. Gebouwen met andere systeemconcepten⁷ reageren anders op interactie tussen bronnen. Het is vooral de fysieke koppeling tussen componenten die het mogelijk maakt om onder verschillende condities ook andere bedrijfssituaties te kunnen hebben. Dergelijke koppelingen zijn meestal later nog wel aan te brengen, maar dat is relatief kostbaar en maakt het open bodemenergiesysteem

⁷ zoals toepassing van andere componenten, of andere hydraulische koppeling tussen componenten en daarmee dan ook een andere regeling

meestal lastiger te beheren. In drukke gebieden is het daarom verstandig om bodemenergiesystemen robuust te ontwerpen met voldoende mogelijkheden voor verschillende bedrijfssituaties.

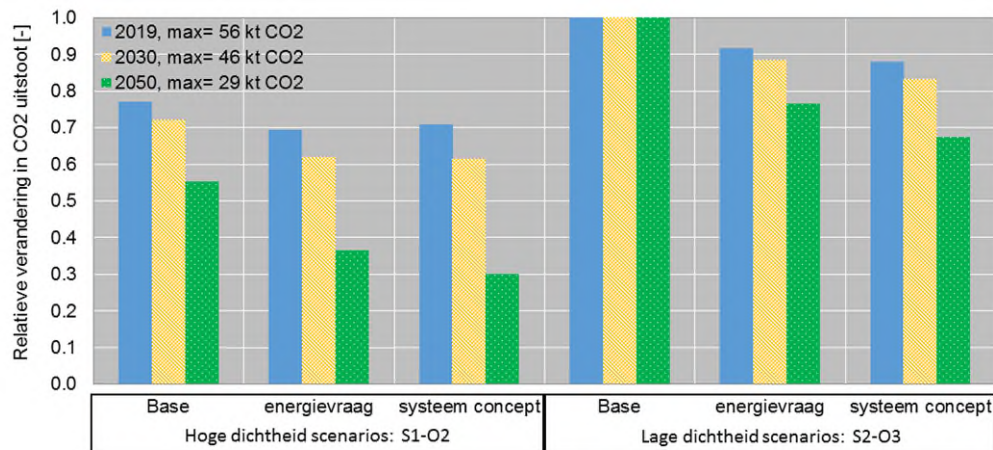
Vergelijking met andere duurzame technieken.

In deze studie is de vergelijking gemaakt tussen bodemenergie en conventionele technieken. In de toekomst worden conventionele technieken wellicht niet meer (zo veel/makkelijk) toegepast. Dan rijst de vraag hoe hogere dichtheid van bodemenergiesystemen presteert t.o.v. lagere dichtheid met andere duurzame technieken?

Als er in de toekomst energiesystemen komen die beter werken dan bodemenergiesystemen dan zullen gebouweigenaren die kiezen. Met als gevolg dat de dichtheid aan bodemenergiesystemen laag blijft. Ervanuit gaande dat een gebouweigenaar de voor hem/haar meest optimale techniek kiest, dan zorgt het toepassen van hoge dichtheidsregels dat bodemenergie een beschikbare optie blijft.

Afname CO₂-uitstoot elektriciteitsproductie

De komende jaren neemt de CO₂-uitstoot van de elektriciteitsproductie af. De relatieve winst door verdichting neemt daarmee sterk toe, omdat de verschillen in gasgebruik relatief groot zijn maar nu door de CO₂-uitstoot van de elektriciteitsmix in 2019 gemaskeerd worden. In Figuur 2-12 is de relatieve verandering in CO₂-uitstoot voor de verschillende scenario's weergegeven. Hieruit blijkt dat met de elektriciteitsmix op het Nederlandse net in 2019 ca 30% uitstoot-reductie kan worden gerealiseerd door te verdichten. Als de stroomproductie verder verduurzaamt richting 2050 levert verdichten een reductie van 50 tot 70% op.



Figuur 2-12. Relatieve CO₂-uitstoot verandering bij veranderende elektriciteitsmix op het net. De waarden van de energievraag en systeem concept grafieken zijnde gemiddelden van respectievelijk de ABC en DEF scenarios.

Conclusies

De resultaten bevestigen de uitkomsten van eerder onderzoek: door kleinere afstanden tussen bronnen te hanteren kunnen er meer bronnen worden geplaatst en daardoor meer gebouwen met bodemenergie worden voorzien, wat weer zorgt voor een vermindering van CO₂-uitstoot. Ten aanzien van de vragen die werden beoogd te beantwoorden met het werk beschreven in dit hoofdstuk:

1. Hoe werken thermische energieverliezen als gevolg van onderlinge interactie in de bodem door op het energierendement (besparing) van individuele systemen?
Antwoord: zeer beperkt, individuele bronnen ondervinden wel effect van een buur-systeem als het dichterbij wordt geplaatst, maar die werken niet door in de energieprestaties van de systemen. Zeer kleine effecten zijn waargenomen en die zijn overwegend positief bij bivalente systemen. Bij monovalente systemen is het meer 50-50: sommige individuele systemen hebben een klein nadeel, andere een klein voordeel. Maar veel meer percelen (10-40%) hebben het voordeel überhaupt een bodemenergiesysteem te kunnen toepassen
2. Wat is de toename in totale CO₂-uitstootreductie in een gebied door het vergroten van de dichtheid van open bodemenergiesystemen?
Antwoord: Op basis van de CO₂-uitstoot van elektriciteitsmix op het net in 2019 kan met kleinere bronafstanden circa 30% extra CO₂ worden bespaard. Volgens de verwachte toename van de duurzame elektriciteitsproductie loopt dat op naar 40% in 2030 en 50 tot 70% in 2050. Rekening houdend met de overstap naar monovalente systemen neemt de afname in CO₂-uitstoot verder toe naar 45% in 2030 en 85% in 2050. Let wel, bij de hoge percentages in 2050 gaat het om kleinere hoeveelheden CO₂-uitstoot waardoor de relatieve verschillen groter zijn.
3. Welke voorschriften voor onderlinge bronafstanden en bronontwerp kunnen er gelden voor bodemenergiesystemen in gebieden die nu nog niet druk zijn, maar dat op termijn mogelijk wel worden?
Antwoord: ook in minder drukke gebieden kunnen gebouweigenaren profijt hebben van het combineren van dezelfde type bronnen, en daarmee wordt het gebied "open gehouden" voor eventuele groei van systemen in de (verre) toekomst.
 - a. Voor dezelfde type bronnen moet de afstand liggen tussen 0.5 en 1 keer de thermische straal (bij voorkeur ook niet meer dan dat - aansluiten om geen blinde vlekken te creëren)
 - b. Voor tegenovergestelde typen bronnen ~2 keer de thermische straal. Niet dichterbij elkaar maar ook niet veel verder om blinde vlekken te voorkomen.
4. Tot welke ruimtelijke dichtheid van open bodemenergiesystemen kan een aquifer worden benut voor open bodemenergie? En wat zijn geschikte parameters om dergelijke grenzen te definiëren?
Antwoord: Het vergroten van de dichtheid kan met zelf-ordening en algemene afstandsregels tot een benuttingsgraad van circa 75%. Het valt op basis van de simulaties echter niet op te maken of er met plannen een hogere benuttingsgraad kan worden bereikt.

Naast de bevestiging van eerdere inzichten zijn de belangrijkste nieuwe inzichten die uit deze studie naar voren komen:

- Het vergroten van de dichtheid van bodemenergiesystemen heeft beperkt effect op de energieprestatie van individuele bodemenergiesystemen.
- Bij monovalente systemen neemt het totale gasverbruik bij hoge dichtheid significant af, het stroomgebruik van de droge koeler neemt echter wel toe. Een bodemenergiesysteem kan heel efficiënt de basislast voor verwarming en koeling leveren en een gasketel is een efficiënte manier om de pieken in te vullen. Het bodemenergiesysteem presteert suboptimaal als het ook de pieken moet leveren. Dit is dus alleen verstandig om te doen als alle elektriciteit die wordt gebruikt ook duurzaam is opgewekt.

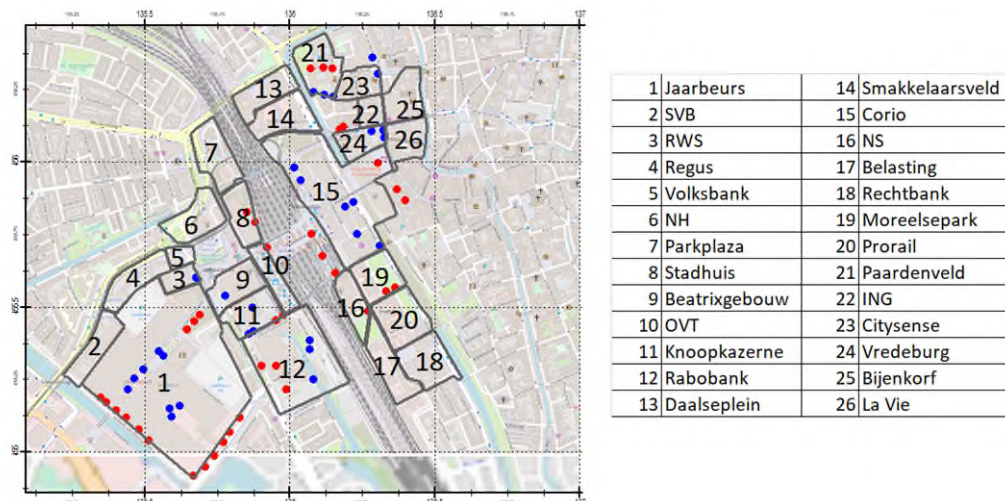
- Een kleine verbetering van de ΔT tussen de bronnen heeft een klein positief effect op de energieprestatie. Het vergroten van de ΔT heeft een klein positief effect op het aantal bronnen dat kan worden bijgeplaatst door de kleinere thermische straal.

De resultaten waarop deze inzichten zijn gebaseerd zijn consistent met variatie in energievraag (§2.1.5) en onder realistische plaatsingscondities qua bovengrondse inpassing van bron locaties (§2.1.1).

3 Hoge dichtheid in de praktijk

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de theoretische analyse uit hoofdstuk 2 getoetst voor toepasbaarheid in praktijkcondities. Hiervoor is gebruik gemaakt van een case studie in het centrumgebied van Utrecht. De toepasbaarheid van de eerder geïdentificeerde plaatsingsregel (1x thermische straal voor gelijke type bronnen en 2x thermische straal voor tegenovergestelde type bronnen) om een hogere dichtheid van open bodemenergiesystemen te bereiken is verder uitgewerkt. Een overzicht van de bestaande gebouwen en de gerealiseerde of vergunde bronnen van de open bodemenergiesystemen is weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Overzicht van gebouwen en gerealiseerde of vergunde open bodemenergiesystemen; rode cirkel is warme bron, blauwe cirkel is koude bron. NB de nummering van de gebouwen komt niet overeen met de nummering in hoofdstuk 2.

In paragraaf 3.2 zijn de verschillende actoren beschreven. Daarna volgt in paragraaf 3.3 een analyse van de werking van de huidige systemen. In paragraaf 3.4 is de vertaling van de werking van de huidige systemen naar de thermische stralen en opslagvolumes gemaakt. In paragrafen 3.5 en 3.6 zijn de opzet en resultaten van modelberekeningen weergegeven en tenslotte volgt in paragraaf 3.7 een discussie.

3.2 Actoren

Voor de meeste betrokken actoren is het belangrijk om het probleem van optimaal gebruik van de ruimte voor bodemenergie op te lossen. De actoren kunnen in groepen worden ingedeeld waarbij voor elke groep geldt dat ze bestaat uit een veelheid van verschillende partijen. De volgende groepen actoren worden onderscheiden:

- Gebruikers van bodemenergie. Bestaande gebruikers hebben een gevestigd belang en zijn direct aanspreekbaar omdat bekend is wie dat zijn. Toekomstige gebruikers kunnen met hogere dichtheid bodemenergie makkelijker toepassen, maar wie komt voor hun belangen op?

- Overheden, zowel rijksoverheid als provincie en gemeente Utrecht willen doelmatig en optimaal gebruik van de ondergrond en zo veel mogelijk CO₂-uitstootreductie, maar hebben ook andere belangen in de ondergrond, zoals grondwaterkwaliteit.
- Bodemenergiemarkt. Makers en exploitanten van bodemenergiesystemen hebben baat bij meer toepassing van bodemenergie onder duidelijke randvoorwaarden.
- Overige gebruikers van de ondergrond, zoals drinkwaterbedrijf Vitens. Deze belangen betreffen o.a. de grondwaterkwaliteit en de ruimte die beschikbaar is voor de betreffende functie.

Met één eigenaar van een open bodemenergiesysteem in het gebied, de Rabobank, is een uitgebreid interview gehouden. De details van dit interview staan in bijlage III. Rabobank geeft aan graag mee te willen werken aan de maatschappelijke opgave om meer bodemenergie in het gebied te benutten. Rabobank geeft wel aan randvoorwaarden te hebben, zoals het behouden van het gewenste comfort in hun gebouw en het in stand houden van de goede, efficiënte werking van hun open bodemenergiesysteem.

3.3 Analyse werking bestaande systemen

Voor de in werking zijnde systemen is een vergelijking gemaakt tussen het werkelijke gebruik en de vergunde jaarlijkse opslagvolumes. Van de RUD Utrecht is voor een aantal open bodemenergiesystemen informatie over vergunning, locatie van bronnen en gebruik ontvangen. Het betreft de systemen van Jaarbeurs, NS Stations, Rabobank, Corio 1 en 2, KTT/LKT, Muziekpaleis en Paardenveld. Het gebruik is gebaseerd op de jaaropgaven voor de periode 2010-2018, maar helaas zijn niet voor alle jaren de jaaropgaven ontvangen. In bijlage IV wordt een overzicht per open bodemenergiesysteem gegeven voor welke jaren de jaaropgaven zijn gebruikt. Een overzicht van de verpompte watervolumes voor de betreffende bodemenergiesystemen voor de opgegeven jaren is weergegeven in bijlage IV. In Tabel 3.1 zijn de gemiddelde waarden van deze systemen weergegeven.

Uit de monitoringsdata blijkt het volgende:

1. De daadwerkelijk verpompte volumes zijn veel kleiner dan de vergunde volumes. Bij het open bodemenergiesysteem van Corio heeft dat een technische oorzaak. Van de Jaarbeurs en Paardenveld is bekend dat zij ook gebruik maken van stadsverwarming en zeker bij de Jaarbeurs wijkt de benutting van de gebouwen af van de benutting van 'normale' kantoorgebouwen.
2. Bij de meeste systemen wordt er meer volume water gebruikt voor koude levering en daarmee voor opslag van warmte in de bodem dan in vergelijking met het volume water voor warmtelevering. In bijlage IV is het voor het systeem van NS Stations verder uitgewerkt. Voor dat systeem is de warmte- en koudeopslag redelijk goed in balans. De ΔT is bij de warmteopslag (en koeling van het gebouw) duidelijk kleiner. Aan het einde van het koelseizoen heeft het onttrokken 'koude' water meer de achtergrondtemperatuur van het grondwater (niet apart in de tabel in de bijlage weergegeven).

De gerapporteerde warmte- en koelvraag is ook veel kleiner dan de met de methodiek in Bijlage II berekende warmte- en koelvraag. Dat komt omdat bij het berekenen van de warmte- en koelvraag er vaak conservatieve kentallen zijn gebruikt en doordat een deel van de vraag op een andere manier wordt ingevuld.

Tabel 3.1 Overzichtsdata van het gemiddelde verpompte volume en vergunning van bodemenergiesystemen in centrumgebied Utrecht

Open bodemenergiesystemen	volume water		vergunning	ratio geleverd/vergund	aantal bronnen		opmerking
	warmte-levering m ³	koude-levering			warm	koud	
CORIO 1	2.848	1.757	1.080.000	0,43	3	3	
Corio 2	Geen data	Geen data	1.865.400	Geen data	3	3	
Ns Station	177.701	256.724	2.307.600	18,83	7	7	maar 3 van de 7 dubletten gerealiseerd; ratio hiervoor gecorrigeerd
Rabobank	186.513	252.893	1.490.000	29,49	5	5	Vanaf 2019 is er een extra gebouw aangesloten waardoor de warmte/koudevraag ongeveer verdubbelt; dit zit niet in deze analyse.
KTT/LKT	Geen data	Geen data	504.240	Geen data	3	3	
Jaarbeurs	146.888	129.165	774.000	35,67	15	8	
Muziekpaleis	112.100	343.900	624.200	73,05	2	2	
Paardenveld	26.140	140.730	520.000	32,09	3	3	

3.4 Optredende thermische straal en opslagvolume

Opslagvolume

De tijdseries van de opslagvolumes zijn gebaseerd op de vraag op basis van de conservatieve aannamen volgens de methodiek in bijlage II vermenigvuldigd met de correctiefactor uit Tabel 3.2. Voor systemen met jaargaven zijn de gerapporteerde volumes vergeleken met de berekende warmte- en koudevraag voor de jaren waarvoor data beschikbaar zijn. Deze warmte/koudevraag is omgewerkt naar watervolume op basis van een constante ΔT van 6° C. Per bodemenergiesysteem is een gemiddelde ratio (gerapporteerd volume/ berekend volume volgens de methodiek in Bijlage II) bepaald voor zowel warmte- als koudelevering. Voor systemen zonder gerapporteerde data en voor de systemen van Corio 1, die technische problemen heeft, en Jaarbeurs en Paardenveld, waarvan bekend is dat een deel van de vraag via stadswarmte wordt geleverd, is een correctiefactor van 0.3 gebruikt voor zowel warmte- als koudelevering.

Tabel 3.2 Correctiefactoren voor bepaling meer realistische opslagvolumes ten opzichte van de berekende volume op basis van de warmte- en koudevraag volgens de methodiek in bijlage II.

Open bodemenergiesysteem	Correctiefactor opslagvolume	
	warmte	koude
Stadhuis en OV Terminal	0.35	0.25
Rabobank	0.4	0.25
Vredenburg (Muziekpaleis)	0.3	0.4
Overige gebouwen	0.3	0.3

Thermische straal

Op basis van de analyse in de voorgaande paragraaf is voor het vervolg voor de thermische straal van open bodemenergiesystemen 2 scenariowaarden bepaald:

1. Een realistische thermische straal. Deze is gebaseerd op het gemiddelde jaarlijkse opslagvolume dat hiervoor is beschreven.
2. Een conservatieve thermische straal. Deze is bepaald op basis van het vergunde debiet of voor gebouwen zonder vergunning op basis van de berekende warmte- en koudevraag en een constante ΔT van 6° C en een filterlengte van 26 m. Hierbij is de correctie volgens Tabel 3.2 dus niet toegepast. Bij de berekening van de thermische straal op basis van het vergunde debiet is wel rekening gehouden met de uiterste situatie, waarin het gehele volume naar de warme of de koude bronnen wordt verpompt. In werkelijkheid zal deze verdeling minder scheef zijn, maar zoals uit Tabel 3.1 blijkt is deze verhouding ook geen 50/50.

In Tabel 3.3 is een overzicht gegeven van de thermische stralen van alle open bodemenergiesystemen.

Tabel 3.3 Thermische stralen voor de vergunde en de extra te plaatsen open bodemenergiesystemen

Open bodemenergiesysteem	Thermische straal (m)			
	Conservatief		Realistisch	
	warm	koud	warm	koud
Corio1	103.3	103.3	55.4	55.4
Corio 2	110.9	110.9	59.5	59.5
NS Station	80.7	80.7	41.1	41.1
Rabobank	80.9	80.9	47.1	47.1
KTT/LKT	57.6	57.6	30.9	30.9
Jaarbeurs cluster 1	29.6	36.2	13.3	16.2
Jaarbeurs cluster 2	29.6	41.8	15.2	21.5
Jaarbeurs cluster 3	29.6	41.8	10.7	15.1
Muziekpaleis	78.5	78.5	58.3	58.3
Paardenveld	53.4	53.4	27.8	27.8
SVB	67.1	67.1	36.0	36.0
RWS	67.1	67.1	36.0	36.0
Regus	67.1	67.1	36.0	36.0
Volksbank	67.1	67.1	36.0	36.0
NH	94.9	94.9	50.9	50.9
Parkplaza	47.5	47.5	25.5	25.5
Beatrixgebouw	58.1	58.1	31.2	31.2
Knoopkazerne	52.4	52.4	28.1	28.1
Daalseplein	53.1	53.1	28.5	28.5
Smakkelaarsveld	67.9	67.9	36.5	36.5
Belasting	58.1	58.1	31.2	31.2
Rechtbank	53.1	53.1	28.5	28.5
Moreelsepark	58.1	58.1	31.2	31.2
Prorail	75.0	75.0	40.3	40.3
ING	75.0	75.0	40.3	40.3

Citysense	75.0	75.0	40.3	40.3
Bijenkorf	80.5	80.5	43.2	43.2
La_Vie	80.5	80.5	43.2	43.2

3.5 Opzet modelberekeningen verhogen dichtheid van open bodemenergiebronnen

3.5.1 Aanpak

Voor de case studie centrumgebied Utrecht zijn een aantal scenario's doorgekend om het verdichtingsscenario (1 x thermische straal hetzelfde type bronnen en 2 x thermische straal tegenovergestelde type bronnen) te vergelijken met het huidige beleid. De gevolgen van het verhogen van de dichtheid bij plaatsing van nieuwe open bodemenergiesystemen voor de huidig vergunde systemen worden hierdoor inzichtelijk gemaakt. In de vergelijking is gekeken naar het effect op de retourtemperatuur en de mogelijkheid om binnen de vergunning meer water te verpompen om dezelfde hoeveelheid warmte en/of koude te leveren.

3.5.2 Ondergrondmodel

Het ondergrondmodel dat gebruikt is, is gebaseerd op het model dat is gebruikt in het project Citychlor (Deltares, 2013). Ten opzichte van het model dat is gebruikt in Hoofdstuk 2, bevat dit model ook:

- geologische lagen onder en boven het watervoerende pakket,
- heterogeniteit,
- achtergrondstroming,
- variatie in diepte van filterstelling van de bestaande bronnen op basis van aangeleverde data.

In Bijlage V is een uitgebreide beschrijving van het model gegeven.

3.5.3 Opslagvolumes van de bodemenergiesystemen

De opslagvolumes van de open bodemenergiesystemen zijn gebaseerd op een gesimuleerde 30-jarige tijdreeks op basis van de temperatuur in de Bilt voor de periode 1989-2018. Hierbij is grotendeels dezelfde methodiek als beschreven in bijlage II gevolgd met een paar aanpassingen:

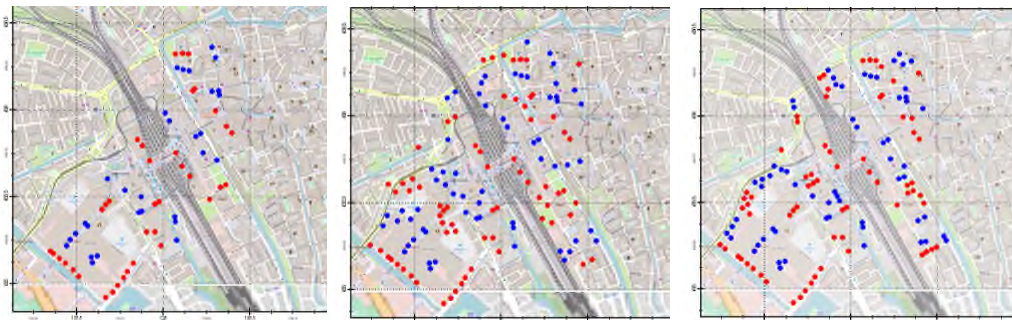
- Bij de omrekening van de warmte- en koudevraag naar opslagvolume is een vaste ΔT van 6 °C gebruikt.
- De warmte- en koudevraag is gecorrigeerd met de factoren uit Tabel 3.2.
- Iedere 5 jaar is gekeken of de energiebalans van opgeslagen warmte en koude niet meer dan 5% afwijkt en indien nodig is deze hersteld door extra koude te laden in de maanden januari, februari en december of extra warmte te laden in de maanden juni, juli en augustus in het 5^{de} jaar van de periode waarover de warmtebalans niet voldoet. Indien het verpompte volume daardoor groter zou worden dan de vergunning, dan is dat deel van de onbalans hersteld door minder warmte of koude te leveren door de desbetreffende opslagvolumes in alle maanden met een gelijk percentage terug te schroeven.
- Debieten op uurbasis zijn opgeschaald naar tijdstappen van 1 maand.

In Bijlage V is een voorbeeld van de tijdreeks van 30 jaar voor een warme bron van NS stations weergegeven.

3.5.4 Beschrijving van de scenario's

De volgende scenario's zijn gesimuleerd:

1. Situatie met de huidige vergunde systemen
In dit scenario zijn de huidige vergunde systemen doorgerekend. De bronnen van de huidige open bodemenergiesystemen zijn weergegeven in Figuur 3-2 (links).
2. Verhogen dichtheid op basis van conservatief opslagvolume
In dit scenario zijn voor het plaatsen van de bronnen de thermische stralen gebruikt die zijn weergegeven in Tabel 3.3 onder de kolommen "thermische straal conservatief". De locaties van de bronnen in dit scenario zijn weergegeven in Figuur 3-2 (midden).
3. Verhogen dichtheid op basis van realistisch opslagvolume
In dit scenario zijn voor het plaatsen van de bronnen de thermische stralen gebruikt die zijn weergegeven in Tabel 3.3 onder de kolommen "thermische straal realistisch". De locaties van de bronnen in dit scenario zijn weergegeven in Figuur 3-2 (rechts).



Figuur 3-2 Locaties van de bronnen in scenario's 1-3; Rood zijn warme bronnen, blauw zijn koude bronnen.

4. Homogene eigenschappen watervoerende pakket
In dit scenario is gekeken hoe groot het effect is van een homogene ondergrond in vergelijking met een heterogene bodemopbouw voor het scenario met de hoogste dichtheid (scenario 3). De bodemopbouw uit de GeoTOP wordt in dit scenario voor het traject -11 tot -50 m NAP vervangen door een zandlaag met een horizontale doorlatendheid van 30 m/dag en een verticale doorlatendheid van 5 m/dag.
5. Delen overcapaciteit met burens
In dit scenario is gekeken of de vergunde volumes van bestaande open bodemenergiesystemen benut kunnen worden om behalve het gewenste volume van het eigen gebouw ook warmte en koude te leveren aan gebouwen in de buurt. Dit gebeurt door voor alle betrokken gebouwen de jaarlijkse gewenste volumes uit de tijdserie van 30 jaar bij elkaar op te tellen en te kijken of de gemiddelde en de maximale waarde binnen de vergunning past. Hierbij wordt de som van het volume van de warmte- en koudevraag vergeleken met het vergunde opslagvolume.

3.5.5 Benuttingsgraad watervoerende pakket

De benuttingsgraad van de verschillende scenario's is berekend op basis van de maximale verpompte volumes uit de 30-jarige tijdreeks en het volume van het watervoerende pakket, zoals in Hoofdstuk 2. Het volume van het watervoerende pakket wordt bepaald door de oppervlakte te vermenigvuldigen met de dikte van het watervoerende pakket. Voor de 1^e drie scenario's is deze oppervlakte niet gelijk, maar

wordt bepaald op basis van de gemodelleerde bodemenergie bronnen (zie Figuur 3-2) met aan de buitenrand een buffer van 1 thermische straal eromheen. Voor de dikte van het watervoerende pakket is net als in hoofdstuk 2 26 m gebruikt. Door de reductie van de warmte- en koudevraag volgens Tabel 3.2 levert dit een lagere benuttingsgraad op dan de berekeningen in hoofdstuk 2.

3.6 Resultaten

1. Scenario 1: Situatie met de huidige vergunde systemen
De gemiddelde retourtemperatuur voor de bestaande open bodemenergiesystemen voor scenario 1 zijn weergegeven in Bijlage VI. De benuttingsgraad van het watervoerende pakket bedraagt in dit scenario 20 %. In Bijlage VI zijn ter illustratie nog een aantal figuren met resultaten van dit scenario weergegeven. Het betreft een bovenaanzicht en een dwarsdoorsnede van de temperatuurverdeling in het 30^e en laatste jaar na het einde van de perioden voor koude en warmte laden.
2. Scenario 2: Verhogen dichtheid o.b.v. conservatieve opslagvolumes
In Tabel 3.4 zijn de verschillen tussen de gemiddelde retourtemperatuur voor de bestaande open bodemenergiesystemen weergegeven voor scenario 1 en 2. Het, op basis van verpompt volume water, gewogen verschil voor alle systemen bedraagt 0.01 en -0.03 °C voor respectievelijk koude- en warmtelevering. In Bijlage VI zijn voor het open bodemenergiesysteem Rabobank de gemiddelde brontemperaturen voor dit scenario vergeleken met de huidige situatie (scenario 1). Hieruit blijkt dat het effect op de retourtemperaturen voor alle systemen beperkt is en soms een kleine positieve interferentie weergeeft en soms een kleine negatieve interferentie. De grootste negatieve interferentie is 0.34 °C. De benuttingsgraad van het watervoerende pakket bedraagt in dit scenario 22%.
3. Scenario 3: Verhogen dichtheid o.b.v. realistisch opslagvolumes
In Tabel 3.4 zijn ook de verschillen tussen de gemiddelde retourtemperatuur voor de bestaande open bodemenergiesystemen weergegeven voor scenario 1 en 3. Het, op basis van verpompt volume water, gewogen verschil voor alle systemen bedraagt 0.00 en -0.01 °C voor respectievelijk koude- en warmtelevering. Hieruit blijkt dat het effect op de gemiddelde retourtemperatuur van de huidig vergunde systemen door het verhogen van de dichtheid van het aantal open bodemenergiesystemen op basis van realistische opslagvolumes beperkt is. De benuttingsgraad van het watervoerende pakket bedraagt in dit scenario 24%.
4. Scenario 4: homogene eigenschappen aquifer
In Tabel 3.4 zijn de gemiddelde brontemperaturen voor het scenario 3 en 4 met een heterogene en een homogene bodemopbouw vergeleken. Hieruit blijkt dat de temperaturen in de zowel de koude als ook de warme bronnen vrijwel gelijk zijn. De retourtemperatuur is bij de homogene bodemopbouw overal gelijk of gunstiger dan bij de heterogene bodemopbouw.
5. Scenario 5: Delen overcapaciteit met burelen
In Tabel 3.5 is weergegeven welke gebouwen steeds extra kunnen worden aangesloten op de bestaande of vergunde bodemenergiesystemen van de Rabobank, NS Stations en Corio (1 en 2 samen). Daarbij is ook aangegeven welk percentage van het vergunde opslagvolume door het gezamenlijk gebruikte systeem gemiddeld en maximaal zou worden verbruikt in de 30-jarige tijdreeks. Bij deze berekening is wel de reductie van de warmte- en koudevraag volgens Tabel 3.2 gebruikt.
In dit scenario lukt het om alle resterende beschouwde gebouwen aan te laten sluiten op de bestaande of vergunde bodemenergiesystemen van Rabobank, NS Station en Corio. De berekende jaarlijkse watervolumes passen binnen de

vergunde volumes van deze systemen. De benuttingsgraad van het watervoerende pakket bedraagt in dit scenario 34%. De gebruikte tijdreeks is gebaseerd op een meteorologische tijdreeks uit het verleden en de resultaten zijn dan ook niet geschikt om de situatie na klimaatverandering te beschouwen. Daarnaast moet opgemerkt worden dat deze berekeningen zijn gebaseerd op een maandelijks gemiddeld opslagvolume. In Utrecht worden in de vergunning ook nog eisen opgelegd aan een maximaal debiet per uur. Bij piekbelastingen zal waarschijnlijk niet altijd de gewenste koeling of verwarming uit het bodemenergiesysteem geleverd kunnen worden en zal een back-up systeem noodzakelijk zijn. Hoe vaak dit optreedt is hier niet verder uitgezocht.

Tabel 3.4. Het verschil in de gemiddelde gemodelleerde onttrekkingstemperatuur van de bestaande open bodemenergiesystemen; vergelijking tussen de huidige situatie en scenario's 2 en 3. Dik gedrukte temperaturen zijn gunstige effecten

ΔT	Scenario 2-1		Scenario 3-1		Scen.3 hetero - homogeen	
	koud	warm	koud	warm	koud	warm
Rabobank	0.00	-0.15	0.01	-0.03	0.13	-0.09
NS Station	0.34	0.12	0.04	0.11	0.21	-0.05
Jaarbeurs	-0.01	0.00	-0.09	-0.04	0.01	0.00
KTT/LKT	-0.06	-0.01	0.03	0.00	0.11	-0.07
Muziekpaleis	-0.22	-0.04	-0.03	-0.20	0.11	-0.11
Paardenveld	0.07	0.02	0.03	0.05	0.16	-0.08
Corio	0.01	-0.02	0.06	-0.03	0.14	-0.06

3.7 Discussie en conclusies

Het effect op de retourtemperaturen van de bestaande systemen is soms positief, soms negatief, maar de verschillen in retourtemperatuur zijn klein. Aangezien de benutting van ieder open bodemenergiesysteem ruim kleiner is dan het jaarlijkse vergunde verpompte volume kan een negatief effect op de retourtemperatuur altijd worden ondervangen door iets meer water te verpompen, mocht dat nodig zijn. De berekende verschillen in retourtemperatuur tussen de huidige situatie en de scenario's met hogere dichtheid zijn klein. Een eventuele negatieve beïnvloeding van een nieuw open bodemenergiesysteem in de buurt van een bestaand systeem is in de praktijk niet aan te tonen.

Wat niet is gesimuleerd zijn de pieken in vraag en levering omdat er met een tijdstap van 1 maand is gerekend. Qua jaarlijks volume passen extra gebouwen wel in bestaande vergunningen, maar het is onwaarschijnlijk dat voor het maximaal benodigd debiet tijdens pieken van koel- en verwarmingsvraag wel voldoende broncapaciteit beschikbaar is. Wanneer het open bodemenergiesysteem voor koeling wordt gebruikt is het bij oplopende brontemperatuur mogelijk om de warmtepomp (meer) in te schakelen om de gewenste koeling te leveren.

Het effect van heterogeniteit en achtergrondstroming in het watervoerende pakket zijn beperkt. Hoe dit in andere gebieden doorwerkt is niet uitgewerkt, maar er kunnen wel enige uitspraken worden gedaan op basis van fysisch inzicht. Voor achtergrondstroming geldt dat indien de verplaatsing van het grondwater in een jaar ruim kleiner is dan de thermische straal het grootste deel van de opgeslagen warmte en koude door het eigen systeem weer kan worden benut. Het effect van de achtergrondstroming bij het verhogen van de dichtheid zal dan beperkt zijn.

Tabel 3.5. Mogelijke aansluiting extra gebouwen op bestaande open bodemenergiesystemen: berekende maximale percentage van het vergunde opslagvolume

Open bodemenergiesysteem	Gebouwen toevoegen	% vergund jaarlijks volume	
		Gemiddeld	Max
Rabobank		56	69
	+ Knoopkazerne	67	81
	+ Beatrixgebouw	76	91
NS Station ⁸		17	24
	+ Parkplaza	20	28
	+ NH	27	36
	+ Volksbank	35	45
	+ RWS	44	54
	+ Regus	52	63
	+ SVB	61	73
Corio		18	24
	+ Moreelsepark	22	30
	+ Prorail	30	39
	+ Rechtbank	34	43
	+ Belasting	39	49
	+ Smakkelaarsveld	46	56
	+ Daalseplein	50	60
	+ La Vie	54	67
	+ Bijenkorf	57	74
	+ ING	61	78
+ Citysense	65	83	

Tijdens het onderzoek zijn nog een aantal aspecten die niet verder zijn onderzocht, maar die wel extra aandacht behoeven:

1. Hydrologische effecten.
De effecten van sterke clustering van bodemenergiebronnen op de stijghoogte in het watervoerende pakket en op de freatische grondwaterstand zijn in dit onderzoek niet onderzocht. In de meeste gebieden in NL spelen deze effecten een beperkte rol. Toevallig is het door het ondiepe watervoerende pakket in Utrecht wel een kritisch punt en dit kan resulteren in een aanvullende plaatsingseis dat bronnen een minimale afstand moeten hebben, groter dan uit dit onderzoek volgt, of dat er niet meer dan een bepaald aantal bronnen van hetzelfde type kunnen worden geclusterd.
2. Onbalans in watervolume en verschil in ΔT tussen koel- en verwarmingsbedrijf.
Uit Tabel 3.1 blijkt dat er bij de meeste open bodemenergiesystemen meer water wordt verpompt tijdens koeling (en het laden van warmte in de ondergrond) dan

⁸ Bij NS Station is hier uitgegaan van de 7 vergunde doubletten. Een deel van die capaciteit zal gebruikt gaan worden voor het Sijpestijn gebouw, dat nu in aanbouw is. Dat is niet meegenomen in deze analyse.

tijdens verwarming van de gebouwen, zelfs als er een energiebalans is. Dit komt doordat tijdens koelbedrijf er passief wordt gekoeld, waardoor in deellastsituaties de injectietemperatuur in de warme bron afhankelijk is van de grootte van de energievraag. Terwijl tijdens verwarmingsbedrijf de warmtepomp zorgt voor een constante lage injectietemperatuur in de koude bron, onafhankelijk van de bedrijfssituatie (zie Bijlage II). De volume onbalans kan effect hebben op de onderlinge interactie tussen de bronnen en daarmee op de onttrekkingstemperatuur. Dit effect is nu niet meegenomen. Gezien de beperkte gevoeligheid van de energetische prestatie van de bodemenergiesystemen, heeft dit effect naar verwachten beperkte gevolgen voor de energieprestatie.

Al met al bevestigen de resultaten van de case studie dat het goed mogelijk is om de dichtheid van bodemenergiesystemen te verhogen. De theoretische plaatsingsregels zijn goed toepasbaar onder praktijkcondities en zorgen voor beperkte verandering van onttrekkingstemperatuur van de bodemenergiebronnen.

Ten aanzien van de vraag uit Hoofdstuk 1 die in dit hoofdstuk is onderzocht:

5. Hoe de vastgestelde regels in een praktijksituatie functioneren, praktische inpasbaarheid, draagvlak bij belanghebbende etc?
Antwoord: De vastgestelde regels van de onderlinge afstand tussen bronnen van 0.5-1 maal de thermische straal voor bronnen van hetzelfde type en 2 maal de thermische straal voor bronnen van het tegenovergestelde type is in de case studie goed werkbaar en geeft ook de verwachte resultaten. Wel is er in de praktijk een onderbenutting van de vergunde jaarlijkse opslagvolumes. Om de ondergrond optimaal te benutten is het wenselijk om de thermische straal van bronnen die gebruikt worden bij een afstandsregel zoveel mogelijk op de gerealiseerde thermische straal te baseren, door bijvoorbeeld de vergunning te verkleinen bij forse onderbenutting. Het draagvlak bij de belanghebbenden is in principe goed, maar eigenaren van bestaande open bodemenergiesystemen hebben het primaire belang dat hun eigen systeem goed en efficiënt blijft functioneren.

4 Wetgeving en beleid

In dit hoofdstuk worden de beleidsmatige implicaties van het toestaan van een hogere dichtheid van bodemenergiebronnen verkend. De hoofdlijnen van de huidige wet- en regelgeving en de situatie onder de Omgevingswet worden eerst geschetst. Vervolgens worden de beleidsopties die het mogelijk maken om een hogere dichtheid van bodemenergiesystemen te realiseren besproken.

4.1 Bodemenergiebeleid

In de huidige situatie vormen de Waterwet en het Waterbesluit de basis voor het vergunnen van open bodemenergiesystemen. Open bodemenergiesystemen met een debiet hoger dan 10 m³/uur behoeven altijd een vergunning in het kader van de Waterwet, en deze vergunning wordt verleend door de provincie. De regels voor het vergunnen van open bodemenergiesystemen worden, vrijwel beleidsneutraal, overgenomen in de nieuwe Omgevingswet. Naar verwachting treedt de Omgevingswet in de loop van 2021 of 2022 in werking. De voor bodemenergie relevante aspecten van de Omgevingswet worden verder toegelicht in de paragrafen 4.1.1 en 4.1.2. Voor de huidige wet- en regelgeving worden deze toegelicht in Bijlage VII.

4.1.1 Bodemenergie in de Omgevingswet

De Omgevingswet werkt door in vier Algemene Maatregelen van Bestuur (AMvB), ook wel Besluiten genoemd. Deze geven invulling aan de wetsartikelen van de Omgevingswet. Dit zijn:

1. het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)
2. het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl)
3. het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal)
4. het Omgevingsbesluit (Ob)

Voor bodemenergiesystemen is met name het Bal van belang. Daarnaast zijn nog een aantal beleidsinstrumenten van toepassing. Hieronder worden deze één voor één besproken.

Kader Omgevingswet algemeen

Met de Omgevingswet wordt het wettelijk kader voor verschillende aspecten van de fysieke leefomgeving vereenvoudigd. Doel van de Omgevingswet is het bereiken van een balans tussen:

- Een veilige en gezonde fysieke leefomgeving en een goede omgevingskwaliteit bereiken en in stand houden.
- De fysieke leefomgeving doelmatig beheren, gebruiken en ontwikkelen om er maatschappelijke behoeften mee te vervullen.

De verschillende overheden krijgen meer afwegingsruimte. Er zijn minder regels en er is meer ruimte voor initiatieven. De wet beoogt een versterking van de positie van decentrale overheden, volgens het principe Decentraal, tenzij. Dit houdt in dat gemeenten bevoegd zijn om regels op te stellen, tenzij er een overkoepelend belang is. Voor open bodemenergiesystemen blijven provincies het bevoegd gezag.

1. het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)

De regels, zoals beschreven in het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl), zijn van toepassing op bestuursorganen van het Rijk, de provincie, de gemeente en het waterschap. In het Bkl worden omgevingswaarden benoemd zoals beoogd door het Rijk, beoordelingsregels voor het verlenen van omgevingsvergunningen beschreven en regels voor de systematische verzameling van informatie over de fysieke leefomgeving opgenomen. Daarnaast zijn instructieregels voor decentrale overheden, zoals ingesteld door het Rijk, opgenomen in het Bkl.

2. Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl)

In het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) zijn regels, zoals ingesteld door het Rijk, beschreven over activiteiten die ingrijpen op bouwwerken. De algemene regels van het Bbl zijn voornamelijk van toepassing op de gemeente. Het Bbl is van toepassing op eisen aan energieprestaties of aan energiebesparende maatregelen van geplande bouwwerken, en activiteiten zoals het bouwen, slopen of in stand houden van bouwwerken. Onder het Bbl is in sommige gevallen ook ruimte voor maatwerk.

3. Besluit activiteiten leefomgeving (Bal)

In het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) zijn regels, zoals ingesteld door het Rijk, opgenomen voor activiteiten in de fysieke leefomgeving. Onder de Omgevingswet vervalt het begrip 'inrichting', zoals opgenomen in de huidige wetgeving (Wet milieubeheer, Wet algemene bepalingen omgevingsrecht). Daarvoor in de plaats wordt gesproken over milieubelastende activiteiten (mba), waarvoor algemene regels gelden. De aanleg en het gebruik, maar ook het onderhouden en schoonspoelen van zowel open als gesloten bodemenergiesystemen is onder de Omgevingswet een aangewezen milieubelastende activiteit, waarbij sprake is van een bedrijfstak overstijgende activiteit. De mba bodemenergiesysteem is in het Bal opgenomen in paragraaf 3.2.6.

Onder de Omgevingswet is voor zowel de realisatie van een open bodemenergiesysteem als het lozen van afvalwater of spuiwater op het oppervlaktewater een omgevingsvergunning nodig, waarbij de indieningseisen voor een vergunningaanvraag worden beschreven in de Omgevingsregeling. Naast het Bal kunnen regels voor bodemenergiesystemen ook zijn opgenomen in het Bbl (bijv. energiebesparende maatregelen), het omgevingsplan van de gemeente, de omgevingsverordening van de provincie, de waterschapsverordening van het waterschap (bijv. regels m.b.t. lozingen van een bodemenergiesysteem) en in een omgevingsvergunning.

Negatieve interferentie tussen bodemenergiesystemen dient volgens artikel 4.1151 van het Bal te worden voorkomen, maar op dit vlak is een maatwerkregel of maatwerkvoorschrift mogelijk. Dit maatwerk geeft de ruimte om interferentie in nader te bepalen vorm toe te staan.

4. Het Omgevingsbesluit (Ob)

In het Omgevingsbesluit (Ob) wordt beschreven welk bestuursorgaan het bevoegd gezag is voor het verlenen van een omgevingsvergunning en welke procedures hierbij gelden. Hierbij wordt ook genoemd welke rol andere bestuursorganen, adviesorganen en adviseurs spelen bij de besluitvorming. Daarnaast zijn een aantal op zichzelf staande onderwerpen opgenomen in het Ob, zoals de kwaliteitscriteria voor Vergunningverlening, Toezicht en Handhaving (VTH) en zaken zoals de milieueffectrapportage.

4.1.2 Beleid van decentrale bevoegde gezagen

De bevoegdheidsverdeling voor bodemenergiesystemen blijft onder de Omgevingswet in principe gelijk. Bij een enkelvoudige vergunningsaanvraag voor een open bodemenergiesysteem is de provincie het bevoegd gezag (artikel 2.5 van het Bal). Echter, bij een meervoudige vergunningsaanvraag mag er maar één bevoegd gezag zijn. Soms gaat dan de bevoegdheid van de gemeente voor, omdat de Omgevingswet uitgaat uit van het beginsel decentraal tenzij. De provincie heeft dan wel advies- en instemmingsrecht voor het onderdeel open bodemenergie in de meervoudige aanvraag (artikel 4.25, 1e lid, Omgevingsbesluit). Het bevoegd gezag dat voor een activiteit de vergunning mag verlenen is ook bevoegd voor de handhaving. De waterschappen zijn vanuit het lozen van grondwater ook nog bevoegd gezag. Dit punt is echter niet relevant voor de ordening van systemen en wordt daarom hier buiten beschouwing gelaten. Bodemenergiebeleid komt daarmee terecht in beleidsdocumenten van de decentrale bevoegde gezagen: Provincies en gemeenten.

De Omgevingsvisie

Onder de Omgevingswet stellen zowel het Rijk, de provincies, en de gemeenten ieder een Omgevingsvisie op. In deze Omgevingsvisie wordt een strategische visie beschreven voor de gehele fysieke leefomgeving voor de lange termijn. In deze visie komen alle terreinen van de leefomgeving terug, en wordt de samenhang tussen ruimte, water, milieu, natuur, landschap, verkeer en vervoer, infrastructuur en cultureel erfgoed beschreven.

De Omgevingsverordening van de provincie

De Omgevingsvisie, zoals opgesteld door de provincie, komt juridisch tot uiting in de Omgevingsverordening van de provincie, waarin zowel verordeningen, regelingen en besluiten zijn samengevoegd. De regels en normen beschreven in deze verordening zijn van toepassing op o.a. gemeentes en waterschappen, en in deze verordening wordt ook afwegingsruimte gecreëerd voor gemeentes.

Het Rijk maakt maatwerkregels voor milieubelastende activiteiten mogelijk in de Omgevingsverordening (artikel 2.12 Bal). Als de provincie maatwerkregels stelt, betekent dat aanvullende regels bovenop de regels die in het Bal of Bbl zijn opgenomen, of regels die afwijken van de regels van het Bal of Bbl. Dit kan alleen als het Rijk in het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) of het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) hiervoor de bevoegdheid geeft. De provincie kan in haar verordening beoordelingsregels opnemen over het verlenen of weigeren van een omgevingsvergunning voor een milieubelastende activiteit (artikel 5.19 Omgevingswet), ook als dat een door het Rijk geregelde activiteit is, of voor activiteiten die niet door het Rijk geregeld zijn.

Naast de Omgevingsverordening heeft de provincie ook andere instrumenten om sturend te werken en doelen te realiseren, in de vorm van bijvoorbeeld samenwerkingsafspraken, programma's en subsidies. Ook kan de provincie gebiedsbescherming vastleggen in een programma, waarin beschreven staat welke maatregelen genomen zullen worden om doelstellingen te halen, bijvoorbeeld op het gebied van waterbeheer. Zo stelt de provincie een regionaal waterprogramma vast, waarin het provinciale waterbeleid is opgenomen m.b.t. verschillende Europese richtlijnen zoals de Kader Richtlijn Water (KRW) en de Grondwaterrichtlijn (GWR) (artikel 3.8, Omgevingswet). Het programma coördineert de gebiedsgerichte uitoefening van taken en bevoegdheden door gemeenten en waterschappen (artikel 2.18 lid 1a, Omgevingswet). Daarnaast dient het programma als een instrument om te beslissen over een aanvraag voor een omgevingsvergunning van een wateractiviteit (artikel 8.84 Bkl).

Het Omgevingsplan van de gemeente

De Omgevingsvisie van de gemeente komt tot uiting in het Omgevingsplan, waarin regels voor activiteiten met mogelijke nadelige gevolgen voor de fysieke leefomgeving worden beschreven. Ook bevat het Omgevingsplan beoordelingsregels voor het verlenen van vergunningen voor aanvaardbare en niet-aanvaardbare activiteiten. De overheid kan zo maatwerk leveren dat past bij de lokale omstandigheden.

Vanaf de inwerkingtreding van de Omgevingswet heeft de gemeente van rechtswege een Omgevingsplan, met daarin de bestaande ruimtelijke regels en gemeentelijke verordeningen én de regels die zijn overgegaan van rijksniveau naar gemeentenniveau (de zogenaamde 'bruidsschat'). Dit vormt het *tijdelijk deel* van het Omgevingsplan. Gedurende 9 jaar vanaf de inwerkingtreding van de Omgevingswet geldt daarnaast een overgangsfase, waarin de gemeente het omgevingsplan van rechtswege kan omzetten naar een 'echt' Omgevingsplan.

Met de Omgevingswet vervalt de mogelijkheid om interferentiegebieden aan te wijzen, maar vergelijkbare regels kunnen worden opgenomen in het Omgevingsplan. De gemeente kan met het omgevingsplan gebieden aanwijzen waarbinnen specifieke regels voor bodemenergie gelden, die afwijken van de generieke landelijke regels. Het is in de nabije toekomst dus al mogelijk om de resultaten van dit onderzoek te verankeren in omgevingsplannen en/of omgevingsverordeningen.

4.2 Toestaan van hogere dichtheid

Onder de Omgevingswet kan een hogere dichtheid van open bodemenergiesystemen worden toegestaan. Op lokaal niveau kunnen gemeenten en provincies de afweging maken tussen bescherming van individuele bodemenergiesystemen enerzijds en het efficiënt en doelmatig gebruik van de ondergrond met bodemenergie anderzijds.

De resultaten van de berekeningen in hoofdstuk 2 en 3 geven aan dat het op gebiedsniveau gewenst kan zijn om een hogere dichtheid van open bodemenergiesystemen toe te staan. Bij enige negatieve interferentie kan een eerder geïnstalleerd bodemenergiesysteem nog steeds doelmatige functioneren: door iets meer water te verpompen kan nog steeds de gewenste warmte of koude worden geleverd zo lang het verpompte volume binnen het vergunde volume blijft. Deze ruimte in de vergunning is in de praktijk vrijwel altijd aanwezig. Bij het eventueel verkleinen van een vergunning is het wel wenselijk dat deze ruimte er blijft.

In dit project zijn 4 mogelijke regels geïdentificeerd die het optimaal en duurzaam gebruik van de ondergrond met bodemenergie kunnen helpen verbeteren.

4.2.1 Plaatsingsregels

In dit onderzoek is aangetoond dat het verkleinen van de afstand tussen bronnen van bodemenergiesystemen tot 0.5 maal de thermische straal tussen bronnen van hetzelfde type, en ~2 maal de thermische straal tussen bronnen van tegenovergesteld type, er niet toe leidt dat het doelmatig functioneren van de desbetreffende systemen wordt geschaad als gevolg van negatieve interferentie. Bij het toestaan van deze onderlinge afstand wordt derhalve voldaan aan artikel 4.1151 van het Besluit activiteiten leefomgeving (onder de huidige wetgeving: artikel 6.11h van het Waterbesluit). Dit betekent dat in het algemeen kan worden gesteld dat het bevoegd gezag vergunning kan verlenen voor een nieuw bodemenergiesysteem indien minimaal deze afstanden worden aangehouden, dit geldt voor wat betreft het voorkomen van negatieve interferentie. Aangezien de huidige richtlijn (NVOE, 2006) voornamelijk uitgaat van een minimale afstand van 3 maal de

thermische straal tussen bronnen van tegenovergesteld type, wordt aanbevolen dat provincies het in hun beleid vastleggen wanneer zij op basis van dit onderzoek uitgaan van ~2 maal de thermische straal voor tegenovergestelde typen bronnen en 0.5-1 maal de thermische straal voor bronnen van hetzelfde type. Dan hoeft dit niet in ieder afzonderlijk besluit op vergunningaanvraag te worden gemotiveerd.

Hoewel dat niet is berekend en gekwantificeerd in deze studie, zou het nog dichter op elkaar plaatsten van bronnen in drukke gebieden mogelijk helpen bij het reduceren van CO₂ uitstoot. Dit leidt tot verdere onderlinge interactie, maar de nadelige effecten voor de individuele systemen zijn naar verwachting beperkt, en daar staat een veel grotere CO₂-reductie op gebiedsniveau tegenover. Dit leent zich echter niet goed voor algemeen beleid. Het verdient aanbeveling dit op de schaal van een gebiedsontwikkeling of buurt te onderzoeken en te regelen in het Omgevingsplan, dat juridisch wordt verankerd in de provinciale Omgevingsverordening. Ook kunnen er situaties zijn waarin een individuele afweging nodig is voor het dichter op elkaar plaatsen van bronnen.

In drukke gebieden kan het daarnaast zinvol zijn om te sturen op het voorkómen van 'witte vlekken', i.e. ruimte die geschikt zou zijn voor bodemenergie maar niet wordt benut omdat er geen bron meer tussen de omringende bronnen past. Dit vergt maatwerk en zou ook kunnen worden geregeld in het gemeentelijke en/of provinciale Omgevingsplan. Daarbij moet overigens ook rekening worden gehouden met andere aspecten die in dit onderzoek niet zijn meegenomen, zoals leidingtracés, bereikbaarheid van bronnen voor onderhoud en hydrologische effecten.

4.2.2 Adaptief vergunnen

Er is in de praktijk een groot verschil tussen vergunde en daadwerkelijk verpompte volumes door bodemenergiesystemen. Dat zorgt voor kunstmatige schaarste, ruimte in de ondergrond kan niet worden benut omdat het vergund is, maar de vergunning houder gebruikt de ruimte niet. Dit kan worden voorkomen door periodiek het jaarlijks vergunde volume aan te passen op basis van de data over gebruik. Dit zorgt er voor dat er geen kunstmatige schaarste ontstaat doordat er ondergrondse ruimte in vergunning wordt gereserveerd die niet wordt gebruikt.

Onder de huidige Waterwet (artikel 6.22 en 2.1) wordt het verkleinen van vergunningen door sommige provincies al toegepast. Hierbij is het wel wenselijk om een marge in het jaarlijks verpompte volume over te houden om rekening te houden met variaties in het klimaat en daarmee de warmte- en koudevraag en met redelijkerwijs te verwachten aanpassingen in aangesloten gebouwen of het gebruik daarvan, die effect hebben op de inzet van het open bodemenergiesysteem.

Een andere mogelijkheid is om bij onderbenutting het aantal doubletten te verkleinen. In dat geval zou de ruimte van een doublet beschikbaar komen voor een buursysteem. Nadeel is wel dat het vermogen tijdens piekbelasting dan ook afneemt. Dit is een meer ingrijpende maatregel maar in hele drukke gebieden kan dit wel voor een grote extra CO₂ reductie zorgen als daarmee een extra gebouw haar basislast energievraag met bodemenergie kan invullen, in plaats van een fossiel alternatief.

4.2.3 Bronontwerp

Hierbij kan worden gedacht aan het verkleinen van het aantal doubletten in een systeem om ruimte voor een buursysteem te creëren, of minimale filterlengte om gebruik van de hele dikte van een watervoerend pakket te stimuleren. De laatste maatregel kan bij een

heel dik watervoerend pakket en een open bodemenergiesysteem met een beperkt opslagvolume kan dit een negatief effect op het rendement hebben.

4.2.4 Productiviteitseis

Het aanscherpen van de productiviteitseis. In de vergunningsvoorschriften van bodemenergiesystemen worden al eisen gesteld aan een minimale ΔT tussen de bronnen. Het effect van het enigszins verbeteren hiervan is beperkt op de mate van inpassing en in de praktijk niet altijd goed te realiseren. In hele drukke gebieden kan het echter voor net wat minder ruimte beslag of net een bron paar minder zorgen wat het verschil kan maken. Dit kan het beste worden toegepast als een maatwerk regel, en niet generiek.

4.3 Andere aspecten

Tijdens de discussie met actoren en leden van de klankbordgroep zijn nog een aantal andere aspecten naar voren gekomen. Deze zijn niet in dit project uitgewerkt, maar worden wel kort genoemd:

4.3.1 Collectieve systemen

Collectieve systemen kunnen in potentie de ondergrondse ruimte optimaler benutten. Gemeenten zouden hier het voortouw in moeten nemen om dit te organiseren omdat dit vanuit private partijen niet van de grond komt en zal komen. Dat komt doordat er grote verschillen zitten in timing en benodigde investeringskosten voor het operationeel krijgen van zo'n collectief systeem.

4.3.2 Vinger aan de pols

Hoogfrequent monitoring en sneller ingrijpen indien een bodemenergiesysteem door slecht functioneren schade dreigt te veroorzaken aan naburige systemen

Indien bodemenergiesystemen dicht op elkaar worden geplaatst is op basis van de resultaten in Hoofdstuk 2 en 3 de onderlinge beïnvloeding beperkt bij goed functionerende systemen. Echter, wanneer een systeem niet goed functioneert en bijvoorbeeld veel meer warmte aan de bodem toevoegt dan onttrekt is het wel mogelijk dat de nadelige beïnvloeding van een buursysteem groter wordt. Dat kan worden ondervangen door het eisen van hoogfrequente monitoring (bijvoorbeeld eens per 2 maanden) van de aan de bodem toegevoegde temperaturen en deze te rapporteren aan bevoegd gezag. Het bevoegd gezag controleert of het gebruik van het open bodemenergiesysteem naar verwachting conform de vergunning verloopt, meldt dit direct terug indien dit niet het geval blijkt en zal uiteindelijk overgaan tot handhaving indien nodig.

Tijdens een workshop met actoren werd door eigenaren van bestaande open bodemenergiesystemen aangegeven dat zij in eerste instantie terughoudend zijn voor het dicht op elkaar plaatsen van open bodemenergiesystemen. Zij kunnen door de huidige lage rapportagefrequentie van eens per jaar (jaaropgave) tot eens per 2 tot 5 jaar (evaluatierapportage) hinder ondervinden van niet goed functionerende systemen in directe omgeving. Door het opstellen van heldere spelregels, een hogere rapportagefrequentie en eventueel aanvullende monitoring (bijv DTS) kan er tijdig worden ingegrepen bij slecht functionerende systemen. Hiermee worden de belangen van de eigenaren van reeds vergunde bodemenergiesystemen beter behartigd.

Indien data over het functioneren van de open bodemenergiesystemen worden gedeeld met de eigenaren van de open bodemenergiesystemen in een gebied, zal dit het onderlinge vertrouwen vergroten en wordt het op de langere termijn mogelijk om terug te

gaan naar de normale frequentie van monitoring en rapportage. Dergelijke openheid ligt vaak wel weer gevoelig.

4.3.3 Opties voor private partijen voor verdichting van bodemenergiesystemen

Private partijen kunnen ook bijdragen aan het bereiken van een hogere dichtheid van bodemenergiesystemen door:

1. Afstemming met burens om hun overcapaciteit te delen.
2. Afstemming met burens om hun werkelijke gebruik van hun open bodemenergiesystemen mee te nemen in het ontwerp door vooral gelijke bronnen (warm bij warm of koud bij koud) nabij elkaar te plaatsen om de positieve interferentie zo groot mogelijk te maken.
3. Zo veel mogelijk de werkelijke warmte- en koudevraag van het gebouw vooraf goed vast te stellen en de vergunning daar zo goed mogelijk op te baseren.

4.4 Conclusies

Een hogere dichtheid van bodemenergiesystemen is mogelijk en in drukke gebieden ook wenselijk. De verwachte opschaling van bodemenergie maakt het noodzakelijk om op voorhand na te denken over hoe dit beleidsmatig geregeld en zo nodig via een verordening of Omgevingsplan gereguleerd kan worden.

De bodemenergie speelt een cruciale rol in de warmtetransitie, maar het bodemenergiebeleid moet nog worden aangepast om optimale en duurzaam gebruik van de ondergrond te kunnen realiseren. De Omgevingswet biedt bevoegde gezagen voldoende ruimte om intensief gebruik van de ondergrond op een verantwoorde manier toe te staan. In deze studie zijn enkele concrete maatregelen geïdentificeerd die hier aan kunnen bijdragen:

1. plaatsingsregels
2. adaptief vergunnen
3. eisen aan bronontwerp
4. eisen aan productiviteit

Ten aanzien van de onderzoeksvraag uit Hoofdstuk 1 die in dit hoofdstuk is onderzocht:

6. Hoe kan de transitie naar een nieuwe manier van ordening het beste kan worden vormgegeven? In veel gebieden waar het druk wordt in de bodem zijn er reeds (veel) bodemenergiesystemen. Hoe kan rekening houdend met gevestigde vergunningen/belangen, de nieuwe methode worden geïmplementeerd?
Antwoord: De Omgevingswet biedt de ruimte om de dichtheid van open bodemenergiesystemen te verhogen. Dit onderzoek toont aan dat het doelmatig functioneren van bestaande bodemenergiesystemen beperkt wordt geschaad indien de voorgestelde afstandsregels worden gebruikt. Voorwaarde is wel dat de systemen functioneren zoals gepland en dat bij niet goed functioneren er tijdig wordt gehandhaafd. Dit zal de acceptatie van eigenaren van bestaande open bodemenergiesystemen vergroten.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De potentie van de bodem wordt met de huidige praktijk van ontwerp en vergunning verlening van bodemenergiesystemen niet optimaal benut. In dit onderzoek is uitgezocht binnen welke randvoorwaarden het gebruik van de bodem met open bodemenergiesystemen kan worden geïntensiveerd. Hiervoor is inzichtelijk gemaakt: 1) wat het gevolg is van het vergroten van de dichtheid van bodemenergiesystemen op de energieprestatie van individuele systemen, 2) hoe de ruimte in de ondergrond wel optimaal en duurzaam kan worden benut en 3) hoe dat in de praktijk kan worden geïmplementeerd.

1. Het toelaten van een hogere ruimtelijke dichtheid van open bodemenergiesystemen geeft een aanzienlijke CO₂ reductie doordat meer gebouwen gebruik kunnen maken van bodemenergie.
2. Het effect van de hogere dichtheid op de energie-efficiënte van bestaande open bodemenergiesystemen is beperkt. De effecten van onderlinge ondergrondse interactie op het energieverbruik van het totale systeem zijn zeer beperkt omdat veranderingen in brontemperatuur niet 1 op 1 doorwerken in energiegebruik van componenten in de klimaat installatie.
3. De afstanden tussen de bronnen waarbij de onderlinge beïnvloeding beperkt is en bijdraagt aan het accommoderen van zoveel mogelijk bodemenergiesystemen is 0.5 maal de thermische straal voor bronnen van hetzelfde type en 2 maal de thermische straal voor bronnen van het tegenovergestelde type. Dit geldt voor gebieden waar zelf-ordering wordt toegepast en de verwachte benuttingsgraad niet groter is dan 0.75.
4. De Omgevingswet biedt bevoegde gezagen voldoende ruimte om intensief gebruik van de ondergrond op een verantwoorde manier toe te staan

5.2 Aanbevelingen

Daarnaast worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Lagere overheden kunnen bij het ingaan van de Omgevingswet via het Omgevingsplan of de Omgevingsverordening vastleggen onder welke voorwaarden zij vergunningen zullen verlenen voor open bodemenergiesystemen zodat een hogere dichtheid van deze systemen mogelijk wordt.
2. In het Omgevingsplan of de Omgevingsverordening kunnen regels worden opgenomen over de toelaatbare afstand tussen bronnen van bodemenergiesystemen.
3. Dat een vergunning van het maximaal te verpompen volume grondwater bij onderbenutting op termijn verkleind wordt en in drukke gebieden eisen te stellen aan bronontwerp en productiviteit.
4. Vervolgonderzoek moet zich richten op:
 - a. Technische effectiviteit van collectieve systemen t.o.v. individuele systemen en organisatorische aspecten die daarbij een rol spelen
 - b. Het effect van slecht beheerde systemen (met bijv. grote onbalans) op de onderlinge interactie en energieprestatie.

- c. Verkennen en testen of de geïdentificeerde regels ook gelden bij benuttingsgraden groter dan 75%. En in hoeverre planning/ordening van bronnen de benuttingsgraad kan verbeteren.

Referenties

- Anderson, M.P., 2005. Heat as a ground water tracer. *Ground water* 43, 951-968.
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C.D., Hughes, J.D., White, J.T., Starn, J.J., Fienen, M.N., 2016. Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*, n/a-n/a.
- Beernink, S., Hartog, N., Bloemendal, M., Meer, M.v.d., 2019. ATES systems performance in practice: analysis of operational data from ATES systems in the province of Utrecht, The Netherlands, European Geothermal Congress, The Hague, Netherlands.
- Bloemendal, M., Hartog, N., 2018. Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems. *Geothermics* 17, 306-319.
- Bloemendal, M., Jaxa-Rozen, M., Olsthoorn, T., 2018. Methods for planning of ATES systems. *Applied Energy* 216, 534-557.
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., Boons, F., 2014. How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage. *Energy Policy* 66, 104-114.
- Boerefijn, M., Bloemendal, M., Winters, G., Blonk, A., Hoekstra, J., 2010. M.e.r. Koude-WarmteOpslag Stationsgebied Utrecht. Tauw, Utrecht.
- Buday, T., 2014. Reduction of environmental impacts of heat pump usage with special Regard on systems with boRehole heat exchangers. *Landscape & Environment* 8 66-77.
- Caljé, R., 2010. Future use of aquifer thermal energy storage inbelow the historic centre of Amsterdam, Hydrology. Delft University of Technology, Delft.
- CBS, 2016. Voorraad woningen en niet-woningen; mutaties, gebruiksfunctie, regio. CBS.nl.
- Dekker, L.d., 2016. Bepalende factoren voor goed functionerende WKO, kennisplatform bodemenergie.
- Doughty, C., Hellstrom, G., Tsang, C.F., 1982. A dimensionless approach to the Thermal behaviour of an Aquifer Thermal Energy Storage System. *Water Resources Research* 18, 571-587.
- Duijff, R., 2019. Interaction between multiple ATES systems. Delft University of Technology, Delft.
- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P., 2018. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, 861-876.
- Graaf, A.d., Heijer, R., Postma, S., 2016. Evaluatie Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen. Buro 38 in commision of ministry of Intrastructure and environment, Cothen.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. Modflow-2000, the u.S. Geological survey modular ground-water model—user guide to modularization concepts and the ground-water flow process in: USGS (Ed.). US Geological Survey, Virginia.
- Hardin, G., 1968. tragedy of the commons. *Science* 162 1243-1248.
- Hecht-Mendez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground water* 48, 741-756.
- ISSO, 2017. ISSO-publicatie 39 Energiecentrale met warmte en koude opslag (WKO). ISSO, Rotterdam.
- Jaxa-Rozen, M., Bloemendal, M., Rostampour, V., Kwakkel, J.H., 2016. Assessing the sustainable application of Aquifer Thermal Energy Storage, European Geothermal Congress 2016. EGECC, Strassbourg.
- Jaxa-Rozen, M., Kwakkel, J.H., Bloemendal, M., 2015. The Adoption and Diffusion of Common-Pool Resource-Dependent Technologies: The Case of Aquifer Thermal Energy Storage Systems, PICMET, Portland.

- Jaxa-Rozen, M., Kwakkel, J.H., Bloemendal, M., 2019. A coupled simulation architecture for agent-based/geohydrological modelling with NetLogo and MODFLOW. *Environmental Modelling & Software* 115, 19-37.
- Jonge, H.d., Koenders, M., Zwart, B., 2013. Bodemenergiesystemen kunnen dichterbijelkaar, Bodem.
- KvINL, 2017. BRL 6000-21/00 - Ontwerpen en installeren van energiecentrales van bodemenergiesystemen en het beheren van bodemenergiesystemen. KvINL, Zoetermeer.
- Langevin, C.D., Thorne, D.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W., 2007. SEAWAT version 4: a computer program for simulation of multi-species solute and heat transport, in: U.S.G.S. (Ed.), *Techniques and Methods*, book 6, Reston, Virginia, USA.
- Langevin, C.D., Thorne, D.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W., 2008. SEAWAT Version 4: A computer program for simulation of multi-Species Solute and heat transport. USGS, Reston, Virginia.
- Li, Q., 2014. Optimal use of the subsurface for ATES systems in busy areas, *Hydrology*. Delft University of Technology, 2014.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations*, - ed.
- Ostrom, E., 1990. *Governing the Commons*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Perez, F., Granger, B.E., Hunter, J.D., 2011. Python: An Ecosystem for Scientific Computing. *Computing in SCienCe & engineering*, 8.
- Possemiers, M., Huysmans, M., Batelaan, O., 2015. Application of multiple-point geostatistics to simulate the effect of small-scale aquifer heterogeneity on the efficiency of aquifer thermal energy storage. *Hydrogeology Journal* 23, 971-981.
- Rostampour, V., Jaxa-Rozen, M., Bloemendal, M., Kwakkel, J., Keviczky, T., 2019. Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) smart grids: Large-scale seasonal energy storage as a distributed energy management solution. *Applied Energy* 242, 624-639.
- RVO, 2014. *Uniforme Maatlat v 3.4, Protocol to compare different types of HVAC options*. Ministry of Economic affairs, Eindhoven.
- Schoots, K., Hekkenberg, M., Hammingh, P., 2017. *Nationale Energieverkenning 2017*. ECN, Petten, p. 238.
- Schultz van Haegen, M.H., 2013. Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen, in: *Environment*, M.o.l.a. (Ed.). Staatscourant 23617, Den Haag.
- SER, 2013. *Energie Akkoord*. Social economical council.
- SIKB, 2015. Userdata of ATES systems, in: NL, d.p.i. (Ed.). received from 4 provinces of the Netherlands in 2015, Gouda.
- Sommer, W., Valstar, J., Leusbrock, I., Grotenhuis, T., Rijnaarts, H., 2015. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage. *Applied Energy* 137, 322-337.
- Sommer, W., Valstar, J., van Gaans, P., Grotenhuis, T., Rijnaarts, H., 2013. The impact of aquifer heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage. *Water Resources Research* 49, 8128-8138.
- Sommer, W.T., Doornbal, P.J., Drijver, B.C., van Gaans, P.F.M., Leusbrock, I., Grotenhuis, J.T.C., Rijnaarts, H.H.M., 2014. Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy storage. *Hydrogeology Journal* 22, 263-279.
- UN, 2015. *Adoption of the paris agreement*. United Nations, Framework Convention on Climate Change, Paris.
- Wilensky, U., 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, , Evanston, IL.
- Willemsen, N., 2016. *Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland*. RVO / IF technology, Arnhem.
- Xynogalou, M., 2015. Determination of optimal separation well distance for Single Borehole ATES systems in the Netherlands, implementing an axisymmetric numerical model. Delft University of Technology, Delft.
- Zheng, C., Wang, P.P., 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide.

Bijlage I

Utrecht Case beschrijving

1. Gebouwen

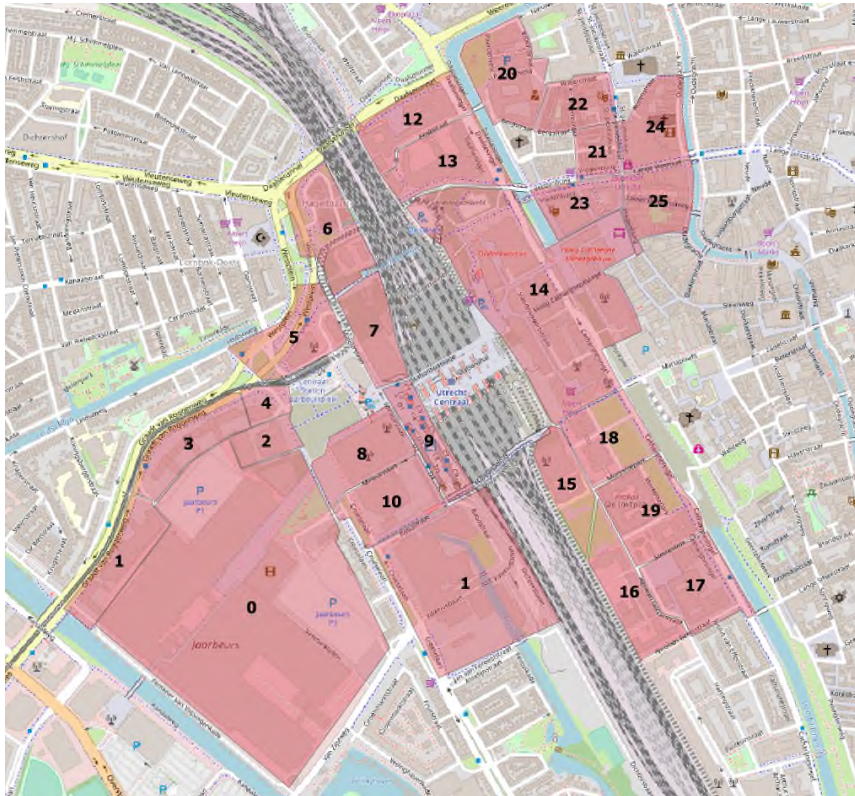


Figure 1. Plots van de gebouwen in case studie gebied, centrumgebied Utrecht.

De buitenste randen van de percelen in Figure 1 de begrenzing van het studie gebied. De totale oppervlakte van het gebied is circa 1.4 miljoen m². Met een aquiferdikte beschikbaar voor bodemenergie van 26 m is de totale ruimte voor de opslag van thermische energie 36 miljoen m³.

Table 1. Eigenschappen gebouwen in case studie

ID	Surface area	Description	existing	openH	closeH	Weekend_open	Heat_to	Cool_when	spec.heat dem.	spec.cool dem.
[-]	[m2]	[age, function]	[yes/no]	[hr]	[hr]	[yes/no]	[C]	[C]	[kWh_th/m2]	[kWh_th/m2]
0	210000	old, shop	1	8	19	1	18	12	60	66
1	40000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
2	40000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
3	40000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
4	40000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
5	40000	old, hotel/residential	1	8	19	1	18	12	90	45
6	20000	old, hotel/residential	0	8	19	1	18	12	90	45
7	64000	new, office	0	8	19	0	18	12	20	14
8	30000	old, shops	0	15	23	1	18	12	90	45
9	84000	medium, terminal	0	6	23	1	18	12	45	49.5
10	50000	medium, office	0	7	21	0	18	12	60	42
11	125000	old, office	1	8	19	0	18	12	90	45
12	25000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
13	41000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
14	150000	medium, office	1	8	19	1	18	12	60	42
15	150000	old, office	1	8	19	0	18	12	60	42
16	30000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
17	25000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
18	30000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
19	50000	old, office	1	8	19	0	18	12	90	45
20	50000	old, office	1	5	22	1	18	12	90	45
21	25000	old, office	0	8	23	1	18	12	90	45
22	25000	old, office	0	8	19	0	18	12	90	45
23	32000	medium, shops	1	8	19	1	18	12	45	49.5
24	25000	old, shops	0	8	19	1	18	12	60	66
25	25000	old, shops	0	8	19	1	18	12	60	66

Bijlage II

Omschrijving model instrumentarium

1. Set-up of simulation framework

The coupled simulation framework is written in python code, which is a commonly used scripting language in science and engineering (Perez et al., 2011). This framework uses two external simulation codes: MODFLOW/MT3DMS for groundwater temperature simulations (Harbaugh et al., 2000; Zheng and Wang, 1999) and NetLogo for agent based simulations for the well placement policy evaluation (Wilensky, 1999). Both programs are activated and controlled from within the python environment, in which the building objects have a central position. The building objects are driven by the building-climate model that connects the building objects with the MODFLOW/MT3DMS model (Figure 2).

The simulation framework consists of three different modules:

1. NetLogo: (randomized) placement of wells
2. MODFLOW: subsurface interaction and efficiency of stored cold/warm energy
3. Building-climate model: energy demand, energy use and demand of subsurface of the building-ATES system

The NetLogo module is used to initialize the well locations at the start of the simulation. After this, the building-climate model and MODFLOW model are run subsequently for each time-step of the required simulation period. The building-climate model serves as an input for the MODFLOW model and vice versa; the building-climate model calculates the energy demand (heating/cooling) for each building which results in operation of heat pump, chiller and/or boiler, which in turn require groundwater flow to/from the ATES wells (Figure 2). After extraction, the heat exchange results in a return temperature of the same volume of water, which is subsequently stored in the other well. This is used as an input for the MODFLOW/MT3DMS model. This results in a new state of the stored heat and cold in the subsurface (Figure 2).

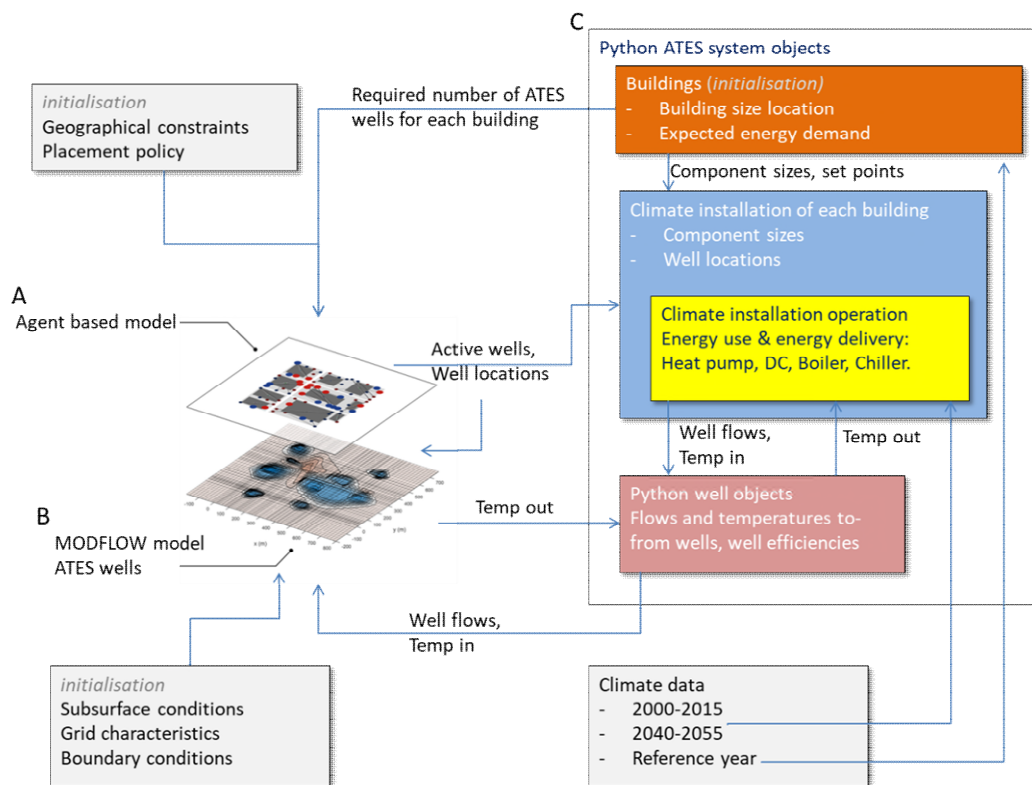


Figure 2. Detailed simulation framework of the different components of an ATEs system and climate installation.

2. Agent Based modelling with NetLogo

Agent based modelling is used to model the systematic outcomes that emerge from the simulation of individual actors (in this case ATEs systems) and is used for socio-environmental simulation of common pool resource problems (Hardin, 1968; Jaxa-Rozen et al., 2019). Groundwater is particularly relevant because these resources are often widely used (e.g. drinking water, ATEs, BTES) and are therefore often scarcely available especially in crow areas like the Netherlands (Jaxa-Rozen et al., 2019).

For this study NetLogo (NL) is used to initialize ATEs wells with their placement behavior (called agents) during startup in a pre-defined area. Each agent is characterized by its size and function of the buildings in the study area. The number of wells and their size of each ATEs system follow from the energy demand and size of components of the building-climate installation. The following placement procedure was implemented in NetLogo to represent the stochastic nature of ATEs adoption dynamics, which vary from city to city:

- The study site is divided in 1x1m patches, each patch can be used by buildings to place a well. Each building in the study site has been appointed a plot in the NL environment; the buildings can only build wells on patches within their plot and adjacent sidewalks.
- The buildings are also indicated in de NL environment, and the no wells can be placed at patches that intersect with building contours.
- Each new ATEs system randomly chooses a location for one of its wells from the available patches in their plot. The other well of this system is then placed

respecting the placement rules. The patches around each well can no longer be used for placement of other wells, depending on the size of the well and the placement rules. Each agent, i.e. ATES system, successively installs its wells using this procedure.

- Within the imposed spatial constraints, ATES systems continue to be added until the preset scenario threshold for maximum allocated subsurface fraction for ATES is reached, or when no more well locations can be found because the plan area is filled with ATES footprints.
- During the simulation, less and less space remains available to place new wells, as a space around is required around each well to prevent mutual interaction. The available space for placement declines with an increasing number of agents. At each run NL randomly chooses the order in which the buildings start building ATES wells.

Each scenario comprises 24 complete realizations; test runs have shown that with 24 realizations per scenario the distribution of the results was sufficiently stable to confirm representative behavior suitable for analysis.

3. Groundwater temperatures with MODFLOW/SEAWAT

The flopy model, initially created by Bakker et al. (2016) is used to run SEAWATv4 (Langevin et al., 2007). SEAWATv4 combines MODFLOW (computer program to model 3D groundwater flow by using a finite-difference method (McDonald and Harbaugh, 1988)) and MT3DS (Multi-Species modular 3D transport model (Zheng and Wang, 1999)). Because of the similarity between the equations for solute and heat transport, MT3DMS can be used to model transport of heat, by treating heat as a solute species (Hecht-Mendez et al., 2010; Langevin et al., 2008). The MODFLOW/SEAWAT model is used to simulate subsurface flow with heat transport, from which well efficiencies are determined. This simulation environment can handle heat exchange to adjacent confining layers and the surrounding aquifer, which can be at the ambient temperature or temperatures corresponding to injection by neighboring wells.

Spatial discretization:

To accurately simulate the temperature in the subsurface of Utrecht due to the ATES wells operation the city center of Utrecht was modelled with a 2,5x2,5m grid in the area of the building locations. A zone of 100 meter with the same cell sizes is constructed around the well-area to minimize numerical dispersion errors. Around this area the model extents for at least 1000m with a logarithmically increasing cell size up to a maximum cellsize of 200. The resolution thus stays well within the minimum cell-size required by Sommer et al. (2014) to adequately model the temperature field around ATES wells. The aquifer thickness in Utrecht is 26m confined by closed model boundaries. There is therefore no vertical energy exchange from the aquifer (both up and down). This is done because for this study the horizontal interaction is the most important effect to be studied.

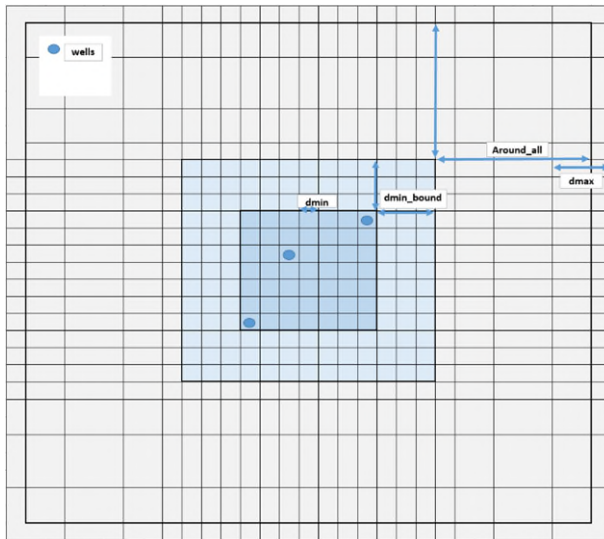


Figure 3. Schematic overview of the method for grid building.

Temporal discretization and simulation horizon

Test runs with time steps of 5 days, weeks and months are carried out. These showed that monthly time steps are sufficiently small to distinguish between performance under varying well placement policies and capture seasonal storage cycle dynamics. MT3DMS automatically takes smaller (internal) time steps if necessary to meet courant condition. Note that building-climate installation model operation is at hourly basis, which results are aggregated to monthly input for the MODFLOW model.

The simulation horizon of each simulation is set to 5 years. Although this is shorter than the expected life span of ATEs systems, it is sufficiently long to distinguish between performance under varying well placement policies (Bloemendal et al., 2018; Rostampour et al., 2019; Sommer et al., 2015).

Initial and Boundary conditions

Model boundaries are set to have fixed heads and temperatures at the boundaries. Ambient temperatures are set at 12 °C, which is the assumed average ambient groundwater temperature of the shallow subsurface. Initial and starting heads are set to surface level of the model.

Parameter settings

Aquifer properties are taken as homogeneous; the effect of heterogeneity on ATEs well efficiency has been studied by Caljé (2010), Sommer et al. (2013), Possemiers et al. (2015) and Xynogalou (2015), who concluded that only in specific conditions heterogeneity may have a considerable effect, conditions which are not present in Utrecht. Temperature-density dependency is not taken into account because of the relative small temperature differences between the wells and ambient groundwater as applied for ATEs, buoyancy effects are negligible (Anderson, 2005; Bloemendal and Hartog, 2018; Doughty et al., 1982). Because hydraulic conductivity has negligible effects on thermal losses under homogeneous conditions, and there is no effect of buoyancy flow (Bloemendal and Hartog, 2018), the horizontal and vertical hydraulic conductivity was set to a constant value of 30 m/d and 6 m/d for the aquifer. Both are common values for the Netherlands (anisotropy factor of 5). The other thermal and numerical parameters follow literature values and are given in Table 2.

Table 2, MODFLOW simulation parameters (Caljé, 2010; Hecht-Mendez et al., 2010; Langevin et al., 2008).

Parameter	value	unit
Porosity	0.3	-
Longitudinal dispersion	1	m
Transversal dispersion	0.1	m
Horizontal conductivity	30	m/d
Vertical conductivity	6	m/d
Bulk density	1889	kg/m ³
Bulk thermal diffusivity	0.16	m ² /day
Specific heat capacity solids	750	J/kg °C
Specific heat capacity water	4183	J/kg °C
Thermal conductivity solid	3	W/m °C
Thermal conductivity water	0.61	W/m °C
Thermal conductivity of aquifer	2.28	W/m °C
Effective molecular diffusion	1·10 ⁻¹⁰	m ² /day

4. Building-climate installation model

Introduction

The main functionality of the building-climate installation model is to correctly represent ATES and building-climate installation interaction, as well as conventional climate installation heating and cooling. The building-climate installation (BCI) model is a conceptual model with components and operation modes according to Dutch design standards for ATES systems (ISSO, 2017; KvINL, 2017), Figure 4 and Figure 5.

- Heat pump. ATES systems use a heat pump (HP) to provide heating and cooling at the appropriate temperature level. In winter, at the evaporator side of the heat pump heat is taken from the warm well, cooling down the groundwater, hence cooling capacity is stored in the cold well. At the condenser side heat at a temperature of about 40-50°C is delivered to the building. The heat pump uses electricity to run. In case of a simultaneous heating and cooling demand in the building, the heat pump can provide this without using the wells, or only using them for the net required capacity.
- Groundwater wells. Tube wells can produce and inject groundwater. Submersible pumps use electricity to pump the groundwater from one well to another via a heat exchanger in the BCI. This heat exchanger allows heat exchange between the BCI and groundwater. During summer, cold groundwater is used directly for cooling. In winter heat from the warm well is fed into the heat pump.
- Dry cooler. When heating and cooling stored in the ATES is not in balance a dry cooler⁹ is used to either store extra heat in summer or extra cooling capacity in winter, to meet the next seasons' energy demand. Dry cooler operation requires electricity use of fans, circulation pumps and ATES well pump.
- Boiler. A boiler is often used in an ATES system as a peak facility. A heat pump is relatively expensive; installing a heat pump at 35% of maximum required heating capacity provides approximately 80% of the total heating demand. The remaining

⁹ Instead of a dry cooler also other techniques can be used, asphalt or solar collectors, or surface water. Their energy use varies little and depends on local conditions. Therefore only the dry cooler is evaluated in this study.

- 20% is provided with a boiler which uses natural gas. Conventional BCI's only have a boiler for supply of heat.
- Chiller. A conventional system uses compression chillers to supply cooling. For ATEs systems: when the cold well of an ATEs system does not have sufficient cooling capacity to meet demand, the heat pump is used to provide additional cooling from the evaporator, condensor heat is either used for heating or charged in the warm well.

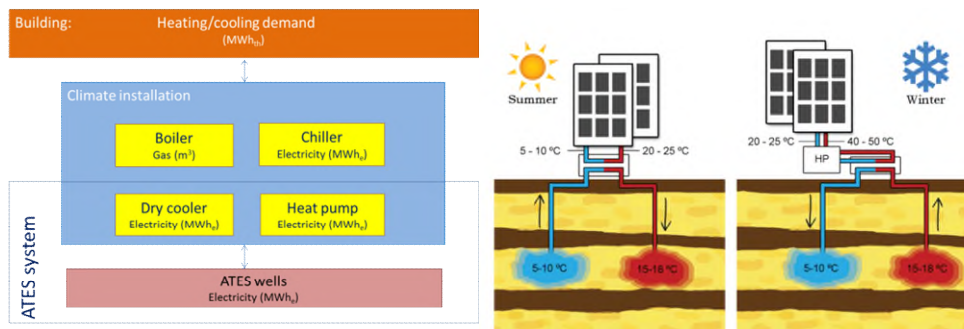


Figure 4. Main components of the building-climate installation model (left) and basic working principle (right). Depending on conditions components of the climate installation may be (in)active.

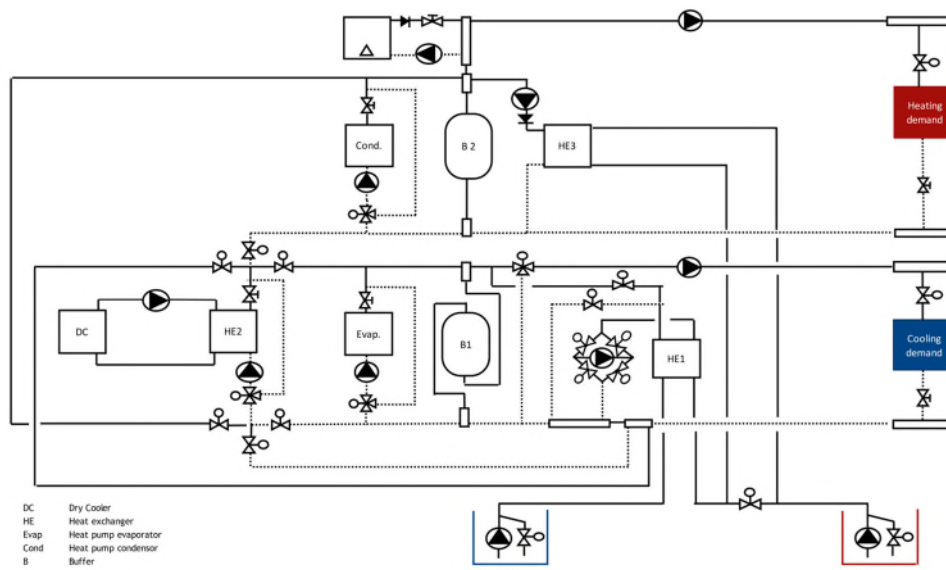


Figure 5. Climate installation schematics, depending on a heating demand, or a cooling demand a different flow will occur.

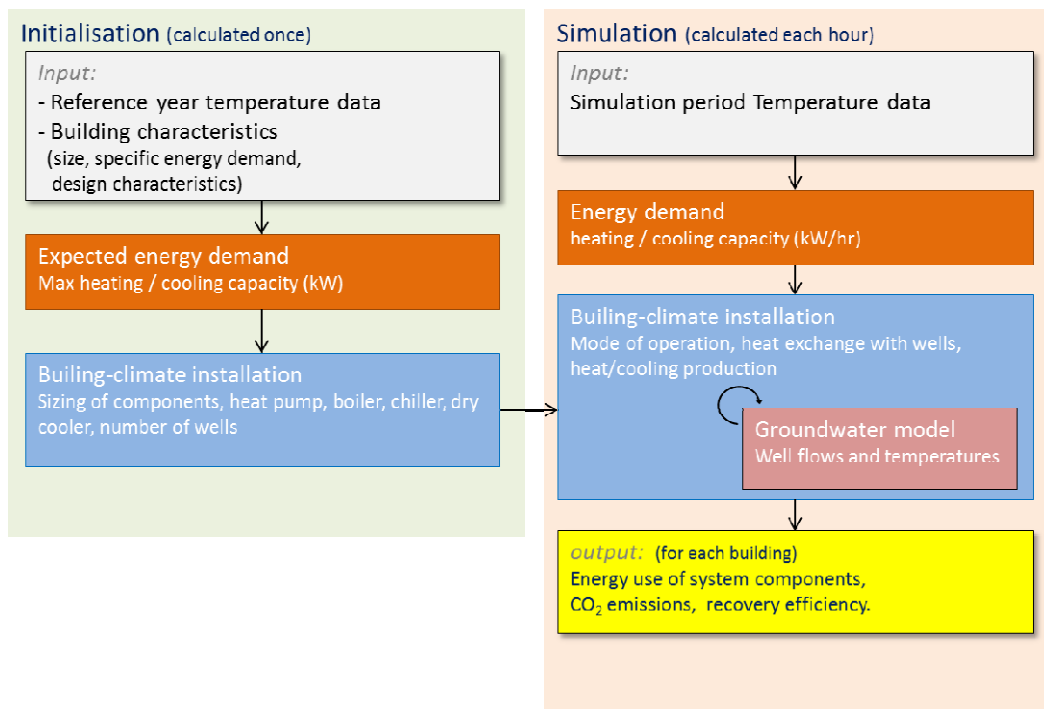


Figure 6. Schematic overview of building-climate installation model initialization and simulation.

Each building in the simulation has these same components and operation modes in the BCI. Due to differences in size and function the energy demand varies and with that also the size of components and overall configuration. Different settings define different building types and thereby specific building functioning. In Figure 6 the schematic set-up of the BCI is given. The logic and/or dynamics of these connections and components are described in the following paragraphs according to the model steps indicated in Figure 6.

Energy demand of buildings

The total yearly energy demand of a building (n) is estimated using:

- Specific energy demand (ε_{h/c_n}) [kWh/m²/yr].
This number depends on the insulation level and function of building.
- Building size (A_n) [m²]

The applied specific energy demand numbers come from monitoring data and RVO (2014), the used values are discussed in the scenario descriptions.

Yearly specific energy use:

$$E_{h/c_y} = \varepsilon_{h/c_n} \cdot A_n \quad (2)$$

Using a simplified model, the total energy demand of a building is distributed over a year in hourly time steps depending on hourly outside air temperatures. In practice also other factors contribute to fluctuations in energy demand, e.g. sun hours (h), solar radiation (j/cm²), relative humidity (%) and building design (insulation, orientation etc.) and type of use (office, residential etc.). The energy demand of the buildings in this study is a simplification of reality because these factors are not taken in account. This is not possible within the planning and budget of this research. This simplified method is used

to be able to efficiently determine hourly energy demands for multiple buildings, enabling the performance analysis of many buildings like is intended in this study. For specific project analysis, it is strongly recommended to increase the level of detail and include building properties (glass, insulation, etc) and other weather conditions such as solar irradiance and wind speeds.

To indicate the relative heating/cooling capacity required the capacity factor (f_{cap}) is defined. This factor is calculated for every hour:

$$f_{cap} = F_1^{F_2} \quad (3)$$

The required capacity depends on the use of the building. When the building is not in use installations are put to idle or at lower capacity. To take this into account the F_1 factor distinguishes between various BCI modes: Start-up of the BCI, normal running and during night. The F_2 factor accounts for if the building is in use during that specific day, or not, Table 3.

Table 3. Factors applied for building mode factors

Building mode (F_1)	Value
first hour of active heating/cooling	2
Office hours	1.5
Outside office hours	1
Building open-closed mode (F_2)	
Building closed (at specific weekday)	0
Building open (at specific weekday)	1

Calculation of reference factor (once at initialization)

To calculate the hourly energy demand ($E_{h/c,h}$) from outside temperature (T_h) and yearly average energy demand ($E_{h/c,y}$) a reference factor (f_r) is needed. This reference factor is unique for each building and ensures that the total heating and cooling demand is distributed over the hours in the year in such a way that A) their total add up to the yearly energy demand, and B) varies depending on the outside air temperature in the reference year¹⁰ and the opening hours of the building. The reference factor is calculated once for each individual building at the initialization of the BCI (Figure 6). This reference factor is then used to determine the hourly heating and cooling demand for any given scenario of hourly temperature time series. This results in a factor that transforms the hourly calculated energy demand parameter to distribute the total heating and cooling demand over each hour of the year taking into account outside air temperature and use of the building:

$$f_{r,h/c} = \frac{E_{h/c,y}}{8760 \sum_{t=0} \Delta T_{ref} \cdot f_{cap}} \quad (4)$$

¹⁰ This study: RA2008EN. A reference climate year made for energy calculations according to national standardization office (NEN).

In which $\Delta T_{ref,h/c}$ is the temperature difference between the temperature until heating/cooling is still needed and the outside air in the data of the reference year ($T_{threshold,h/c} - T_{outside_reference\ year}$), the larger this difference, the larger the required heating/cooling capacity. When this $\Delta T_{ref,h/c}$ is smaller than zero this value is not taken into account.

Calculation of hourly heating and cooling capacity

The calculation of the actual hourly heating and cooling demand ($E_{h/c,hr}$), depending on input climate data is calculated using the capacity and reference factor and ΔT , but now actual climate data is used instead of reference climate data:

$$E_{h/c_hr} = f_c \cdot f_r \cdot \Delta T_{time_series} \quad (5)$$

This results in a distribution of heating and cooling demand for each hour of a given data set, depending on the specific characteristics of the building under consideration, the variation in outside air temperature and building operational modes F_1 and F_2 .

Sizing of components

STEP 1: Heat pump

Depending on the type of BCI: monovalent or bivalent, the size of the heat pump is determined. In case of a bivalent system, the HP is designed to provide for example up to 50% of the maximum required heating capacity ($HP_f = 0.5$). In such conditions the HP can still provide the vast majority of the heat, because the maximum capacity is only needed during a limited amount of time during the year, Figure 7. When choosing a monovalent system, the heat pump needs to cover 100% of the required capacity. Thus, the HP properties follow from the maximum required heating capacity found for each building in the reference year calculation and the setting for the required heat pump capacity and COP. For the base case, the size of the HP (condenser) can roughly vary between 100 and 1000 kW_t.

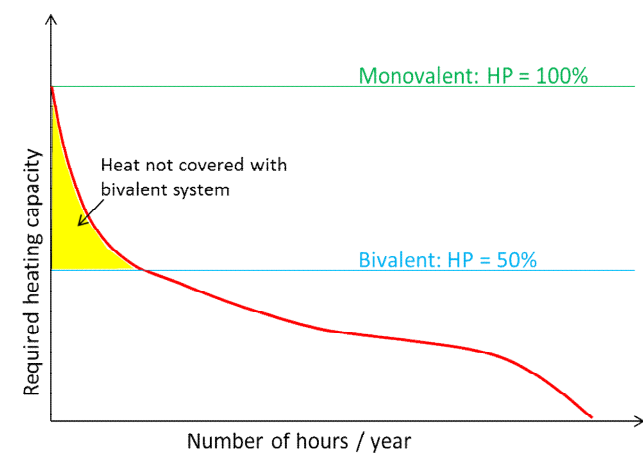


Figure 7. Heat pump design: monovalent vs. bivalent. Adapted from: (Buday, 2014).

STEP 2: Number of wells

The number of wells for each building follow from the maximum of the total required cooling capacity and heating capacity from the wells. The temperature difference between the wells (ΔT) and the volumetric heat capacity of water (c_w) determines the required flow

capacity from the wells (Q). In the study area wells can be made with a capacity of $Q_{max}=100 \text{ m}^3/\text{hr}$, the number of wells follows from dividing the required capacity by the maximum flow rate per well.

$$P = \Delta T \cdot c_w \frac{Q}{3600} \tag{6}$$

STEP 3: Boiler and dry cooler

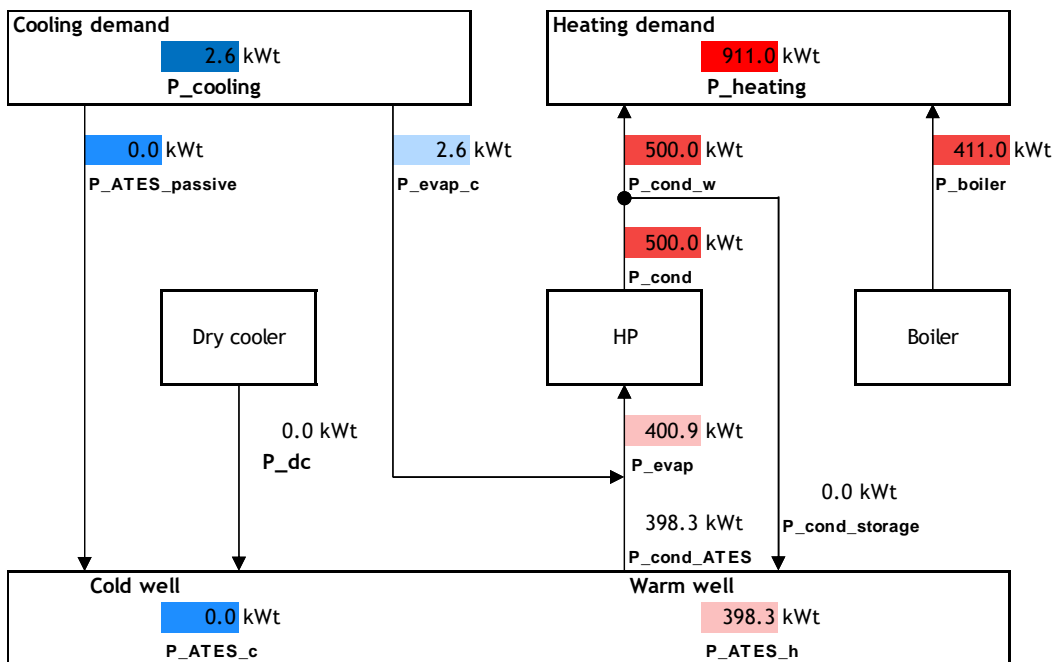
For ATES systems, the boiler is sized according to the remaining required capacity that is not covered by the heat pump, in case of monovalent the boiler is not used. For bivalent heating, no maximum is set on the boiler size, this means that needed heating can always be provided by use of the boiler. The dry cooler, which can be used to charge or discharge extra heat when needed, is limited by the amount of available well capacity and outside air temperature.

STEP 4: Chiller → (cooling without ATES)

The chiller is used when there is a cooling demand, but when a building does not have an ATES system.

Building-climate installation calculations

The aim of the BCI model is to mimic the real world functioning of an ATES system and building interaction. The BCI model consists of a series of calculations to determine the functioning and energy use of the different components of the installation. The building energy fluxes described below are calculated and saved for each hourly time step. Each variable is not explained individually in the text, Table 4 and Table 5 give the description of the used variables, constants and sub-scripts. The scheme in Figure 8 is the blueprint for the calculations explained in the steps described below. From the energy demand of the building, for each component it is calculated how it is operating, depending on current temperature condition and medium flow capacity.



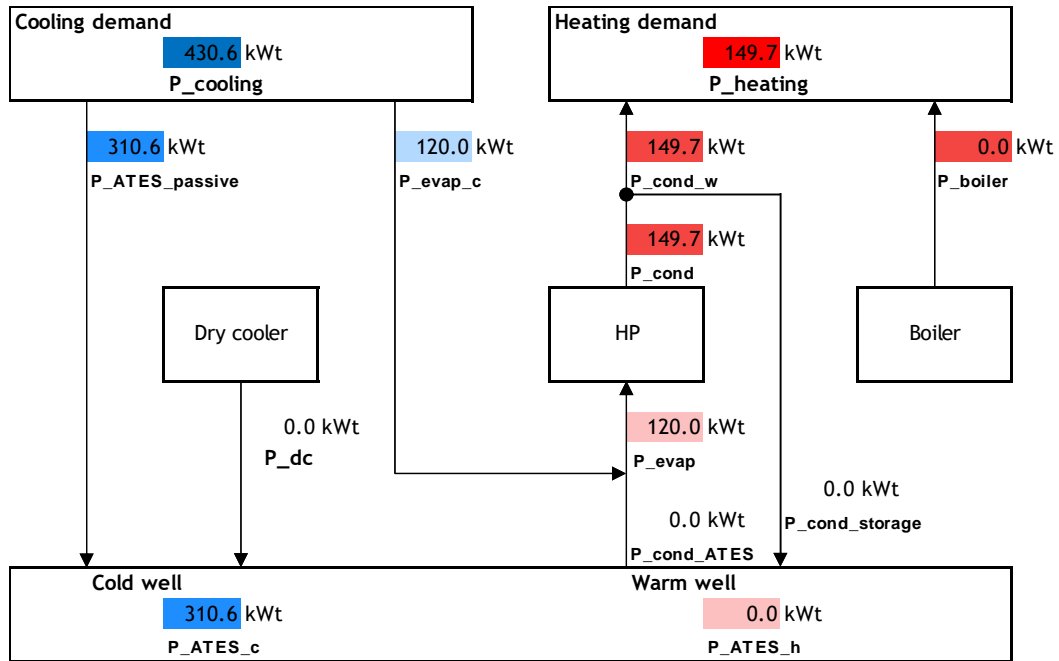


Figure 8. Schematic with operational loads/capacities of BCI components during one hour in winter (top) and summer (bottom).

1. Maximum passive cooling

To determine the amount of passive cooling that can be provided by the system under a given cooling demand, the maximum passive cooling needs to be calculated. To calculate this, the expected infiltration temperature in the warm well due to passive cooling ($T_{inf_w_est}$) is estimated.

$$T_{inf_w_est} = T_{c_return} - T_{hex_loss} \quad (7)$$

Where T_{c_return} is the return temperature of the cooling grid inside the building and T_{hex_loss} is the temperature loss over the heat exchanger. T_{c_return} varies between a minimum temperature ($T_{c_return_min}$) at low cooling capacities and a maximum return temperature ($T_{c_return_max}$) at maximum cooling capacities. T_{c_return} is determined by the size of the cooling demand divided by the maximum cooling demand (equation(8)):

$$T_{c_return} = T_{c_return_min} + \frac{E_{c_hr} \cdot (T_{c_return_max} - T_{c_return_min})}{E_{c_h_max}} \quad (8)$$

The maximum amount passive cooling ($P_{ATES_c_passive_max}$) is subsequently calculated as:

$$P_{ATES_c_passive_max} = Q_{ATES_w_max} \cdot N_{wells} \cdot \frac{c_w}{\Delta t} \cdot (T_{inf_w_est} - T_{well_c}) \quad (9)$$

With c_w being the heat capacity of water, N_{wells} the number of wells for the building under consideration and time step size (Δt), in this simulation one hour.

2. ATES maximum total heating & maximum condenser power

ATES maximal total heating capacity ($P_{ATES_w_max}$) is calculated according to:

$$P_{ATES_w_max} = Q_{ATES_w_max} \cdot N_{wells} \cdot \frac{c_w}{\Delta t} \cdot (T_{well_w} - T_{inf_c}) \quad (10)$$

The maximum extracted volume times the maximal temperature difference between extraction from the warm well (T_{well_w}) and injection in the cold well (T_{inf_c}). The maximum amount of condenser heat that can be stored in the wells is given by:

$$P_{ATES_cond_max} = (Q_{ATES_c_max} \cdot N_{wells} \cdot \frac{c_w}{\Delta t} \cdot (T_{inf_w_max} - T_{well_c})) - P_{ATES_passive_max} \quad (11)$$

3. Calculation of partial load of the heat pump

The heat pump usage is a percentage of the maximum heat pump capacity and can therefore never be higher than 100%. The heat pump can be used for both cooling and heating. The partial load factor (f_{hp_pl}) of the heat pump is determined by the heating/cooling demand and other circumstances. Considering that all heat demand is supplied by the heat pump and all excess heat of the condenser is stored in the ATES system at peak cooling, the partial load of the heat pump determined by the minimum and maximum partial load conditions of both the evaporator and condenser:

$$f_{hp_pl} = MIN[f_{hp_pl_cond_max}, f_{hp_pl_evap_max}, MAX(f_{hppl_evap_min}, f_{hp_pl_cond_demand})] \quad (12)$$

The maximum partial load factor of the condenser capacity is calculated by:

$$f_{pl_cond_max} = \frac{(P_h + P_{ATES_cond_max})}{P_{cond_max}} \quad (13)$$

In which P_h follows from the hourly heating demand $E_{h,h}$, divided by one hour. The maximum partial load of the heat pump evaporator is calculated using the cooling demand and the maximum thermal capacity of the warm well (both are connected to the heat pump evaporator):

$$f_{pl_evap_max} = \frac{(P_c + P_{ATES_w_max})}{P_{evap_max}} \quad (14)$$

The minimal partial load of the heat pump evaporator is calculated by

$$f_{pl_evap_min} = \frac{(P_c - P_{ATES_passive_max})}{P_{evap_max}} \quad (15)$$

The partial load of the heat pump condenser based on the actual heat demand is calculated by:

$$f_{pl_cond_demand} = \frac{P_h}{P_{cond_max}} \quad (16)$$

In practice, there will also be a minimal partial load at which the heat pump can still operate. In this model, it is assumed that in such a case, excess heat or cooling capacity is stored temporarily in a buffer tank in the plant room. This buffer is not modeled, but partial loads between 0% and 100% are allowed instead.

4. Condenser / Evaporator power of the heat pump

$$P_{cond} = f_{hp_pl} \cdot P_{cond_max} \quad (17)$$

The actual condenser power is determined as the partial load multiplied with the maximum condenser power at maximal Heat pump usage (P_{cond_max}).

$$P_{evap} = f_{hp_pl} \cdot P_{evap_max} \quad (18)$$

The actual evaporator power is determined as the f_{hp_pl} multiplied with the maximum condenser power at maximal Heat pump usage (P_{evap_max}).

5. Heat pump operation

From the required heat pump operation is now calculated how much needs to be stored in the wells. When the heating demand is smaller than condenser heating capacity:

$$P_{cond_storage} = P_{cond} - P_h \quad (19)$$

When the cooling demand is smaller than evaporator cooling capacity:

$$P_{evap_storage} = P_{evap} - P_c \quad (20)$$

And how much heat needs to be supplied by the boiler:

$$P_{boiler} = P_h - (P_{cond} - P_{cond_storage}) \quad (21)$$

And how much passive cooling is delivered from the cold well:

$$P_{c_passive} = \text{MIN}(P_{ATES_passive_max}, (P_c - (P_{evap} - P_{evap_storage}))) \quad (22)$$

6. Energy flows Heat Pump

Similarly the required heating/cooling capacity from the ATES wells follow from the heat pump operation:

$$P_{ATES_h} = P_{evap} \quad (23)$$

$$P_{ATES_c} = P_{cond_storage} + P_{c_passive} \quad (24)$$

And the residual heating/cooling directly utilized from the heat pump:

$$P_{evap_c} = P_{evap} - P_{ATES_h} \quad (25)$$

$$P_{cond_h} = P_{cond} - P_{cond_storage} \quad (26)$$

7. Volume flow from ATES wells (injection & extraction)

The amount of volume that is extracted from a type of well and is injected into the other type of well depends on the total energy flow and the ΔT between injection and extraction. In heating mode, the injection temperature is known (set at certain temperature ,e.g. 6 °C). During cooling, the injection temperature is not

exactly known but is estimated in step 1. The volume flow is subsequently calculated as:

$$Q_c = \frac{\Delta t \cdot P_{c_passive}}{(T_{c_return} - T_{well_c} - T_{loss}) \cdot c_w} \quad (27)$$

$$Q_h = \frac{\Delta t \cdot P_{ATES_h}}{(T_{well_w} - T_{inf_c}) \cdot c_w} \quad (28)$$

8. Infiltration temperature of warm and cold well

Key for the interaction with the groundwater model is the temperature of the groundwater injection. For cold groundwater injection a fixed temperature is set, which is similar like practice; the temperature of the evaporator of the heat pump, plus a temperature loss that occurs in the heat exchanger (T_{loss} , 1°C in this study).

$$T_{inf_c} = T_{evap_c} + T_{loss} \quad (29)$$

Heat injection is not as straightforward. During cooling different modes of operation may occur, which together result in an injection temperature for the warm well. Low capacity passive cooling yields relatively low injection temperatures (e.g. 14°C) while high capacity passive cooling results in relatively high temperatures (e.g. 17°C). In case of peak cooling demands, condenser heat of the heat pump (functioning as chiller) will increase the injection temperature even further:

$$T_{inf_w} = T_{well_c} + \frac{\Delta t \cdot P_{ATES_c}}{Q_c \cdot c_w} \quad (30)$$

9. Energy balance of the wells

When the wells of the ATES system are not in balance the BCI model will respond to this and will force the ATES system to restore the energy balance. This is done with the dry cooler and can only be done if the outside air conditions are suitable, in winter it is only possible to store extra cooling capacity and in summer heating capacity. First the required heating and cooling capacity is delivered, the remaining capacity of the wells can be used for energy balance corrections. The energy balance (B) is assessed after a period of continuous operation, after 2 years. When the relative imbalance is more than 15%, the ATES system will use its capacity to store more cold or heat. This is shown in step

$$B = \frac{E_h - E_c}{E_h + E_c} \quad (31)$$

$B < 0$: cold well is growing, more heat needs to be charged to the ATES wells.

$B > 0$: warm well is growing, more cold water needs to be charged into the wells.

Regeneration of the energy balance can be done when $Q_h / Q_c < Q_{max}$. When this is the case, the available amount of pumping ($Q_{max} - Q_h / Q_c$) will be used to store that amount of water as an extra in the subsurface. This is done with the temperature calculated in the previous step (T_{inf_w} / T_{inf_c}).

$$P_{dc} = \frac{(Q_{max} - Q_h) \cdot c_w \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (32)$$

10. Determine Energy use HP, Dry cooler, boiler, circulation pumps

From the operation modes identified in the previous calculation step the energy use of each component for each hourly time step can now be calculated. For the

dry cooler (E_{dc}), circulation/well pumps (E_{wpp} , E_{cp}) and boiler (E_{boiler}) this is straightforward:

$$E_{boiler_hr} = \frac{P_{boiler}}{COP_{boiler}} \cdot \Delta t \quad (33)$$

$$E_{dc_hr} = \frac{P_{dc}}{COP_{dc}} \cdot \Delta t \quad (34)$$

$$E_{hp_hr} = \frac{P_{ATES_c} + P_{ATES_h}}{COP_{well}} \cdot \Delta t \quad (35)$$

$$E_{cp_hr} = \frac{P_{ATES_c} + P_{ATES_h}}{COP_{circulation}} \cdot \Delta t \quad (36)$$

In the calculation of energy use by the circulation pumps are included the pumps for circulation in in evaporator, condenser, boiler, dry cooler, heat exchangers and circulation circuit to the building for both heating and cooling mode.

The COP of the heat pump is not linear, at partial load the heat pump COP is lower than the COP given at full capacity. To take this into account the heat pump COP is corrected with a factor y_{hp} :

$$E_{hp_hr} = \frac{y_{hp} \cdot P_{hp_max}}{COP_{hp}} \cdot \Delta t \quad (37)$$

Taken into account varying COP's at varying partial loads, the electricity consumption is calculated using the following equations. When the heat pump is running at the minimum partial load the correction factor is:

$$y_{hp} = (C_1 \cdot (f_{pl_min} \cdot 100)^2 + C_2 \cdot (f_{pl_min} \cdot 100) + C_3) \frac{PL_{hp}}{PL_{hp_min}} \quad (38).$$

When the heat pump is running at partial or full load the correction factor is:

$$y_{hp} = C_1 \cdot (f_{pl} \cdot 100)^2 + C_2 \cdot (f_{pl} \cdot 100) + C_3 \quad (39).$$

The values for C_1 , C_2 and C_3 are established from a correlation of available heat pump data sheet (Carrier aquaforce greenspeed) and given in Table 4.

Table 4. Explanation of used symbols and subscripts.

Variable name	Description
Main / basic parameters used for the BCI calculations	
E [J]	Energy required
P [W]	Power required
N [-]	Number of..
t [s/hr]	Time
T [°C]	Temperature
Q [m ³ /hr]	Flow rate
E [kg CO ₂ /J]	Emission factor
GHG [kg CO ₂]	Greenhouse gas emissions
Sub-scripts	

<i>c</i>	Associated to cooling or cold well
<i>h</i>	Associated to heating
<i>w</i>	Associated to warm well
<i>hr</i>	Hour
<i>y</i>	year
<i>passive</i>	Demand associated with the passive cooling mode
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>well</i>	Associated to the well flow or temperature
<i>inf</i>	Associated to infiltration in warm/cold well
<i>hp</i>	Associated to heatpump
<i>cond</i>	Associated to heat pump condenser
<i>evap</i>	Associated to heat pump evaporator
<i>pl</i>	Associated to partial load
<i>storage</i>	Associated to heating/cooling diverted to the ATES
<i>demand</i>	Associated to energy demand
<i>boiler</i>	Associated to boiler energy use/supply
<i>dc</i>	Associated to dry-cooler energy use/supply
<i>circulation</i>	Associated to pumps circulating medium inside the building climate installation
<i>loss</i>	Associated to heat/temperature losses
<i>cap</i>	capacity
<i>est</i>	estimated

Table 5. Parameter settings of the base case.

Variable name	Setting	Description
openH [-]	5 - 15	The opening hour of the building, from this moment on the BCI system is used
closeH [-]	19 - 23	The closing hour of the building, from this moment on the BCI system is set to 'night mode'
heat_to [°C]	18	When the outside temperature is equal or higher than his number, the building does not need any heating. Used to calculate the ΔT
cool_when [°C]	12	When the outside temperature is equal or lower than his number, the building does not need any cooling. Used to calculate the ΔT
\mathcal{E}_{h_n} [kWh/m ² /year]	20 - 90	Specific heating demand. The yearly amount of energy that is needed per square meter of building surface to adequately heat the building
\mathcal{E}_{c_n} [kWh/m ² /year]	14 - 66	Specific cooling demand. The yearly amount of energy that is needed per square meter of building surface to adequately cool the building
A _n [m ²]	20,000 - 210,000	The square meter surface of the building that needs cooling/heating.
HP _f [-]	0.35 - 1	Ratio heat pump capacity / maximum required capacity, determining if the system is monovalent (HP _f =1) or bivalent and what relative size the HP is dimensioned at (e.g. 0.35 or 0.5)

fullload_H [hour]	1000 - 2000	Full-load hours of the ATES system. Depends on the HP Factor ($HP_f = 0.35 \sim 2000$, $HP_f 1 \sim 1000$)
T_{c_return_min} [°C]	13	The minimum return temperature from the building after cooling. (cold well -> warm well)
T_{c_return_max} [°C]	16	The maximum return temperature from the building after cooling. (cold well -> warm well)
T_{w_supply} [°C]	45	Supply temperature to the building for heating
T_{w_return} [°C]	35	Return temperature from the building after heating
Q_{well_max} [m³/h]	100	Maximum well pumping capacity
T_{inf_w_max} [°C]	25	Maximum infiltration temperature during cooling [cold well -> warm well]
C₁ [-]	0.001604	Factors that together determine the factor to calculate the used electricity by the Heat pump.
C₂ [-]	0.739065	
C₃ [-]	9.624631	
T_{evap_c} [°C]	8	Evaporator exit temperature during heating (winter)
PL_{wp_min} [-]	0.25	The minimum partial load of the heat pump
T_{loss} [°C]	1	The temperature loss in the heat exchanger.
COP_{dc} [-]	25	The COP of the dry cooler
COP_c [-]	3	The COP of the chiller that is used by the BCI to cool building without an ATES system.
COP_{HP} [-]	5	The COP of the HP at full load
COP_{circulation} [-]	75	The COP for circulation pumps
COP_{well} [-]	40	The COP of the well pump during heating/cooling
COP_{boiler} [-]	0.825	Energy efficiency of the gas boiler, based on upper calorific value Dutch gas mix. (for clarity/uniformity reasons in this study COP is used as a symbol instead of the usual η or EER for boilers.)

Interaction with ATES system

The BCI results are aggregated over the time step length at which the groundwater model runs (e.g. day, 5 days, 30 days). This results in a net flow and weighted averaged infiltration temperature, which function as input files for the MODFLOW model which then runs for one time step. The resulting well temperatures are then input for the BCI model. The groundwater model then “waits” until the BCI model is ready again for a next time step of the groundwater model.

The temperature that can be extracted from the subsurface is the temperature found in the subsurface (surrounding the well). Because an ATES system can have multiple doublets, the average of the subsurface is used for the BCI model. The average temperature of the stored water is calculated for each individual MODFLOW run.

$$T_{extracted_system} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{extracted_well} * V_{extracted_well}}{V_{extracted_well}} \quad (40)$$

5. Assessment framework

Scenario evaluation requires an assessment framework that allows for comparison of different simulation results. This work uses the same assessment parameters as were used by (Bloemendal et al., 2018). This section shows how the BCI electricity and gas consumption and their associated CO₂ emissions are calculated.

CO₂ emissions

To reduce GHG emissions associated with space heating and cooling, all buildings in an area should have either an ATES system or another sustainable heating and cooling system. The key parameter to evaluate the reduction of GHG emissions is the total amount of GHG emitted by the buildings in an ATES plan area. These emissions should also include those of buildings not equipped with ATES, because only then the benefit of applying a denser ATES setting can be quantified. These emissions can be calculated when the future number of buildings in the plan area is known at planning time, together with their heating and cooling demands. Therefore, each scenario is simulated for the same number of buildings. When there is no place available to accommodate all ATES systems, the buildings that cannot place ATES wells are assumed to be equipped with conventional heating and cooling systems, and their associated emissions contribute to the emissions of the plan area of the scenario under consideration. Also, the feedback on the emissions, caused by mutual interaction between ATES systems has been included in the assessment parameter of GHG emissions.

TerugwinEfficiency

Mutual heat interactions of the volumes stored by ATES wells have a negative effect on their energy efficiency. This effect is negative for wells of opposite type (warm vs. cold wells) and positive for wells of the same type (warm vs. warm and cold vs. cold wells). The more ATES system there are in a high density ATES area, the more likely such interactions are to occur. It is therefore clear, that subsurface use can only be intensified up to the threshold above which well efficiencies are reduced to the extent that individual ATES systems cannot no longer operate economically (Jaxa-Rozen et al., 2015).

Energy use & CO₂ emission

Energy use and emissions of ATES systems

The integration is carried out for the whole simulation period of the BCI ($t_0 \rightarrow t$). The total electricity used by the heat pump (E_{hp}), dry coolers (E_{dc}), circulation pumps (E_{cp}) and well pumps (E_{wp}) is calculated for each building with an ATES system by:

$$E_{e_ATES} = E_{hp} + E_{dc} + E_{cp} + E_{wp} = \int_{t_0}^t (P_{hp} + P_{dc} + P_{cp} + P_{wp}) dt \quad (41)$$

Similarly the gas use of each ATES system is calculated via:

$$E_{g_ATES} = E_{boiler} = \int_{t_0}^t P_{boiler} dt \quad (42)$$

The total GHG emission is retrieved by calculating the CO₂ emissions of the considered ATES systems:

$$GHG_{ATES} = \sum_{i=1}^n (E_{e_ATES}^i \cdot e_{fe} + E_{g_ATES}^i \cdot e_{fg}) \quad (43)$$

in which e_{fg} and e_{fe} are the emissions factors for gas and electricity, and n the number of active ATES systems.

Conventional boiler and chiller energy use and CO₂ emissions

Buildings without ATES have a conventional boiler and compression chiller in the simulations. The total electricity used by the chiller (E_c) circulation pumps (E_{cp}) is calculated for each building without an ATES system by:

$$E_{e_conv} = E_c + E_{cp} = \int_{t_0}^t (P_c + P_{cp}) dt \quad (44)$$

Similarly the gas use of each ATES system is calculated via:

$$E_{g_conv} = E_{boiler} = \int_{t_0}^t P_{boiler} dt \quad (45)$$

The total GHG emission is retrieved by calculating the CO₂ emissions of the considered ATES systems:

$$GHG_{conv} = \sum_{j=1}^m (E_{boiler,j} e_{fg} + E_{chiller,j} e_{fe}) \quad (46)$$

in which e_{fg} and e_{fe} are the emissions factors for gas and electricity, and m the number of active conventional systems.

Emission factors for gas and electricity

For this analysis we used the estimated emission factor for the current time (2019/2020) (Table 6). The CO₂ emissions per unit electricity use are constantly changing due to type of power source (e.g. coal, windmills, nuclear). Emissions factors for electricity use are decreasing, due to an increase of green energy sources. The current emissions factor for electricity was estimated to be 0.32 (figure 10, (Schoots et al., 2017)).

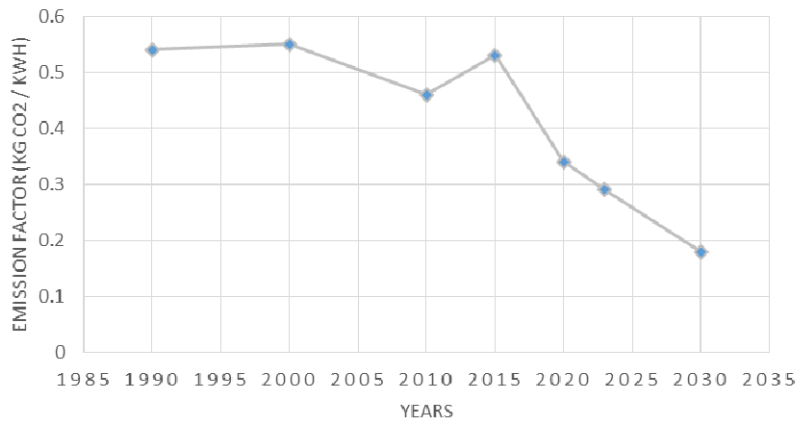


Figure 9. Emission factors (kg CO₂ / kWh) electricity use of the past, and the estimated emissions factors up to 2030. From: .

Table 6. Parameters to calculate CO₂ emissions from gas and electricity use of the buildings BCI.

Name	Value	Description
$\text{Eta}_{\text{boiler}}$	0.825	Energy efficiency of the gas boiler, based on upper calorific value Dutch gas mix
B_{vw}	35.17	Upper calorific value natural gas in MJ/m ³
$\text{CO}_{2\text{-g}}$	1.77	The amount of CO ₂ -emission (kg) per m ³ gas.
$\text{CO}_{2\text{-e}}$	2019: 0.32 2030: 0.18	The amount of CO ₂ -emission (ton) per MWh _e (Schoots et al., 2017).

Efficiency of ATES wells

The energy efficiency (η) of each well over the simulation period is calculated in monthly steps by dividing the extracted amount of thermal energy by the infiltrated amount of thermal energy:

$$\eta(t_0 \rightarrow t) = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\int_{t_0}^t (T_{\text{out}} - T_{\text{amb}}) \cdot Q_{\text{out}} dt}{\int_{t_0}^t (T_{\text{in}} - T_{\text{amb}}) \cdot Q_{\text{in}} dt} = \frac{\Delta \bar{T}_{\text{out}} \cdot V_{\text{out}}}{\Delta \bar{T}_{\text{in}} \cdot V_{\text{in}}} \quad (47).$$

The thermal efficiency taken over all the wells (k) in the model (η_{tot}) is the average of the individual efficiencies determined from Equation (47) weighted by the individual total storage volume of the wells

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{\sum_{i=1}^k \eta_i V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \quad (48).$$

Spatial parameters

Because the extent of the ATES areas and its subsurface conditions differ between the various busy ATES areas the fraction F_s of subsurface over aquifer space allocated to ATES is defined to allow comparison between different areas. The allocated fraction of subsurface space quantifies the density of the ATES setting and allows comparison between different areas. It is the yearly stored volume of groundwater taken over all (k) ATES wells and divided by the available aquifer space in the plan area:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{L_a A_A} \quad (49).$$

With A_A the ATES area [m²] and L_a the aquifer thickness [m].

6. Scenario's

Base case: Variable mutual distances

With the basic model simulation settings, different well placement scenarios similar to Bloemendal et al. (2018) are tested, Table 7. The base case parameter settings are as given in Table 7.

Table 7. Well placement policies for base case scenarios

#	D_s	D_o
1	0.5	2
2	0.5	2.5
3	0.5	3
4	1	2
5	1	2.5
6	1	3
7	1.5	2
8	1.5	2.5
9	1.5	3
10	2	2
11	2	2.5
12	2	3

Energy demand variation scenarios

To assess the effect of variations in energy use of the buildings on the over-all performance under different well placement policies scenarios 4 and 12 are tested with a different energy demand.

A) Energy balance scenario

In the base case the ATES systems are set to keep energy balance, while their energy demand is not balanced. This scenario checks what the effect is of a balanced heating and cooling demand. The total energy demand stays the same, which means that the

specific cooling demand is increased and the specific heating demand is decreased, which is expected to happen in the near future due to better isolation.

B) Variable Energy demand

For the base case we assume that we can accurately determine the energy demand per system, which is difficult in practice. To investigate the effect of a mismatch between design and operational energy demand, a random factor is used to change the specific heating and cooling demand of a building (same energy demand settings as scenario A). The design of the building (parameter settings, heat pump size etc. etc.) is at first calculated based on the expected energy demand, but the specific energy demand of the building is then multiplied with a generated factor. The factor is randomly picked from a normal distribution with the following characteristics: mean = 1, standard deviation = 0.25, which means that >90% of the outcomes is between 0.50 and 1.50.

C) Influence of future climate (2050)

Use of the 2050 – 2055 dataset temperature data to assess the effect of climate change on ATES performance under various ATES well density settings. The data-set was generated from a KNMI climate scenario.

System concept variation scenario's

To assess the effect of variations in system concept of the buildings on the overall performance under different well placement policies scenarios 4 and 12 are tested with a different BCI settings (e.g. different design of the BCI, which has influence on the well placement policy as well).

D) Monovalent heating

For this scenario the ATES system (BCI) is designed to provide all heating with the ATES system. This means that the heat pump must increase. To realize this the HP_f parameter (Table 4) is set at 1. This means the heat pump is designed to be able to handle the largest heating demand ($E_{h,max}$) that is calculated by the reference year. As a consequence of changing this parameter, the amount of needed wells increase, but the size (R_{th}) of these wells decrease, which possibly results into an increase of placed wells (§0, step 2).

E) Increased ΔT

For this system concept the ΔT is increased. For all normal cases, the average ΔT is estimated at 5 °C ($T_{avg,cold} \sim 9.25$, $T_{avg,warm} \sim 14.25$). For this scenario the ΔT is increased with 3 °C, resulting in, on average, 8 ΔT between the cold and the warm well. The following settings were therefore changed, Table 8.

Table 8. changes in temperature settings for increased ΔT scenario

Name	Increase ΔT	Base case
$T_{evap,c}$	6.5	8
$T_{k_retour_min}$	14	13
$T_{k_retour_max}$	17.5	16

When the ΔT is increased, the heat pump is automatically used more → this results in the need of a bigger heat pump, to have similar performance compared to the normal ΔT case the HP_f is increased with an 8/5 following the increased ΔT .

F) Increased ΔT + monovalent

Combination of both D & E. So the HP_f is set to 1 and the average ΔT is increased from 5 to 8.

Bijlage III Interview beheerders bodemenergiesysteem Rabobank

Datum 6 december 2019

Aanleiding:

Deltares geeft aan dat zij in het kader van het project "Hogere dichtheid van Energiesystemen" de partijen met een BODEMENERGIE in het stationsgebied Utrecht interviewt. Dit is het eerste interview.

Aanvullende opmerking van Rabobank: Rabobank beantwoordt deze vragen in haar hoedanigheid van eigenaar/gebruiker van haar locatie aan de Croeselaan te Utrecht die voor verwarming en koeling van haar gebouwen afhankelijk is van een goed functionerende BODEMENERGIE-installatie.

Beleid en gebruik/beheer/strategie Bodemenergiesysteem

Deltares stelt dat op basis van onderzoek het verkleinen van de onderlinge afstanden tussen BODEMENERGIE bronnen een zeer beperkt negatief effect heeft op het rendement van een bestaand systeem, maar een groot effect op de CO2 besparing doordat er meer nieuwe systemen bij kunnen komen. Aannee vanuit onderzoek. Rabobank zal graag onderzoek willen inzien en dus waarop uitspraak gebaseerd is!

We beginnen met een aantal vragen, laten daarna resultaten uit ons project zien en stellen daarna nog een paar vragen.

- 1. Volgt jullie (gemeente/provincie) generiek of specifiek beleid t.a.v. bodemenergie? Kun je daarmee uit de voeten of zijn er knelpunten? Zo ja welke? Wat is er nodig om specifiek beleid te maken voor bodem energie?**

Volgen generiek gemeentelijk/provinciaal beleid. Voor zover we er nu mee te maken hebben gaat volgens de gemeente alles naar behoren. De vergunning is verleend en wij blijven ook binnen de vergunningsnormen. Dit heeft ook te maken met het feit dat voordat er knelpunten in centrumgebied ontstonden er al een vergunning was aangevraagd en de systemen waren aangelegd. Qua hoe dit voor de toekomst is, heeft de Rabobank een afwachtende houding en kijken ze wat er op hen afkomt.

- 2. Vergund volume waterverplaatsing per jaar is vaak veel groter dan volume in praktijk. Bevoegd gezag (provincie Utrecht) denkt erover om bestaande vergunningen te verkleinen om ruimte te bieden aan meer bodemenergiesystemen in de ondergrond. De huidige denkwijze (in Utrecht) is om dit te doen indien verpompt volume < 50% vergund volume is, over een aaneengesloten periode van 3 jaar, tenzij de vergunninghouder kan onderbouwen dat de waterverplaatsing op korte termijn zal toenemen. Hoe zou u reageren als de provincie dit van u vraagt?**

De gegevens die er nu bij Deltares bekend zijn (Jaaroverzichten tot 2018 van Provincie), zijn verouderd want van voor de aansluiting BODEMENERGIE op de 2^{de} fase (aansluiting

oorspronkelijke Rabobebouw). De cijfers van de huidige situatie zullen een ander beeld geven. Daarnaast ook een tweeledige kanttekening: Je kan meer ruimte hebben in de verplaatsing van water in kuubs, maar de hoeveelheid koude en warm water in de bodem is ook een issue. Deze hoeft niet direct gerelateerd te zijn aan de kuubs. Dan moet de Rabobank ook kijken of ze voldoende koude en warmte bezitten, en is dat voldoende om de seizoenen elke keer weer door te komen. Daarom is een bepaalde bandbreedte/buffer wel nodig. Maar daar zit dan wel een bepaalde uitwisseling met de vraag hoeveel ruimte je nog creëert voor je burens, en wat houdt je zelf over. Wel wordt er aangegeven dat 2019 het eerste jaar is dat het hele systeem gekoppeld is aan de BODEMENERGIE, dus 3 jaar terugkijken is in dit geval niet relevant om te kijken hoeveel er nu verbruikt wordt. Daarom is vanuit de Rabobank ook nog wel de vraag hoe er met dit soort ontwikkelingen wordt omgegaan door het bevoegde gezag. Hierop is het antwoord dat als de gebruiker kan onderbouwen dat het gebruik op korte termijn zal toenemen, dat dit dan een uitzondering is. 2019 en de volgende jaren zijn volgens de Rabobank de eerste goede referentie jaren in hun situatie.

3. Nu wordt een 'standaard' afstand van 2,5 thermische straal aangehouden tussen de bronnen. Een concreet voorstel voor een mogelijk nieuwe richtlijn is het verkleinen van de onderlinge afstanden tussen bodemenergiebronnen. Wat vindt u ervan als bronnen dichter bij elkaar geplaatst zouden mogen worden op basis van nieuw onderzoek en welke aspecten zijn daarbij voor u van belang?

De Rabobank werkt nu veelal met modellen waarbij men denkt te weten wat er in de ondergrond speelt. Daarnaast is er ook een project (CRYSTAL) om in beeld te krijgen wat de ondergrond nou werkelijk doet. Als daaruit aantoonbaar komt dat de thermische straal terug kan worden gebracht en dit ook met de technieken kan, dan zal de Rabobank ook in de basis niet tegen zijn.

In de huidige situatie heeft de Rabobank geen glasvezelmetering nodig in de ondergrond. Maar indien er meer systemen zullen worden geplaatst in de omgeving van de Rabobank-systemen, dan zijn glasvezelmeteringen een mogelijkheid voor extra monitoring. Anders ben je namelijk alsnog 'in de blauwe lucht aan het bedenken'. Opmerking van Jos Waagmeester, deels met pet IF Technology: "Daarnaast zijn deze metingen ook duur, en kan men het geld liever in BODEMENERGIE-systemen steken om zo snel mogelijk van het gas los te komen dan nog meer onderzoek. Dit heeft ook te maken met het feit dat er inmiddels voor 2000 systemen een vergunning is afgegeven, en dat voor 1000 systemen er monitoringsgegevens beschikbaar zijn. Daarmee kan je ook al heel veel over zeggen en bijna alle informatie wel uit halen die je ook met glasvezel kan halen (rendementen van systemen en temperatuur). Ik zou het nog wel graag willen zien worden toegepast op mono systemen waarbij de warmfilter boven en een koude filter onder. Er wordt dan wel vanuit gegaan dat er voldoende bodemlagen aanwezig zijn om deze te scheiden van elkaar, maar de werkelijkheid is weerbarstig. De gegevens die er nu van zijn, zijn slecht. Wat betekent dit voor thermische kortsluiting en verliezen? Bij een kleinere thermische straal is er ook meer risico op thermische kortsluiting. Dan moet je meer aandacht vragen voor de energiebalans (combinatie van de water- en thermische balans). Als je daarop meer grip op hebt in de installatie, dan is er niet zoveel aan de hand om de thermische straal te verkleinen, mits je grip hebt op de energiebalans. Verder geeft hij ook aan dat de branche nogal conservatief is, en deze stapelen zekerheden op zekerheden waardoor je over gedimensioneerde systemen krijgt met alle gevolgen van dien (duurder, meer ruimtebeslag, functioneren minder). Dit heeft ook te maken met zekerheid marges. Door nauwkeuriger te ontwerpen op wat je nodig hebt scheelt het je kosten, krijg je minder

pendelgedrag tussen installaties en over het algemeen een betere delta T. En minder ondergronds ruimtebeslag, dus meer ruimte beschikbaar voor BODEMENERGIE-systemen.”

- 4. Wat zou u doen als het rendement van uw bodemenergiesysteem omlaag zou gaan en het zou herleidbaar (vermoedelijk wel lastig aantoonbaar) zijn dat dit komt door de onderlinge interactie met een bodemenergiebron van uw buurman? Wat is bijvoorbeeld technisch/operationeel, overleg, juridische stappen. Heeft u dit al meegemaakt?**

Volgorde zal zijn technisch/operationeel, overleg en als laatste juridisch. In eerste instantie zal het een technisch verhaal zijn. Wat gebeurt ons en wat kunnen we? Op het moment dat het nodig is dat er ook andere mensen aan tafel zullen moeten komen dan zal dat ook vanzelf gebeuren. Dit is ook de volgorde, eerst onderzoeken, dan praten, en als je er onderling niet uit komt, dan pas verdere stappen nemen. Eerst kijken waar het vandaan komen, en zijn er ook nog sturingsmogelijkheden?

- 5. Hoe zou u reageren als uw bedrijf/organisatie uw bodemenergiesysteem zou willen aanleggen of uitbreiden, maar hier geen vergunning voor krijgt, omdat de dichtheid qua bronnen in de bodem te hoog is? Met andere woorden: er is (volgens het huidige beleid) geen ruimte meer. --> Bent u bereid om gezamenlijk met uw burens de warmte en de koude te delen? (van individueel naar collectief). En andersom als u burens willen uitbreiden.**

Voor de Rabobank is het vooral belangrijk dat de primaire processen van het bancaire wezen in stand blijven. Daar zijn voorzieningen voor, maar dit is leidend voor alles wat zij daar aan koppelen. Als het systeem erin kan voorzien dat dit primaire proces kan blijven functioneren, dan staat de Rabobank ervoor open om met de burens of de omgeving te kijken wat zij voor hen en andersom kunnen betekenen. Hierover is ook de Rabobank wel eens bij een bijeenkomst van de gemeente geweest met allerlei partijen uit het gebied. Daar is gezegd dat de Rabobank altijd bereid is om te kijken hoe we het beter kunnen doen met elkaar, maar voorop staat dat het gebouw van de Rabobank wel draaiende kan blijven op het BODEMENERGIE-systeem. Bovendien vinden ze het dan ook belangrijk dat er niet alleen naar de Rabobank wordt gekeken, maar naar alle partijen die warmte en koude kunnen leveren middels een BODEMENERGIE-systeem in het gebied. Het is een lastige opgave omdat er in het gebied veel partijen zijn en het lastig is om deze samen op 1 lijn te krijgen. Dat is tot nu toe nog niet gelukt met de gesprekken die er zijn geweest omdat niet alle partijen zijn aangehaakt (zoals de Jaarbeurs). De Jaarbeurs is toen er niet in meegegaan omdat zij destijds (najaar 2017) nog niet de plannen rond hadden. Dit is nu wel het geval.

- 6. Vind u in een dergelijk geval dat andere bedrijven in de buurt (a) overcapaciteit moeten delen in een collectief systeem of (b) capaciteit moeten inleveren, zodat uw uitbreiding door kan gaan?**

Dit is een tweeledige vraag omdat het niet alleen om de burens, maar ook de Rabobank zelf gaat. Als je het zelf hebt, doe je het dan zelf ook? Hierop is het antwoord ja, mits de primaire processen van de Rabobank niet in gevaar komen. En dit zal voor andere partijen net zo gaan, omdat ze niet in de kou willen gaan zitten.

- 7. Wat vindt u in het algemeen van het (mogelijke) uitgangspunt dat een klein rendementsverlies voor een individuele vergunninghouder acceptabel is, wanneer daar een grotere CO₂-reductie/energiebesparing op gebiedsniveau tegenover staat? Welk rendementsverlies (CO₂, kosten, comfort, etc.) zou u maximaal acceptabel vinden? Hoe groot moet de gebiedswinst zijn die daar tegenover staat?**

Vinden het heel moeilijk om iets over te zeggen. Dan moet je echt concrete cijfers hebben van wat lever je in en wat krijg je daarvoor aan CO₂-reductie voor terug. Het is een maatschappelijke vraag. Ook hier geldt weer dat de primaire processen draaiende moeten blijven worden gehouden. Daarbuiten hangt het af van je principes en je klimaatklasse van je gebouw. Als je veel ruimte daar in hebt en je kan makkelijk wat inleveren, dan is dat makkelijker te realiseren dan dat je dicht bij je ondergrens zit voor je medewerkers (comfort voor de medewerkers). Hier zit een bepaalde bandbreedte in van wat je acceptabel acht. Ook wordt er aangenomen dat een bank gevoeliger ervoor is om wat meer te gaan betalen om de CO₂-reductie te bevorderen dan tegen de medewerkers te zeggen dat zij een stukje comfort moeten inleveren om dit te bewerkstelligen. Want deze eisen van comfort liggen hoog en ga je echt niet naar beneden krijgen met zulke argumenten. Anders oplossen ligt meer in de lijn.

8. Moeten hierover landelijk/provinciaal/gemeentelijk/op wijkniveau afspraken of regels over worden gemaakt? Wat vindt u er van wanneer hier in een drukke omgeving anders mee om wordt gegaan dan in een rustige omgeving? (druk/rustig betreft gebruik ondergrond)

Dat er wat moet komen, daar is men van overtuigd. Maar bij wie de verantwoordelijkheid moet komen te liggen en wie daar de kar moet trekken, dat is lastig om aan te geven. De Rabobank volgt meer wat er bepaald wordt in de regel- en wetgeving dan dat zij daar richting in geven. Je hebt een vergunning gekregen en daarop het systeem gebaseerd. Als deze positie door wet- en regelgeving zou worden ingeperkt, daar zou de Rabobank wel moeite mee hebben. Voor maagdelijke gebieden is het makkelijk om nieuwe regels in te voeren, terwijl voor bestaande bebouwde gebieden je te maken hebt met bestaande rechten en investeringen. Rabobank is een duurzame bank en voorstander van duurzame energie en vergroening. Hier is sprake van een bestaande en goed benutte BODEMENERGIE waarmee die duurzaamheid voor dit gebouw wordt vorm gegeven. Andere afspraken kunnen daar afbreuk aan doen.

De mensen in het interview zijn aangesteld om het systeem draaiende te houden en niet om bijv. een aanjager te worden, financieringen verstrekken. Dit is wel in het verleden door de Rabobank gedaan middels financiering (bijv. Uni Eindhoven). Rabobank is nog steeds een aanjager en investeert in duurzame energie, waaronder BODEMENERGIE.

9. Wat zouden voor u de voor- en nadelen zijn van aangesloten zijn op een collectief systeem versus een individueel systeem? Ondergronds aan elkaar gekoppeld of bovengrond aan elkaar gekoppeld; 1 vergunninghouder voor gehele gebied. In hoeverre kan of mag de overheid hier van u sturend in optreden? Ziet u hierin voor uzelf een actieve rol?

Kernwoord is hier afhankelijkheid. De Rabobank heeft bewust gekomen om zelf een eigen installatie aan te leggen (zowel boven als ondergronds). Als je overgaat naar een gebiedsvormen, dan wordt je afhankelijk. Dat is 1 van de grootste pijnpunten in relatie tot de leveringszekerheid van warmte en koude. Dan zou je al dichtgetimmerde contracten moeten hebben waarin deze leveringszekerheid al is gewaarborgd. Dan zit je ook meer op het juridische kader. Ook de technische kant zou het niet fijn vinden om van een goedwerkende individuele installatie over te gaan naar een systeem waarmee je in confrontatie kan komen met andere partijen. Dit heeft er ook mee te maken met het feit dat de positie van de Rabobank wat anders is dan een normaal kantoor met personeel. Want naast warmte is elektriciteit ook een punt waarop de Rabobank een back-up heeft. De Rabobank is zelfvoorzienend, want als een datacenter plat gaat dan gaat ook de bancaire functie plat. Bij een lokale branche van de Rabobank is dit minder het geval en

zouden ze wel sneller kiezen voor een collectief systeem omdat je er minder hoge eisen aan stelt dan bij het hoofdkantoor.

10. Nog iets over energiebalans? Wat vindt u van het energiebalans beleid? Bent u zich bewust van dat u energiebalans moet hebben?

De Rabobank voldoet er nu netjes aan. Maar vindt het lastig om te kunnen bepalen of de marge van de balans veel of weinig is. Of dat groter of kleiner moet worden, daarvoor wordt ook naar de markt geluisterd. En of dat wijs is, daar kan de Rabobank niets over zeggen, net zo min over wat voor impact dat kan hebben in de ondergrond. Veel partijen zouden daarbij geholpen zijn als de aandacht verlegd van de energiebalans naar een hogere delta T. Dan bereik je hetzelfde, maar leg je de aandacht op zo energie-efficiënt gebruik maken van de ondergrond. In de energiebalans is op dit moment nog te weinig aandacht besteed aan de delta T's en dat een balans gehaald kan worden met relatief lagere delta T's en dan maak je oneigenlijk gebruik van de bodem.

11. Draait uw Open bodemenergiesysteem momenteel in balans? Zo nee, hoeveel warmte of koude moet u bijladen voor balansherstel en hoe gaat dat/ wat is hierbij uw plan van aanpak?

Het BODEMENERGIE-systeem draait momenteel in balans. Om de energiebalans ook in de toekomst te behalen is er de mogelijkheid om te via dry cooler het koude laden te ondersteunen, maar er is tot nu toe nog geen noodzaak geweest hier gebruik van te maken. De koude vraag neemt toe, en dat wordt ook erkend door de Rabobank. Er staat een dry cooler op het dak en dat zou voor nu voldoende moeten zijn.

12. Hoe is de relatie warmte/koude vraag – opslagvolume – delta T

De Rabobank is hier constant mee in beweging. Rabobank maakt hierbij vanaf de start gebruik van de expertise van IF Technology. Men blijft kritisch kijken waar men optimalisaties kan doorvoeren in de installaties. Hiermee wordt naar alle facetten gekeken qua wat er boven- en ondergronds beter kan. Er wordt gekeken naar debiet, energiehoeveelheid, delta T, energieomzetting en energieoverdracht over de TSA, maar ook de werking van de afgifte aan het gebouw.

Hierbij wordt gekeken naar het totale energieverbruik van het systeem, maar ook het gebruik en benutting van de ondergrond. Ook dat alle bronnen ongeveer even zwaar worden belast en meedraaien in het systeem. Dit is ook in beeld gebracht, en men houdt een vinger aan de pols om de opslagvolumes per bron te kunnen sturen. Op dit moment is men ook bezig om de regelstrategie aan te passen zodat men betere debietsstappen aan kan geven. Voor deze debieten is dezelfde systeemdruk nodig om dit te kunnen regelen om zo ongeveer hetzelfde debiet te kunnen leveren per bron(+/- paar %).

Het maximale vergunde opslagvolume is vastgesteld op 350 kuub per uur, en dit wordt in de zomer ook daadwerkelijk behaald tbv koeling van het gebouw.

Wat nog wel een aandachtspunt is, is dat men echt nog wel bezig is om de temperatuur omlaag te krijgen. Hier zit nog wel een uitdaging om dit te verbeteren. Daar komt de komende 2 jaar ook de focus op om dit voor elkaar te krijgen. De injectietemperaturen moeten daarvoor omlaag. Want de trend in dit soort gebouwen is dat de interne warmtelast alleen maar zal gaan toenemen doordat het gebouw goed geïsoleerd is. Daarmee ga je dan uit de pas lopen als je niet uitkijkt. De warmtewisselaar is aangepast zodat er een betere delta T naar de bronnen toe gaat. Dus minder verlies. Ook regeltechnisch is naar de warmtepompen gekeken of deze efficiënter en eerder ingezet

kunnen worden in de winter. Hiermee wordt dan de stadsverwarming steeds minder belangrijk. Deze zal wel onderdeel uit blijven maken, maar is voornamelijk nu als back-up. Dit is ook een stukje speelruimte om in de voorzieningen te kunnen voorzien.

13. Wat is de COP van de warmtepomp en door welke omstandigheden wordt die (vooral) beïnvloed? Sturen jullie hier op?

Deze wordt gemonitord en staat nu op voor de laatste maand op 6 volgens de laatste rapportage. Daarvoor tussen 3 en 4. Hij wordt wel steeds beter. Dit wordt gedaan door optimalisatie. Zo zijn de condensor- en verdamperpompen nu overgegaan van een sturing vanuit de machine i.p.v. vanuit de regeltechniek met vaste waarden. Dit is gedaan op de delta T die je nodig hebt, en de uitgaande temperatuur die daarmee omhoog gaat. Dit is een half jaar geleden gedaan en men is nog aan het finetunen. Toch ziet me nu al wel een verbetering qua efficiëntie en dat men de laadtemperaturen in de winter beter kunnen borgen.

IF Technology gebruikt het monitoringsprogramma Lift waarmee de Rabobank kan sturen op o.a. de COP. Hierbij worden maandelijks geautomatiseerd kant en klare rapportages verstuurd die inzicht geven in de werking en inzet van de duurzame klimaatinstallatie. Deze rapportages worden ook in een overleg besproken: Wat zijn de afwijkende waardes, wat willen we wel, wat willen we niet, en hoe gaan we hiermee om? Dit is een constant proces.

14. Dreigen jullie wel eens het jaarlijks vergunde opslagvolume te overschrijden? Wat is de oorzaak, bijvoorbeeld balansherstel, inefficiënt functioneren, te kleine capaciteit. Zo ja wat doen jullie dan?

Nee, maar in 2018 is een extra gebouw aangesloten op Open bodemenergiesysteem en 2019 wordt pas het eerste jaar dat het systeem met deze vraaguitbreiding draait; wel is in de zomer soms het maximale debiet nodig voor koeling.

15. Kunnen jullie BODEMENERGIE bronnen afzonderlijk aansturen of niet. Zo ja doen jullie dit ook?

Ja dat zou kunnen, maar gebeurt nu niet omdat alle bronnen ongeveer even goed leveren.

16. Draagt ons onderzoek naar kansen voor grotere dichtheid BE daaraan bij? Hoe ga je dit omzetten in regels?

Ja. Randvoorwaarde voor de Rabobank is wel het in stand houden van het eigen belang; primair proces moet doorlopen, geen concessie aan comfort; wel eventueel lichte extra verbruikskosten kunnen besproken worden eventueel tegen vergoeding o.i.d. Bij afspraken op gebiedsniveau moeten wel alle partijen meedoen.

17. Hebben jullie als eindgebruiker suggesties of adviezen voor nieuwe beleid/richtlijn t.a.v. bodemenergie? Waar moet rekening mee worden gehouden? Deelonderwerpen: interferentie, goede benutting ondergrond, eisen aan Delta T, eisen aan balans.

Betere Delta T bij andere en ook eigen systemen, alle BODEMENERGIE-eigenaren moeten meedoen bij gebiedsaanpak.

Utrecht case studie:

Vragen specifiek voor bodemenergiesystemen in Utrecht ten behoeve van de case studie

Gebouw

1. Welke gebouwen zijn nu aangesloten op het BODEMENERGIE-systeem en wat is het vloeroppervlak?

DE torens en gebouw er om heen. Zilver (UC24) en auditorium (UC28) nog niet, maar daar komen wel renovatieplannen voor. Gegevens vloeroppervlak zijn niet paraat tijdens interview.

2. Wanneer worden deze gebouwen verwarmd en gekoeld (openingstijden, weekend)?

In principe alleen tijdens kantooruren, maar personeel kan ook op andere tijden werken en afhankelijk van bezettingsgraad wordt automatisch opgeschaald

3. Wat is de jaarlijkse warmte en koude vraag? Komen deze waardes overeen met de vergunde waardes?

Vanuit bodem: 300 MWH (zowel warmte als koude); totale vraag niet paraat.

4. Zijn er wijzigingen voorzien in de toekomst? Zo ja, wat voor soort wijzigingen?

Alleen kleine wijzigingen; mogelijk extra koeling opslaan als warmtevraag verder afneemt+ renovatie 2 extra gebouwen en afbouw van gebruik stadsverwarming (dan alleen nog voor back-up)

5. Hoe vindt afstemming plaats met het ondergrondse deel van het BE-systeem?

Er wordt vooral veel gemeten; optimalisatie vindt vooral bovengronds plaats.

Andere bronnen voor warmte en koude

1. Welke back-up systemen voor warmte en koude gebruikt u?

Stadsverwarming en dry coolers op dak (laatste worden nu niet gebruikt, omdat ze (nog) niet nodig zijn.)

2. Hoe vaak worden deze ingeschakeld?

Dry coolers niet; stadsverwarming: Doel om deze niet standaard te gebruiken, maar alleen als back-up aan te houden

3. Hoeveel procent van de warmte en koude leveren deze?

Vanaf 2019: doel 0%; dry coolers worden in de toekomst mogelijk ingezet om extra koude te laden.

Bijlage IV Overzicht verpompte volumes van open bodemenergiesystemen in centrum Utrecht

Voor het systeem van NS-station waarop het Stadskantoor en de OV terminal nu zijn aangesloten wordt dit weergegeven in tabel IV-1. In deze tabel is ook een vergelijking gemaakt met de warmtevraag zoals berekend volgens de methodiek uit hoofdstuk 2 voor de gebouwen Stadskantoor en OV Terminal.

Table IV-1 Analyse van data uit jaaropgaven van Open bodemenergiesysteem NS-Sation en vergelijking met de berekende warmte en koude vraag.

jaar	Gerapporteerd								berekend	
	Koudeopslag				Warmteopslag				Energieopslag	
	Energie <i>MWh</i>	Water <i>X 1000 m³</i>	T _{in} °C	Δ T °C	Energie <i>MWh</i>	Water <i>x 1000 m³</i>	T _{in} °C	Δ T °C	Koude <i>MWh</i>	Warmte <i>MWh</i>
2015	1336	154	6.83	7.48	1124	134	16.53	7.20	5232	4620
2016	2018	205	6.97	8.52	1508	212	16.40	6.14	6082	4738
2017	1763	191	7.47	7.98	1874	347	15.87	4.68	5958	4506
2018	1413	161	7.47	7.53	1827	334	15.95	4.72	7627	4445
gemiddeld	1632	178	7.19	7.92	1583	257	16.09	5.32	6225	4577

Het vergunde jaarlijkse opslagvolume is 2.307.600 m³ (som van debieten voor koudeopslag en warmteopslag). Dat is weliswaar gebaseerd op 7 dubletten terwijl er nog maar 3 zijn gerealiseerd. 3/7 van het vergunde opslagvolume is 988.971 m³, nog altijd veel meer dan het verpompte opslagvolume.

De opgeslagen hoeveelheden warmte en koude zijn ongeveer een kwart van de met het model berekende hoeveelheden.

In tabel IV-2 zijn uit de jaaropgaven alle verpompte debieten per jaar weergegeven en vergeleken met het vergunde volume.

Tabel IV-2 Overzichtsdata van verpomp volume van Open bodemenergiesystemen in Utrecht

BODEMENERGIE systemen	jaar	volume water		vergund m ³ /jaar	ratio geleverd/vergund in %	aantal bronnen		opmerking
		m ³				warm	koud	
		warmte- levering	koude- levering					
CORIO1	2012	5.051	0	1.080.000	0,47	3	3	
	2013	3.347	4.840		0,76			
	2014	147	432		0,05			
	max	5.051	4.840		0,76			
	gemiddeld	2.848	1.757		0,43			
Corio 2				1.865.400		3	3	
Ns Station	2015	153.942	133.729	2.307.600	26,64	7	7	maar 3 van de 7 doubletten gerealiseerd. ratio hiervoor gecorrigeerd
	2016	204.620	211.951		38,57			
	2017	190.774	347.033		49,80			
	2018	161.469	334.181		45,89			
	max	204.620	347.033		49,80			
	gemiddeld	177.701	256.724		40,22			
Rabobank	2010	220.766	70.501	1.490.000	26,97	5	5	
	2012	257.090	205.027		42,79			
	2013	212.963	183.512		36,71			
	2014	53.493	316.952		34,30			
	2015	148.474	202.587		32,51			
	2016	176.670	194.313		34,35			
	2017	199.318	390.199		54,58			
	2018	223.327	460.049		63,28			
	max	257.090	460.049		63,28			
	gemiddeld	186.513	252.893		40,69			
KTT/LKT				504.240		3	3	

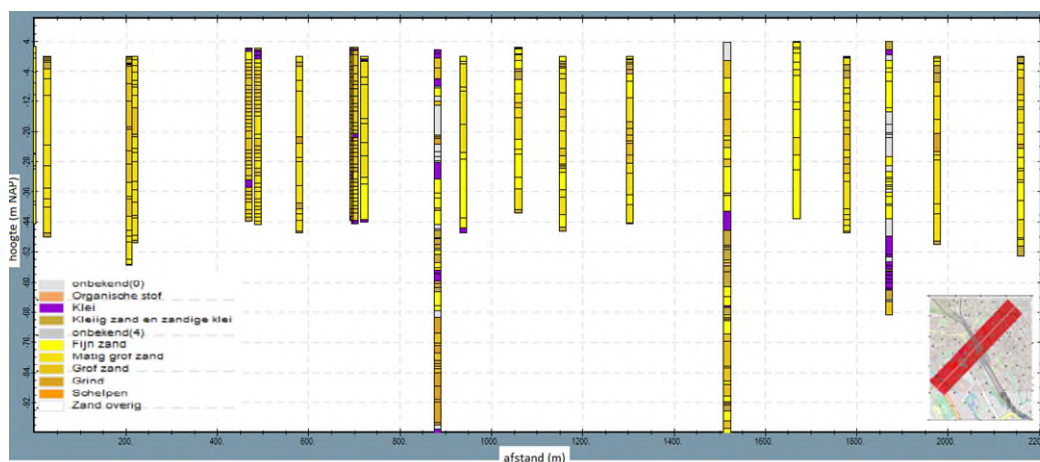
	2011	21.027	2.422	154.800	2,17	3	2	vergund opslagvolume (774.000 m ³ /jaar) verdeeld over de 3 clusters op basis van aantal warme bronnen
Jaarbeurs cluster 1								
	2012	8.509	46.801		5,12			
	2013	31.192	2.150		3,09			
	2014	9.269	9		0,86			
	2015	0	0		0,00			
	2016	119.428	18.799		12,80			
	2017	54.670	27.719		7,63			
	2018	4.853	62.339		6,22			
	max	119.428	62.339		12,80			
	gemiddeld	31.119	20.030		4,74			
Jaarbeurs cluster 2	2011	19.420	44.097	309.600	5,88	6	3	
	2012	46.450	28.554		6,94			
	2013	69.965	148.285		20,21			
	2014	76.449	46.017		11,34			
	2015	60.372	114.328		16,18			
	2016	43.571	50.272		8,69			
	2017	78.436	115.239		17,93			
	2018	208.882	107.309		29,28			
	max	208.882	148.285		29,28			
	gemiddeld	75.443	81.763		14,56			
Jaarbeurs cluster 3	2011	62.966	35.115	309.600	9,08	6	3	
	2012	45.922	26.997		6,75			
	2013	10.972	37.576		4,50			
	2014	81.770	3.155		7,86			
	2015	36.269	33.455		6,46			
	2016	24.294	1.152		2,36			
	2017	43.717	40.016		7,75			
	2018	16.703	41.515		5,39			
	max	81.770	41.515		9,08			
	gemiddeld	40.327	27.373		6,27			
muziek-paleis	2014	112.100	343.900	624.200	42,22	2	2	
Paarden-veld	2010	34.000	166.630	520.000	18,58	3	3	
	2011	18.280	114.830		12,33			
	max	34.000	166.630		18,58			
	gemiddeld	26.140	140.730		15,45			

Bijlage V Grondwatermodel ten behoeve van de case studie

In deze bijlage worden de geologische beschrijving, het geologische model GeoTOP en het grondwaterstromingsmodel beschreven.

Geologische beschrijving

De ondergrond van de gemeente Utrecht is heterogeen. In het algemeen wordt de ondergrond gekenmerkt door twee aquifers: op ongeveer - 5 tot -45m t.o.v. NAP en van - 70 tot -110m t.o.v. NAP. In de ondergrond van de stad Utrecht komen op diverse plaatsen geulafzettingen van het Rijn-systeem voor. Op sommige plaatsen is hierdoor een directe verbinding tussen de twee watervoerende pakketten ontstaan. De rivierafzettingen van de Rijn tonen ook een sterke ruimtelijke variatie binnen de watervoerende pakketten. Dit resulteert in een heterogene ondergrond. Dit is duidelijk te zien in het boorbeschrijvingen die aanwezig zijn in de database DINO (www.dinoloket.nl). Figuur V-1 toont boorbeschrijvingen in een noordwest-zuidoost georiënteerde dwarsdoorsnede in de stad Utrecht.



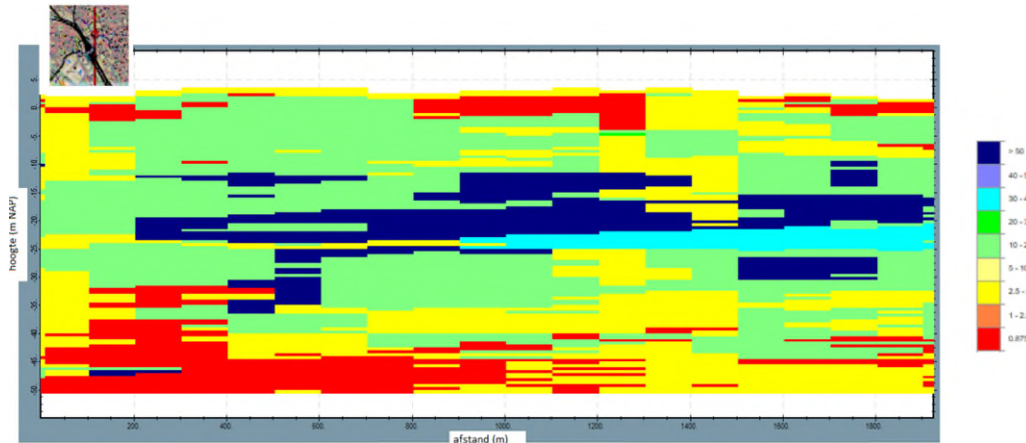
Figuur V-1 Profiel met boorbeschrijvingen van zuidwest (links) naar noordoost (rechts) in het centrum van Utrecht met laterale tolerantie van 200 meter.

In deze dwarsdoorsnede is het duidelijk dat er een kleilaag aanwezig is in de buurt van de -50m t.o.v. NAP, de scheidende laag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket. Lokaal komt er daarboven soms ook nog klei voor op. De niveaus waarop de klei wordt aangetroffen kunnen over een korte afstand sterk variëren. Ook is de zandige laag van het eerste watervoerende pakket niet homogeen: de boorbeschrijvingen variëren van fijn zand tot grind.

GeoTOP model

De heterogeniteit van de ondergrond van alle regio's in Nederland wordt door TNO uitgewerkt met behulp van het voxel-model GeoTOP. Het GeoTOP model bestaat uit voxels (model cellen) van 100 m x 100 m x 0.5 m. Per voxel wordt de lithologie en heeft

TNO de horizontale en verticale doorlatendheid geschat op basis van de lithologie. De diepte van dit GeoTOP model varieert in verschillende regio's. Voor de stad Utrecht en omgeving strekt het GeoTOP model zich uit tot een diepte van -50m t.o.v. NAP. Dit geologische model is beschikbaar via de webportal DINOLoket (www.dinoloket.nl). Een voorbeeld van de dwarsdoorsnede van de horizontale doorlatendheid is gegeven in figuur V-2.

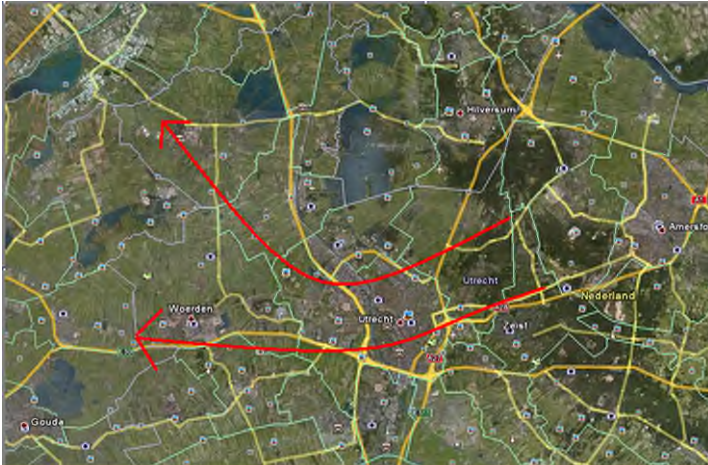


Figuur V-2 Dwarsdoorsnede van de GeoTOP-doorlatendheid (m/dag) in het centrum van Utrecht; orientatie is van zuid (links) naar noord (rechts)

In deze dwarsdoorsnede is het duidelijk dat er sprake is van een sterke variatie in de doorlatendheid, met gebieden met bijvoorbeeld een doorlatendheid van meer dan 50 m/dag onder gebieden met een doorlatendheid van minder dan 5 m/dag. Binnen REGIS worden deze gebieden ingedeeld in hetzelfde watervoerende pakket vaak met een gelijke doorlatendheid.

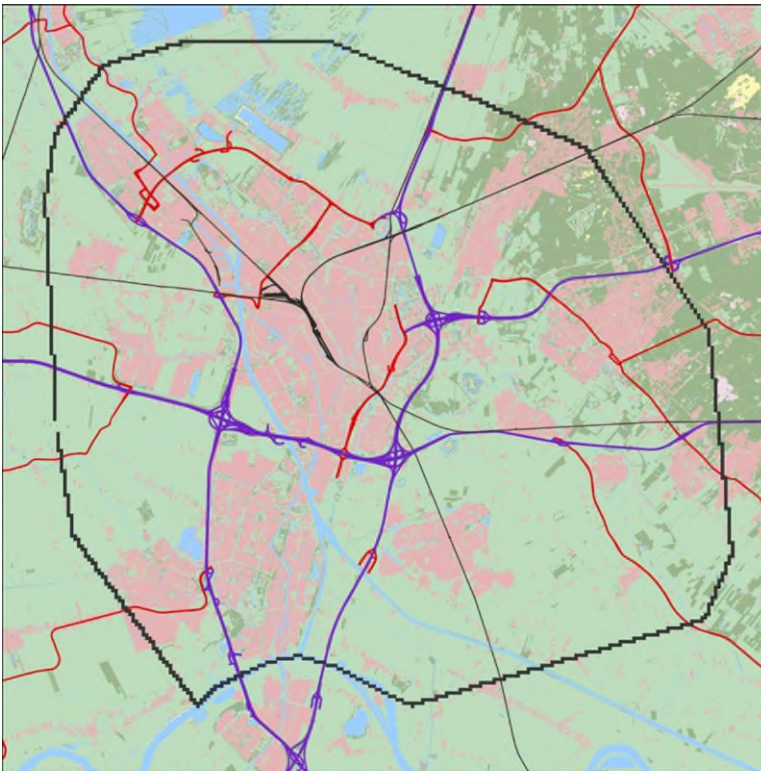
Algemene beschrijving van het geohydrologische systeem

De grondwaterstroming in de nabijheid van de stad Utrecht wordt door enkele fysieke aspecten bepaald. Ten oosten van de stad Utrecht ligt de Utrechtse Heuvelrug, een groot infiltratiegebied. Het gebied ten westen en ten noorden van de stad Utrecht bestaat uit polders waar de oppervlaktewaterpeilen laag zijn en waar daardoor kwel optreedt. Daarnaast liggen er meerdere drinkwaterwinningen rond Utrecht. Op de regionale schaal, stroomt het grondwater van de Utrechtse Heuvelrug onder de stad Utrecht in de richting van de polders ten noorden en ten westen van de stad Utrecht. Dit is schematisch weergegeven in Figuur V-3.



Figuur V-3 Regionale patroon van de grondwaterstroming.

Het modelgebied van het stromingsmodel is weergegeven in figuur V-4..



Figuur V-4 Randen van het grondwatermodel (dikke zwarte lijn); paarse lijnen zijn snelwegen; dunne zwarte lijnen zijn de spoorwegen.

Het model bevat dus slechts een gering deel van de infiltratie- en kwelgebieden, maar hun invloed is gemodelleerd door het opleggen van randvoorwaarden van vaste stijghoogten op de modelrand.

Binnen de stad Utrecht zijn er ook een aantal grondwateronttrekkingen. Deze beïnvloeden de grondwaterstroming ook. Bovendien wordt de grondwaterstand in de toplaag beïnvloed door lokale oppervlaktewateren en drainagesystemen. Van de open

bodemenergiesystemen systemen zijn alleen de gemelde systemen in het centrumgebied van Utrecht meegenomen.

Modelresolutie

Het model heeft een verticale resolutie van 0,5m voor lagen tot -50m t.o.v. NAP, de maximale diepte van de GeoTOP. Hieronder zijn de oorspronkelijke laagindelingen van het REGIS gebruikt voor de resterende geologische eenheden. In totaal bestaat het model uit 126 model lagen.

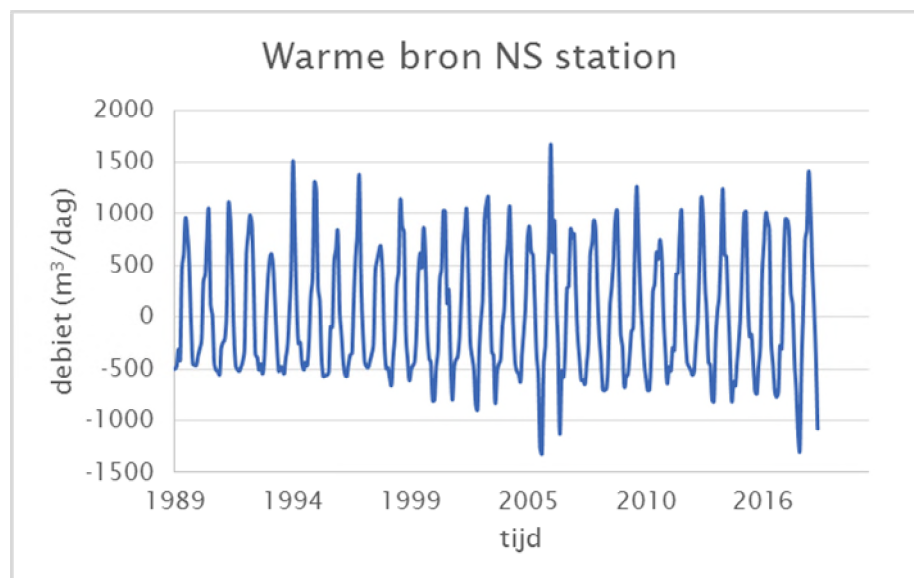
De horizontale modelresolutie is in het interessegebied, het centrum van Utrecht, verkleind naar 10 m. daarbuiten is het resolutie grover. De verticale modelresolutie is gelijk aan de resolutie van de GeoTop tot een diepte va -50 m NAP. Daaronder worden de modellagen grover. De tijdsresolutie in het stromingsmodel is gesteld op 1 maand.

Transport van warmte

Voor het transport van warmte zijn dezelfde parameters aangehouden als de berekeningen in Hoofdstuk 2. De parameters zijn weergegeven in Bijlage II. Voor het warmtetransport is een kleiner horizontaal modeldomein gebruikt dan het stromingsmodel om rekentijd te besparen. Dit modeldomein is weergegeven in Figuur V-4. Op de modelrand is een constante temperatuur als randvoorwaarde opgesteld die gelijk is aan de initiële temperatuur van 13 °C.

Debiten in bronnen van open bodemenergiesysteem

In figuur V-5 is als illustratie de tijdreeks van het debiet van de warme bronnen van het bodemenergiesysteem NS-Station weergegeven.



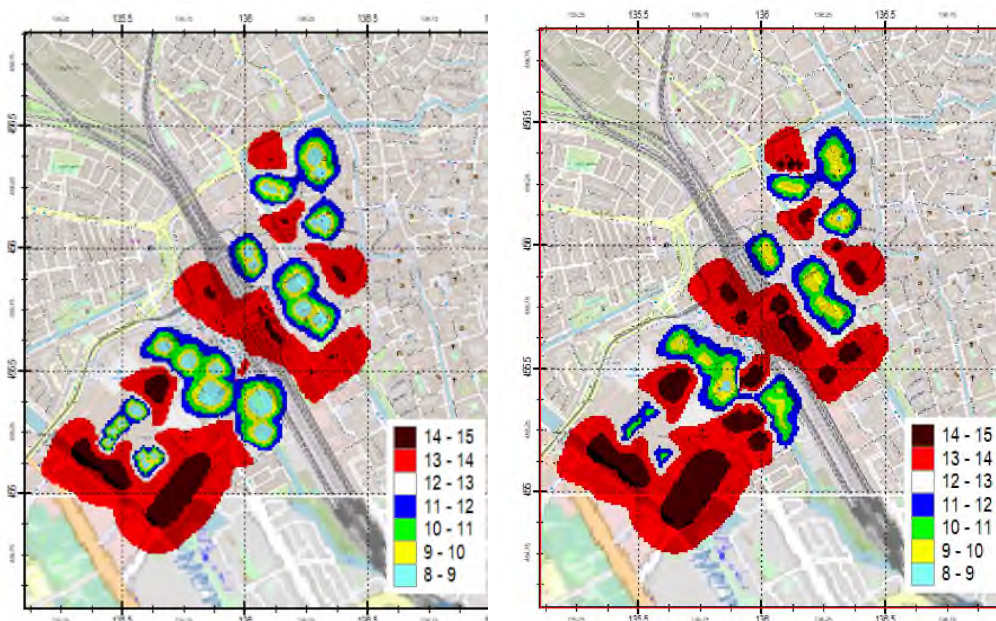
Figuur V-5 Voorbeeld tijdreeks gesimuleerde debiet van 1 bodemenergie bron van het systeem NS-stations; negatief is onttrekking; positief is injectie.

Bijlage VI Resultaten case studie

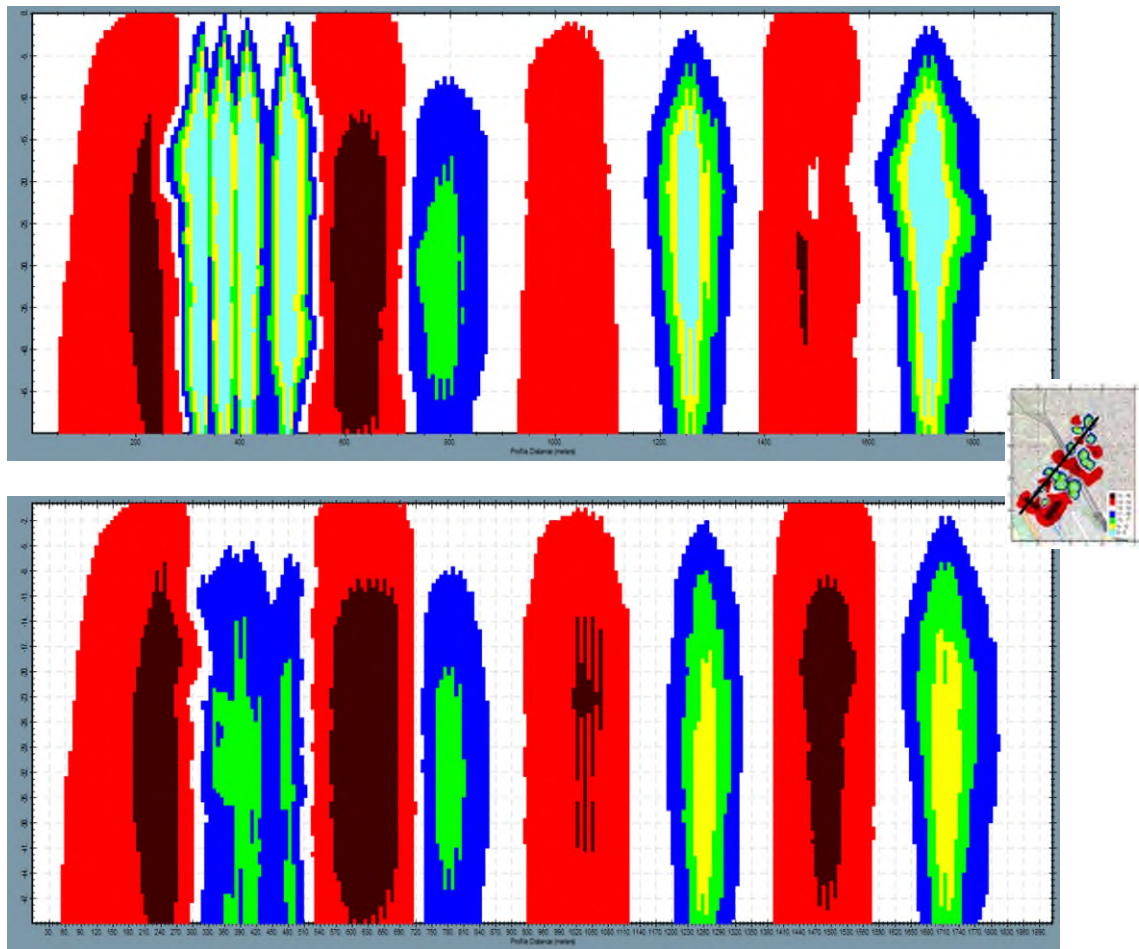
A Resultaten scenario 1

Tabel VI-1 Gemiddelde gemodelleerde onttrekings temperatuur van system Rabobank voor scenario 1

Open bodemenergiesysteem	Retourtemperatuur (°C)	
	koud	warm
Rabobank	8.83	13.48
NS Station	9.27	14.02
Jaarbeurs	10.81	14.32
KTTLKT	9.27	14.06
Muziekpaleis	9.77	14.09
Paardenveld	9.31	13.54
Corio	9.38	14.03

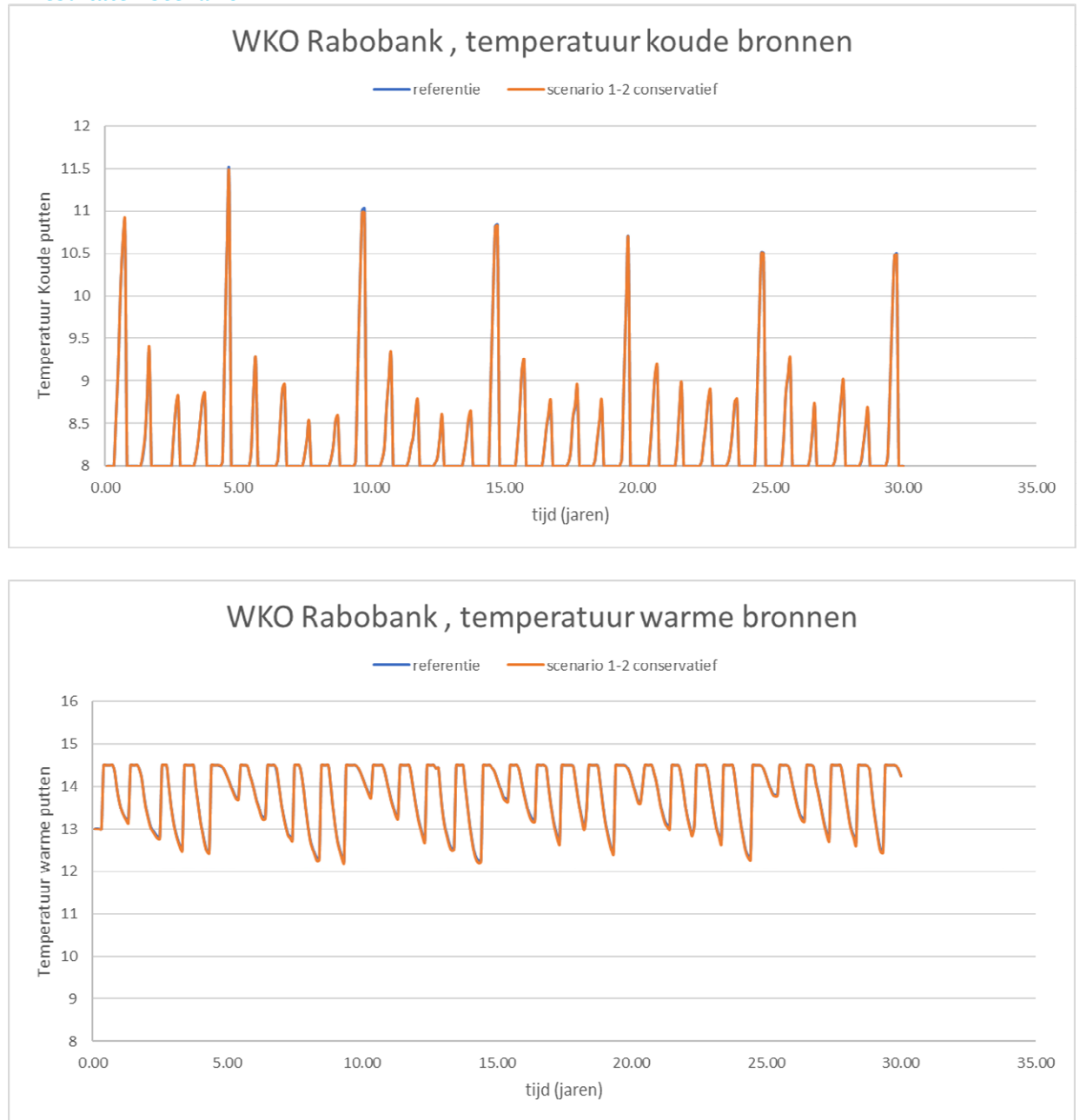


Figuur VI-1 Bovenaanzicht temperatuurverdeling op -30 m NAP; links april en rechts september in het laatste jaar van de simulatie, scenario 1



Figuur VI-2 Dwarsdoorsnede temperatuurverdeling; boven april en onder september in het laatste jaar van de simulatie, scenario 1

B Resultaten scenario 2



Figuur VI-3 Gemiddelde gemodelleerde temperatuur in BODEMENERGIE bronnen Rabobank voor scenario 2 en vergelijking met de huidige situatie (scenario 1)

Bijlage VII Wet- en regelgeving bodemenergie voor invoering Omgevingswet

Onttrekkingen voor open bodemenergiesystemen worden gereguleerd op grond van de Waterwet (22 december 2009), samen met het Waterbesluit en de Waterregeling. Doel van de wet is het voorkomen en daar waar nodig beperken van overstromingen, wateroverlast en waterschaarste. Dit in samenhang met het verbeteren van de chemische en ecologische kwaliteit van watersystemen en de maatschappelijke functies voor deze systemen. Provincies zijn aangewezen als bevoegd gezag voor grondwateronttrekkingen voor open bodemenergiesystemen.

In de **Waterwet** (art 6.4) is opgenomen dat het onttrekken van grondwater voor een open bodemenergiesysteem zonder een watervergunning niet is toegestaan. In dit artikel is tevens aangegeven dat in de provinciale waterverordening een vrijstelling van deze vergunningplicht kan worden opgenomen als de te onttrekken hoeveelheid grondwater niet meer bedraagt dan 10 m³/uur. Sommige provincies hebben deze vrijstelling opgenomen in hun verordening. In art. 2.1 is aangegeven dat de wet zich onder andere richt op het vervullen van maatschappelijke functies door watersystemen. Deze doelstelling kan de grondslag zijn voor het wijzigen van onderbenutte bestaande vergunningen (verkleinen vergund jaaropslagvolume).

In het **Waterbesluit** zijn voor grondwateronttrekkingen instructievoorschriften opgenomen die in een watervergunning moeten worden opgenomen. Uit deze instructievoorschriften blijkt onder andere welke toetsingsgronden door het bevoegd gezag gehanteerd moeten worden bij vergunningverlening. Het Waterbesluit geeft het bevoegd gezag op een aantal punten de mogelijkheid om af te wijken van deze instructievoorschriften. Ook regelt het Waterbesluit dat jaarlijks bij het bevoegd gezag opgave moet worden gedaan van de onttrokken hoeveelheden (art. 6.11 Waterbesluit). In art. 6.11h is opgenomen dat het in werking hebben van een open bodemenergiesysteem niet mag leiden tot zodanige interferentie met een eerder geïnstalleerd bodemenergiesysteem, dat het doelmatig functioneren van dit systeem kan worden geschaad.

De **Waterregeling** bevat de indieningsvereisten voor de aanvraag van een watervergunning. Dit zijn onder andere een beschrijving van het doel van de onttrekking en locatie specifieke zaken als de bronlocaties, diepten, onttrekkingshoeveelheden, e.d.. Tevens zijn in art. 6.29 Waterregeling specifiek voor bodemenergiesystemen extra gegevens opgenomen die verstrekt moeten worden bij de aanvraag, zoals de kwaliteit en temperatuur van het terug te brengen water en het energierendement (Seasonal Performance Factor, SPF).

In juli 2013 is het **Wijzigingsbesluit Bodemenergie** (WBBE) in werking getreden. Het wijzigingsbesluit voert wijzigingen door in bestaande wet- en regelgeving, onder andere bovengenoemde. Hiermee zijn onder andere de tot dan toe nog uiteenlopende provinciale voorschriften voor energieopslagsystemen geüniformeerd. Ook zijn door het

wijzigingsbesluit de gesloten bodemenergiesystemen gereguleerd. Hiermee wordt een gelijk speelveld gecreëerd voor open en gesloten bodemenergiesystemen. Daarnaast stelt het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen regels over het installeren en in werking hebben van bodemenergiesystemen.

Met het wijzigingsbesluit is ook de mogelijkheid ontstaan tot het aanwijzen van **interferentiegebieden**. Interferentiegebieden dienen ter bevordering van het doelmatig gebruik van bodemenergie in drukke gebieden met een (verwachte) hoge energievraag (Besluit omgevingsrecht, art. 2.2b). Het initiatief voor het aanwijzen van interferentiegebieden ligt bij de gemeente. Ook de provincie kan bij uitblijven van gemeentelijke initiatieven of bij gemeentegrensoverschrijdende gebieden interferentiegebieden aanwijzen, wanneer zij denkt dat hier bevordering van doelmatig gebruik van bodemenergie wenselijk is. Het directe gevolg van een interferentiegebied is alleen dat voor gesloten bodemenergiesystemen een lichte vergunningplicht (OBM, omgevingsvergunning beperkte milieutoets) geldt in plaats van een meldingsplicht. Om daadwerkelijk te sturen op doelmatig gebruik, kan een bodemenergieplan, ook wel masterplan genoemd, worden opgesteld. Hiermee kan het gebruik van de ondergrond voor bodemenergie worden geoptimaliseerd, terwijl interferentie tussen gesloten en/of open bodemenergiesystemen zoveel mogelijk wordt voorkomen.