



Verantwoorde uitbouw van ondiepe geothermie in Vlaanderen

Verantwoorde uitbouw van ondiepe geothermie in Vlaanderen

Dit onderzoek verzamelt kennis en formuleert beleidsaanbevelingen om de grootschalige implementatie van ondiepe geothermische systemen in Vlaanderen te optimaliseren. Het ondersteunt daarbij het Vlaamse omgevingsbeleid en het energie- en klimaatbeleid.

De studie behandelt drie kernaspecten. Ten eerste wordt de thermische geleidbaarheid van de Vlaamse ondergrond gekarakteriseerd. Hiertoe wordt een uitgebreide dataset opgesteld en worden meetgegevens en literatuur gedetailleerd geanalyseerd. Het resultaat van dit hoofdstuk zijn ruimtelijke kaartlagen van de gemiddelde thermische geleidbaarheid van de ondergrond in Vlaanderen.

Ten tweede wordt de impact van een hoge dichtheid aan geothermische systemen onderzocht, met aandacht voor interferentie en risico's voor de ecosystemendiensten die de ondergrond biedt. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van literatuurgegevens, praktijkvoorbeelden, ruimtelijke studies en analytische en numerieke modelleringen.

Ten derde wordt de implementatie van collectieve geothermische systemen in Vlaanderen geëvalueerd aan de hand van vijf casestudies, waarbij technische, financiële, organisatorische en juridische randvoorwaarden worden geformuleerd. Ook dit onderdeel bevat een ruimtelijke analyse, die focust op het potentieel van onbebouwde ruimte in Vlaanderen om bepaalde gebieden te voorzien van geothermische warmte. Voor elk van de onderwerpen worden een aantal concrete beleidsaanbevelingen geformuleerd.

COLOFON

Verantwoordelijke uitgever

Toon Denys
Departement Omgeving
Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussel
www.omgevingvlaanderen.be

Een uitgave van het Departement Omgeving, Afdeling VPO
VPO.omgeving@vlaanderen.be

Auteurs

Katrijn Dirix, Helga Ferket, Virginie Harcouët-Menou, Hans Hoes, Johan Matthijs, Gert Moermans, Anneloes van Noordt, Jente Pauwels, Justin Pogacnik, Els Verachtert, Jasper Verhaegen

Publicatiedatum

25/04/2025

Depotnummer

D/2025/3241/112

Wijze van citeren

Dirix, K., Ferket, H., Harcouët-Menou, V., Hoes, H., Matthijs, J., Moermans, G., van Noordt, A., Pauwels, J., Pogacnik, J., Verachtert, E. & Verhaegen, J. (2025). Verantwoorde uitbouw van ondiepe geothermie in Vlaanderen. Rapport in opdracht van de Vlaamse overheid, Departement Omgeving. 158p.

PARTNERS



MANAGEMENTSAMENVATTING

Deze studie kadert enerzijds binnen het Vlaams omgevingsbeleid dat de cruciale rol die de Vlaamse ondergrond kan spelen voor diverse ecosysteemdiensten wil versterken en het bestaande ruimtebeslag beter wil benutten door het ruimtelijk rendement te verhogen. Vlaanderen wil beter zicht krijgen op het ondergrondse potentieel en er efficiënt gebruik van maken. Door geothermie te verweven in het huidige bebouwde weefsel kan dezelfde ruimte meervoudig worden gebruikt. Bovendien dragen hogere (woon)dichtheden bij aan de rendabiliteit van warmtenetten. Warmte is een belangrijk aandachtspunt omdat Vlaanderen daaruit veel duurzame energiewinst kan boeken. Anderzijds past dit project binnen het Vlaamse energie- en klimaatbeleid, meerbepaald het 'Warmteplan 2025'. Dit beleid draagt bij aan de realisatie van de ambitieuze Europese doelstellingen voor klimaat en energie en de transitie naar een koolstofarme samenleving in 2050. Een onderdeel hiervan is het stimuleren van ondiepe geothermie als duurzame (collectieve) energiebron. De stijgende toepassing van deze technologie vereist echter een doordacht beleid, om een efficiënte werking van de systemen te kunnen garanderen, om de impact op de ondergrond te beperken, en om deze groene warmte op een rechtvaardige manier ter beschikking te stellen voor elke Vlaming.

Voorliggende studie richt zich op het **verzamelen van kennis en het formuleren van beleidsaanbevelingen om de duurzame uitbouw van ondiepe geothermie in Vlaanderen te bevorderen**. Ze focust zich op 'ondiepe geothermie' (< -500m TAW). Zowel open- als gesloten geothermische systemen worden in beschouwing genomen, met een nadruk op gesloten systemen.

Het rapport is gestructureerd in drie kernonderdelen:

1. **Thermische geleidbaarheid van de Vlaamse ondergrond:** we maken een dataset op van thermische responsmetingen en voeren een uitgebreide analyse uit van beschikbare meetgegevens en literatuurbedata. Op basis hiervan stellen we karakteristieke thermische geleidbaarheidswaarden voor de stratigrafische eenheden in de Vlaamse ondergrond op. Daarnaast worden ruimtelijke kaarten opgemaakt van de gemiddelde thermische geleidbaarheid.
We besluiten dat een zuiver mathematische afleiding van gemiddelde thermische geleidbaarheden op basis van data uit thermische responstesten geen realistische resultaten oplevert. We stellen een methodologie op die zich baseert op literatuurgegevens die worden getoetst aan - en bijgestuurd door- meetgegevens.
2. **Impact van een hoge dichtheid aan geothermische systemen:** Op basis van literatuurgegevens, concrete praktijkvoorbeelden, ruimtelijke studies en modelleringen onderzoeken we (i) de ecologische impact van geothermie op de ondergrond en de ecosysteemdiensten die de ondergrond levert en (ii) de risico's op interferentie tussen geothermische systemen. We concluderen dat de risico's voor de ondergrond vooral gevormd worden door het perforeren van ondoorlaatbare lagen die belangrijke grondwaterpakketten van elkaar scheiden, het achterblijven van materiaal in de bodem en de lekkage van koelvloeistof. Het risico op interferentie wordt bepaald door verschillende invloedsfactoren (systeemgrootte, onderlinge afstand, grondwaterstroming en onevenwicht van belasting). Algemeen gezien kan gesteld worden dat interferentie tussen kleinschalige gesloten systemen (< 40-50 kW) onderling enkel van belang is bij een tussenafstand van minder dan ~10-15m. De effecten van gesloten systemen op open systemen zijn meestal verwaarloosbaar. De impact van open systemen op gesloten systemen kan wel significant zijn, ook in positieve zin. Het samenspel tussen de verschillende invloedsfactoren bepaalt hier de grootteorde en de aard

van de interferentie. Hetzelfde geldt voor interferentie tussen open systemen onderling. Op een meer grootschalig niveau illustreert deze interferentieanalyse ook hoe een warmtenet op stadsniveau in dichtbebouwde gebieden kan bijdragen aan een eerlijke verdeling van de geothermische energie.

3. **Implementatie van collectieve geothermische systemen in Vlaanderen:** In dit hoofdstuk bespreken we vijf concrete cases in Vlaanderen waar gebruik gemaakt wordt van geothermische bronnen in een collectief systeem. Vervolgens gebruiken we deze inzichten om een kader op te stellen dat een aantal technische, financiële, organisatorische en juridische randvoorwaarden voor het succesvol uitrollen van een collectief warmtesysteem specificeert. We voegen ook een ruimtelijke analyse toe, die focust op het potentieel van onbebouwde ruimte in Vlaanderen om bepaalde gebieden te voorzien van geothermische warmte.

We identificeren een aantal organisatorische en juridische complexiteiten die de ontwikkeling van geothermische systemen bemoeilijken, maar besluiten dat de uitrol van collectieve systemen in Vlaanderen in de praktijk voornamelijk beperkt wordt door het ontbreken van een goede businesscase. Deze businesscase verbetert aanzienlijk wanneer:

- Er gewerkt wordt in een nieuwbouwcontext met een hoge woningdichtheid: deze gebouwen hebben een lagere warmtevraag en de rendabiliteit wordt berekend ten opzichte van individuele elektrische oplossingen, in plaats van ten opzichte van gas.
- Er een slimme functiemix is tussen gebouwen en een combinatie is van verschillende bronnen, waarbij er maximaal warmte uitgewisseld wordt
- Er een grote afnemer is die garanties voor afname kan bieden
- Er gebruik gemaakt kan worden van subsidies

Uit de verschillende onderdelen komen ook een aantal concrete **beleidsaanbevelingen** naar voren:

- Met betrekking tot het ontwikkelen van een goede dataset aan **thermische geleidbaarheid** dient de in dit project opgestelde databank aangevuld en voorzien te worden van zo veel mogelijk meet- en ondergrondgegevens, waaronder tijdsduur van opmeten, duur van de proef, grondwaterstand, boordiepte en beschrijving van de lithologie.
- Met betrekking tot de impact van een **hoge densiteit aan geothermische systemen** pleiten we sterk voor een meer gedetailleerde publieke ontsluiting van relevante gegevens, in het bijzonder voor grotere gesloten systemen. Onder relevante gegevens verstaan we onder meer de exacte locatie van alle boorputten, het vermogen van de installatie, het bodemzijdig belastingsprofiel, de diepte van de sondes en het type sonde. Daarnaast bevelen we aan om, naar analogie van het Nederlandse voorbeeld, concrete rekenregels, tools en beslisbomen te ontwikkelen én publiek aan te bieden. Deze tools zullen vergunningsverleners en ontwikkelaars toelaten om inzicht te krijgen in het risico op – en de grootteorde van – interferentie tussen ondiepe geothermische systemen. Tenslotte dient het beleid richtlijnen aan te bieden met betrekking tot het toegestane thermische (on)evenwicht van ondiepe geothermische systemen. Hierbij dient een evenwicht gezocht te worden tussen het voorkomen van negatieve interferentie en het negatief beïnvloeden van de rendabiliteit van de systemen door het opleggen van te strenge eisen rond thermische balans.
- Met betrekking tot **collectieve geothermische systemen** besluiten we dat een hervorming van de Call Groene Warmte vereist is om broodnodige subsidies toe te kennen aan ambiërende collectieve projecten. Een sterke stimulans voor een bredere uitrol van ondiepe geothermie

pagina 6 van 158

INHOUDSTAFEL

1	Inleiding	9
1.1	Situering van de opdracht	9
1.2	Scope	9
1.3	Leeswijzer	10
2	UPDATE VAN DE DATASET THERMISCHE GELEIDBAARHEID	11
2.1	Inventarisatie, kwaliteitscontrole en harmonisatie data thermische geleidbaarheid	11
2.2	Afleiden thermische geleidbaarheid per stratigrafische eenheid	13
2.2.1	Algemeen	13
2.2.2	Analyse data	14
2.2.3	Afleiden thermische geleidbaarheid per lithostratigrafische eenheid	18
2.2.4	Conclusie	26
2.2.5	Referenties / literatuur	29
2.3	Updaten thermische geleidbaarheidskaarten voor Vlaanderen	33
2.3.1	Methodologie	33
2.3.2	Resultaat	34
2.3.3	Vergelijking met voorgaande studies	35
3	IMPACT VAN EEN HOGE DENSITEIT AAN GEOTHERMISCHE SYSTEMEN	37
3.1	Inleiding	37
3.2	Impact op de ondergrond en haar ecosysteemdiensten	37
3.2.1	Temperatuurseffecten bij open en gesloten systemen	38
3.2.2	Effecten van mixing bij open systemen	39
3.2.3	Wijzigingen in het hydrologisch systeem bij open systemen	40
3.2.4	Risico's van dwarsstroming tussen aquifers bij open en gesloten systemen	40
3.2.5	Risico's van lekkage van koelvloeistof bij gesloten systemen	40
3.2.6	Achterblijvend materiaal in de bodem	41
3.2.7	Regelgeving in Vlaanderen	42
3.2.8	Ondiepe geothermische systemen en vervuiling in Vlaanderen.	43
3.2.9	Conclusie: Impact van ondiepe geothermie op de ecosysteemdiensten (ESD) van de ondergrond	45
3.3	Impact op de efficiënte werking van geothermische systemen	46
3.3.1	Overzicht geothermische systemen	47
3.3.2	Parameters die het interferentierisico beïnvloeden	49
3.3.3	Ervaringen uit praktijk cases	51
3.3.4	Modelleren van interferentie bij gesloten systemen: analytische benadering	58
3.3.5	Interferentie bij open en gesloten systemen: numerieke benadering	64
3.3.6	Interferentie tussen geothermische systemen: wetgeving in Nederland	78
3.4	Ruimtelijke diversifiëring in Vlaanderen: waar worden problemen verwacht als gevolg van een hoge dichtheid aan geothermiesystemen?	80
3.4.1	Warmtevraagdichtheid	80
3.4.2	Ruimtelijke randvoorwaarden	81
3.4.3	Risicozones hoge dichtheid	83
3.5	Conclusies en Beleidsaanbevelingen	85
3.5.1	Advies rond informatievergaring	86
3.5.2	Advies aangaande interferentieproblematiek	89
4	COLLECTIEVE GEOTHERMIESYSTEMEN IN VLAANDEREN	94
4.1	Definities en Scope	94
4.1.1	Wat is een collectief geothermisch systeem?	94
4.1.2	Kernelementen collectieve systemen	95
4.1.3	Variaties aan collectieve systemen	96
4.1.4	Collectieve systemen en warmtenetten	97
4.1.5	Collectief versus individueel	99
4.2	Concrete cases in Vlaanderen	99
4.2.1	CollecThor (Genk)	100
4.2.2	Keerdok-site (Mechelen)	103
4.2.3	Cordium Hasselt: Broekerwinning (Hasselt)	104

1 INLEIDING

1.1 SITUERING VAN DE OPDRACHT

Deze studie kadert enerzijds binnen de uitwerking van een Vlaams energie- en klimaatbeleid (Vea, 2019), en meer concreet in het Vlaamse 'Warmteplan 2025'. Dit beleid moet bijdragen tot de realisatie van de ambitieuze Europese doelstellingen voor klimaat en energie in 2030 en de transitie naar een koolstofarme samenleving in 2050. Eén van de manieren waarop Vlaanderen deze groene energietransitie wil realiseren is het stimuleren van het toepassen van (geothermische) warmtepompen. Het voorbije decennium steeg het aantal ondiepe open en gesloten geothermische systemen in Vlaanderen gestaag, en de sector kreeg een sterke impuls door de volatiele prijzen van gas- en elektriciteit sinds begin 2022.

Met de toenemende toepassing van deze systemen in Vlaanderen stijgt ook de nood aan beleid om het ondergrondse potentieel op een duurzame manier te benutten. Deze studie wordt daarom gestuurd vanuit het Departement Omgeving, dat een Vlaams omgevingsbeleid uitwerkt. Binnen dit omgevingsbeleid wordt, onder andere, onderzocht hoe het ruimtelijk rendement kan verhoogd worden door het bestaande ruimtebeslag beter te benutten en welke rol de Vlaamse ondergrond hierbij kan spelen. Door geothermie te verweven in het huidige bebouwde weefsel kan dezelfde ruimte meervoudig worden gebruikt. Bovendien dragen hogere (woon)dichtheden bij aan de rendabiliteit van warmtenetten.

Een doordacht kader voor de verdere uitbouw van ondiepe geothermie in Vlaanderen is belangrijk. Immers, een ondoordachte positionering en dimensionering van deze systemen kan aanleiding geven tot negatieve interferenties, en ander gebruik van de ondergrond belemmeren. Vooral voor gesloten systemen is de huidige regelgeving beperkt, waardoor er op dit moment weinig inzicht is in de potentiële interacties tussen verschillende systemen, en hun effecten op de ondergrond.

In de praktijk worden oplossingen die gebruik maken van geothermie als warmtebron nog zeer vaak ingezet in individuele projecten, terwijl er zowel beleidsmatig (gebruikers zonder de nodige buitenruimte toegang geven tot groene warmte), als technisch (efficiëntere verdeling van energie) argumenten bestaan voor het delen van de geothermisch opgewekte warmte via collectieve energiesystemen. Gezien de hoge kosten die investeringen in geothermische oplossingen met zich meebrengen is het de taak van de overheid om voldoende ondersteuning te voorzien, o.a. in de vorm van onderzoek dat de uitrol van deze technologie verder kan ondersteunen.

Met voorliggende studie wil VPO enerzijds bijdragen aan een verdere kennisopbouw, en anderzijds een aantal concrete beleidsaanbevelingen aanrijken die de verdere uitbouw van ondiepe geothermische systemen op een verantwoorde manier kan stimuleren.

1.2 SCOPE

Voorliggende studie focust zich expliciet op ‘ondiepe’ geothermie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt met diepe geothermie (dieper dan -500m TAW) zoals bedoeld in het decreet diepe ondergrond. Zowel open (koude-warmteopslag, KWO) als gesloten (boorgat- energieopslag, BEO) systemen worden in beschouwing genomen, maar het zwaartepunt van verschillende van de analyses ligt op gesloten systemen. Analyses rond collectieve geothermische systemen zijn niet los te zien van de bredere

1.3 LEESWIJZER

Hoofdstuk 1 focust op de thermische geleidbaarheidsdata in Vlaanderen. Hierbij inventariseren- en analyseren we in eerste instantie de beschikbare puntgegevens rond thermische conductiviteit in Vlaanderen. Een uitgebreide analyse van deze dataset laat vervolgens toe om per stratigrafische eenheid van het G3Dv3-model (Deckers et al., 2019) een thermische geleidbaarheidswaarde op te stellen. Tenslotte wordt deze informatie gecombineerd in een aantal thermische geleidbaarheidskaarten voor Vlaanderen.

In **hoofdstuk 3** worden de voordelen van collectieve geothermische systemen ten opzichte van individuele oplossingen onder de loep genomen. Hierbij worden in eerste instantie de collectieve geothermische systemen in het bredere kader van warmtenetten geplaatst. Vervolgens worden 5 concrete cases in Vlaanderen waar gebruik gemaakt wordt van geothermische bronnen in een collectief systeem besproken en vergeleken. Deze inzichten worden vervolgens gebruikt om een grootschalig kader op te stellen dat een aantal technische, financiële, organisatorische en juridische randvoorwaarden voor het succesvol uitrollen van een collectief energiesysteem specificeert. Ook aan dit hoofdstuk wordt een ruimtelijke analyse gekoppeld, welke in dit geval focust op het potentieel van onbebouwde ruimte in Vlaanderen om bepaalde gebieden te voorzien van geothermische warmte. Tenslotte worden er een aantal concrete beleidsaanbevelingen geformuleerd.



- Impact op de ondergrond en haar ecosystemendiensten

- Impact op de efficiënte werking van geothermische systemen



Definities en scope



Figuur 1-1: Structuur van voorliggend rapport.

2 UPDATE VAN DE DATASET THERMISCHE GELEIDBAARHEID

2.1 INVENTARISATIE, KWALITEITSCONTROLE EN HARMONISATIE DATA THERMISCHE GELEIDBAARHEID

Een eerste stap naar het creëren van een dataset voor de thermische geleidbaarheid (λ uitgedrukt in W/mK) is het verzamelen van alle beschikbare data. Hiervoor werd er gezocht in zowel het papieren als digitaal archief van Terra Energy en VITO. Bovendien werd de vraag voor extra data ook gesteld aan de stuurgroep. Op deze manier werden nog 25 (E)TRT-metingen toegevoegd, waarvan 22 TRT-metingen afkomstig zijn van het SmartGeotherm project (Van Lysebetten et al., 2013). De verzamelde data werden nagekeken op volledigheid en ondergingen een kwaliteitscontrole. Aangezien de thermische geleidbaarheid gedeeltelijk afhankelijk is van andere parameters die geanalyseerd worden tijdens een thermische respons test, werden ook deze mee opgenomen in de dataset. Deze parameters nl. de boorgatweerstand (R_b uitgedrukt in K/Wm⁻¹), de ongestoorde bodemtemperatuur (T_0 uitgedrukt in °C), de globale specifieke warmtecapaciteit (C uitgedrukt in MJ/m³K) en de diepte van de sonde (uitgedrukt in m-mv) waren niet voor elke test voorhanden. Desalniettemin kan er voor bepaalde testen een waarde geschat worden voor enkele van deze parameters op basis van

extrapolatie. In onderstaande tabel wordt er samengevat hoeveel data er verzameld kon worden voor elke parameter.

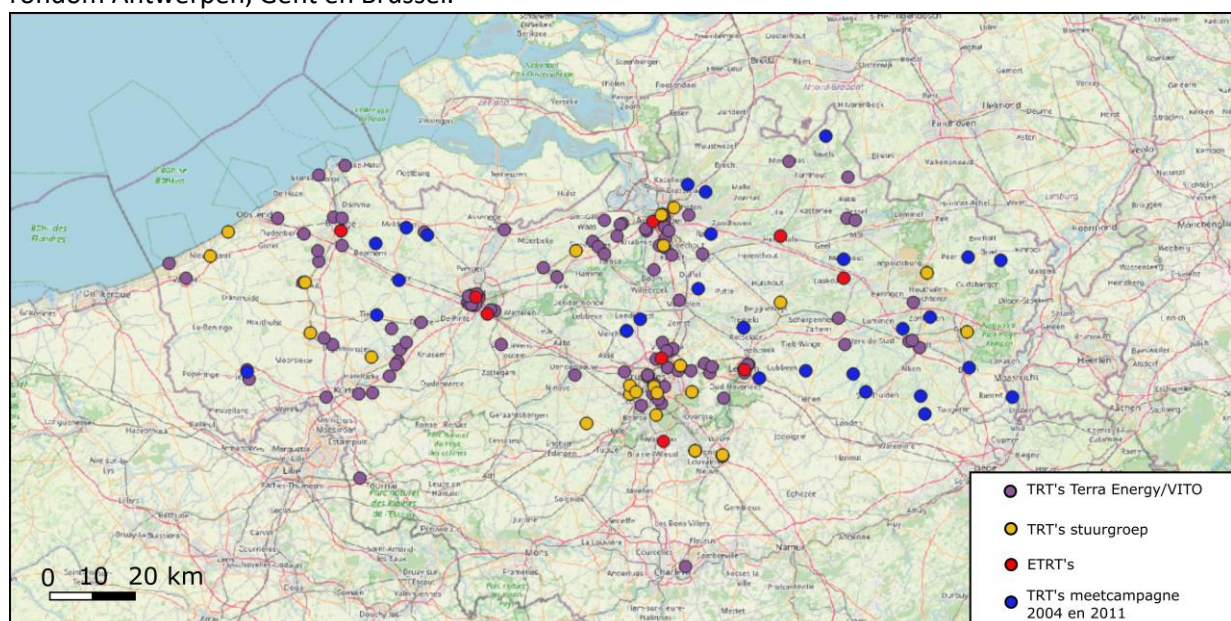
Parameter	Symbool	Eenheid	Aantal metingen
Thermische geleidbaarheid	λ	W/mK	174
Boorgatweerstand	Rb	K/Wm ⁻¹	138
Ongestoorde bodemtemperatuur	T ₀	°C	159
Globale specifieke warmtecapaciteit	C	MJ/m ³ K	93
Lengte van de sonde	-	m	174

Tabel 2-1: Aantal datapunten voor verschillende metingen in de dataset thermische geleidbaarheid

Omdat de thermische geleidbaarheid afhankelijk is van de opbouw van de bodem, werden de boorbeschrijvingen als een extra bijlage mee opgenomen in de dataset. Dit kan naast het geologische 3D model (G3Dv3) van Vlaanderen gelegd worden om de exacte dieptes van de verschillende geologische eenheden te bepalen. In totaal werd er een dataset gecreëerd van 174 testen. Hiervan zijn er 25 Enhanced Thermal Respons testen (ETRT's) uitgevoerd. Twee van deze 25 ETRT's zijn echter onbetrouwbaar omwille van meetproblemen en vermoedelijk verhoogde grondwaterstroming gedurende de test. Hierbij wordt alleen de finale λ -waarde over de gehele diepte van de sonde weerhouden (niet bij verhoogde grondwaterstroming).

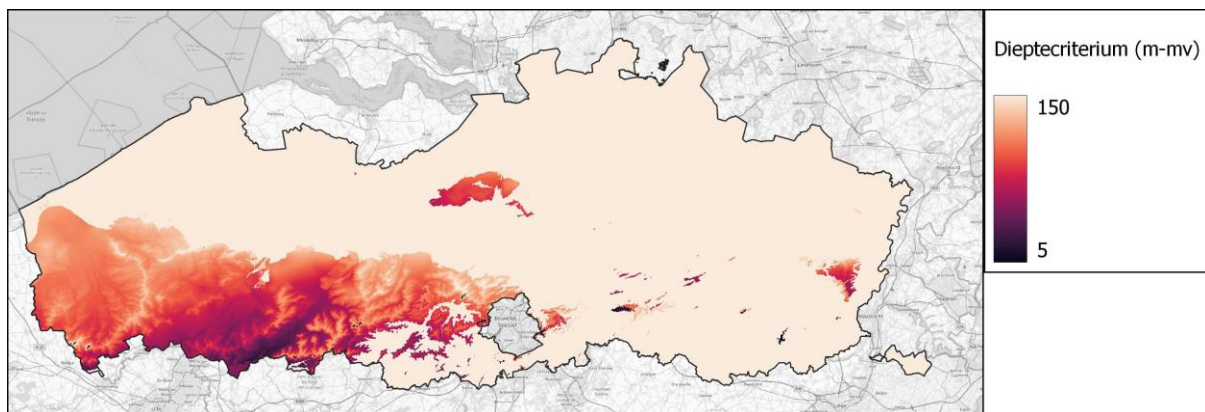
In 2004 werd er reeds een meetcampagne opgestart om de nodige parameters voor het ontwerp van een geschiktheidskaart in Vlaanderen te bepalen (Hoes & Gysen, 2004). Deze meetcampagne werd uitgevoerd door VITO en bevat data van 15 TRT's waarbij er telkens een veel voorkomende geologische formatie werd gemeten. In 2011 werd er een extra meetcampagne toegevoegd onder leiding van Terra Energy en VITO (Robeyn & Hoes, 2011). Hierbij werden nog 10 extra TRT's uitgevoerd op andere geologische formaties in Vlaanderen. Aangezien deze λ -waarde bepaald werd over een bodempakket dat voornamelijk uit één en dezelfde formatie bestaat, zijn deze resultaten van cruciaal belang om mee op te nemen in de dataset.

In onderstaande figuur worden de locaties van alle testen weergegeven (Figuur 1). Hierbij kan gezien worden dat er een relatief goede spreiding is in Vlaanderen met een hogere dichtheid van testen rondom Antwerpen, Gent en Brussel.



Figuur 2-1: Geografisch overzicht van alle (E)TRT's die opgenomen werden in de dataset.

“manuele” inschatting van het grondwaterpeil te gebeuren op basis van de beschikbare data. Voor de locaties ter hoogte van kanalen en de waterlopen werd er het vermoedelijk gemiddelde grondwaterpeil gereconstrueerd op basis van een triangulatie tussen de dichtstbij gelegen cellen uit de Sumaqua-kaart. Voor de locaties binnen het Brussels Hoofdstedelijk Gewest werd er gekeken naar enerzijds de maaiveldhoogte en anderzijds de hoogte waarop van de dichtstbij gelegen waterlopen zich bevinden. Door de extractie uit de Sumaqua-kaart wordt er ook al een stap gezet naar een gebiedsdekkende kaart met de gemiddelde thermisch geleidbaarheid voor Vlaanderen. Tenslotte wordt het dieptecriterium voor verticale boringen rubriek 55.1 toegevoegd met het oog op het opstellen van de voornoemde kaart. Hiervoor wordt de kaart gebruikt die opgesteld werd door de Vlaamse Milieumaatschappij (2014) en aangeleverd wordt langs de web-services van Databank Ondergrond Vlaanderen.



Figuur 2-3: Dieptecriterium in Vlaanderen (VMM, 2014). Geothermische boringen dieper dan het dieptecriterium zijn vergunningsplichtig.

In totaal bestaat het G3Dv3 uit 126 lithostratigrafische eenheden en/of combinaties van lithostratigrafische eenheden (bijvoorbeeld formaties bestaande uit leden). Wanneer we het model op het meest gedetailleerd mogelijke niveau wensen op te bouwen hebben we 94 van deze 126 eenheden nodig. Voor deze 94 eenheden wordt er getracht een gemiddelde thermische geleidbaarheid af te leiden uit de dataset met TRT-metingen. De thermische geleidbaarheid van een eenheid verandert naargelang een eenheid “droog” is of water bevat. Onder het grondwaterpeil zijn alle eenheden volledig met water verzadigd. Naar boven toe neemt de hoeveelheid water aanwezig in een eenheid af en neemt de hoeveelheid lucht toe. De juiste verdeling tussen water en lucht varieert door de tijd en is bijgevolg niet gekend. Voor de verdere uitwerking van het afleiden van de thermische geleidbaarheid wordt er daarom van uitgegaan dat elke eenheid boven de gemiddelde grondwatertafel “droog” is. Voor elke lithostratigrafische eenheid dient er bijgevolg een “natte” en een “droge” thermische geleidbaarheid afgeleid te worden uit de TRT-metingen¹.

2.2.2 Analyse data

2.2.2.1 Databeschikbaarheid per stratigrafie

Een eerste stap naar het afleiden van de thermische geleidbaarheid is een analyse van de dataset aan TRT-metingen. Bij de analyse wordt er abstractie gemaakt van de opdeling in een “natte” en een “droge” thermische geleidbaarheid. Van de 94 lithostratigrafische eenheden worden er 71 door de TRT-metingen doorboord. De 23 niet aangeboorde eenheden bevinden zich stratigrafisch gezien voornamelijk in het Paleozoïcum, het Mesozoïcum en het vroeg Paleogeen. Verder zijn er enkele dunne eenheden met een beperkte verbreiding (Leden van de Formatie van Borgloon) en locatie

¹ Hierbij dient te worden opgemerkt dat de grondwaterstand niet opgemeten werd bij het uitvoeren van de metingen.

De grote spreiding en de negatieve waarden kunnen in eerste instantie een gevolg zijn van het toekennen van diktes aan de verschillende lithostratigrafische eenheden in de TRT-metingen op basis van het geologisch 3D-model G3Dv3. Er is bijgevolg geen rechtstreekse relatie tussen de TRT-metingen en de dikte van elke eenheid in de bijhorende boringen. Verschillen in dikte en/of het mogelijk aanwezig of afwezig zijn van eenheden in de TRT-metingen in vergelijking tot hetgeen uit het G3Dv3 geëxtraheerd wordt, kunnen bijdragen tot de vastgestelde spreiding en negatieve waarden. Verderop wordt er getest wat de invloed is van dikteveranderingen in lithostratigrafische eenheden op de totale lambda-waarde vastgesteld in de TRT-metingen.

2.2.2.3 Analyse ETRT-metingen

Zo liggen de thermische geleidbaarheden uit de ETRT-metingen voor het zandige Lid van Hoegaarden onder de minimale thermische geleidbaarheid van de Formatie van Hannut uit het rapport van Robeyn

031603PA_KoOr

thermische geleidbaarheid (W/lmk)

diepte (m)

$y = 17,975x + 59,747$
 $R^2 = 0,0112$

In het geval van ETRT-metingen wordt de lambda-waarde van een lithostratigrafische eenheid op diepte in situ gemeten en dient deze niet berekend te worden aan de hand van de dikte van elke aangeboorde lithostratigrafische eenheid, zoals bij een gewone TRT-meting. De spreiding van de lambda-waarde voor een welbepaalde lithostratigrafische eenheid kan dan ook niet te wijten zijn aan een verschil in dikte of het mogelijke aan- of afwezig zijn van de eenheid in vergelijking tot wat er uit het G3Dv3.1 geëxtraheerd wordt. Ook hier dringt zich de mogelijkheid op van een spreiding aan thermische geleidbaarheid per lithostratigrafische eenheid als gevolg van faciesverschillen. Sommige

- Uiteindelijk blijven er zo 161 van de 176 waarnemingen uit de oorspronkelijke dataset behouden.

Aangezien een mathematische werkwijze tot een grote spreiding in resultaten leidt, wat thermische geleidbaarheid per lithostratigrafische eenheden betreft (punt 1.2.2.1), kan het geheel omschreven worden als een optimalisatie-problematiek. Een statistische aanpak, met het gebruik van regressie, lijkt dan ook de meest voor de hand liggende methodiek om tot realistische oplossingen te komen. Bij regressie wordt er aan de hand van de kleinstekwadratenmethode gezocht naar de best passende lambda-waarde voor elke lithostratigrafische eenheid, waarbij het totaal van de kwadratische afwijkingen ten opzichte van de werkelijke waarde van de TRT-metingen geminimaliseerd wordt. De verschillende regressieproblemen zoals hieronder beschreven werden in Python geïmplementeerd met behulp van het CVXPY pakket.

Vervolgens werd er getest met een “voorwaardelijke” regressie. Verschillende voorwaarden werden opgelegd aan de regressie. Hoe groter het aantal voorwaarden waaraan dient voldaan te worden des te verder de afwijking ten opzichte van het kleinste kwadraten principe. Volgende voorwaarden werden stapsgewijs toegevoegd aan de regressie:

- pagina 19 van 158

Daarom werd de voorwaardelijke regressie getest zonder een opdeling in “droge” en “natte” toestand te maken. Hierbij dient er nog voor 94 van de 172 aparte eenheden een thermische geleidbaarheid bepaald te worden. Het aantal onbekenden wordt bijgevolg bijna gehalveerd. Het probleem van de onrealistische lambda-waarden blijft evenwel aanhouden. Net als in de vorige test nemen de lithostratigrafische eenheden die slechts een enkele maal in de TRT-waarnemingen voorkomen de waarde 0, of 4, of de opgegeven grenswaarden aan overeenkomstig de gestelde voorwaarden. Enerzijds is dit het gevolg van te veel onbekenden en te weinig waarnemingen, anderzijds speelt hier ook de multicollineariteit een belangrijke rol. Bij multicollineariteit is er een relatie tussen 2 of meer variabelen, met andere woorden als er verandering in één variabele optreedt, dan is dit ook het geval voor de andere variabele(n). Multicollineariteit beïnvloedt de berekening van de coëfficiënten in een regressiemodel, aangezien ze tenminste deels overlappen. Hierdoor neemt hun betrouwbaarheid af. De multicollineariteit doet zich voor als gevolg van de stratigrafische opbouw eigen aan de geologie van de ondergrond van het Vlaams Gewest. Met andere woorden, in vele TRT-waarnemingen wordt een gelijkaardige opeenvolging van lithostratigrafische eenheden teruggevonden, waarbij een afname in dikte in een eenheid leidt tot een gelijkaardige toename in dikte in een boven- of onderliggende eenheid. Deze eenheden (variabelen) zijn dus niet volledig onafhankelijk van elkaar.

1. op basis van de standaard lithologische beschrijving van de in het G3Dv3.1 (67 lithoklassen).
2. op basis van een lithologische beschrijving door VITO uitgewerkt in het kader van dit project (41 lithoklassen)

pagina 20 van 158

De regressiemethode levert realistische waarden voor de thermische geleidbaarheid op voor een deel van de lithostratigrafische eenheden, voor een ander deel blijven de lambda-waarden weinig realistisch en blijken de onderlinge verhoudingen niet in orde. Opvallend is hoe meer het aantal onbekenden naar beneden gehaald wordt (lithostratigrafische eenheden > lithoklassen > enkel natte toestand), des te realistischer de bekomen resultaten voor de thermische geleidbaarheid. Dit lijkt erop te wijzen dat de regressiemethode ondermaats presteert omdat er momenteel nog te veel onbekenden en te weinig waarnemingen zijn.

Zoals bij aanvang vermoed, is het niet evident om een set aan lithostratigrafische eenheden met realistische thermische geleidbaarheden uit de dataset aan TRT- en ETRT-metingen te af te leiden. Er dient dan ook een andere werkwijze gezocht te worden om elke gemodelleerde lithostratigrafische eenheid een lambda-waarde toe te kennen.

2.2.3.3 Expert grenzen

Een mogelijke piste om toch realistische lambda-waarden aan elke lithostratigrafische eenheid toe te kennen, is gebaseerd op de thermische geleidbaarheid van mineralen. Op basis van de mineralogie van elke lithostratigrafische eenheid en de thermische geleidbaarheid per mineraal (inclusief lucht en water) wordt een lambda-waarde berekend. De thermische geleidbaarheid per mineraal en de bulk-mineralogie per lithostratigrafische eenheid zijn echter niet steeds gekend. Daarom wordt er met de hierboven voorgestelde lithoklassen (41 op basis van de lithologische beschrijving van VITO) als een tussenstap gewerkt. Deze lithoklassen worden van een lambda-waarde voorzien op basis van literatuur. De rechtstreekse relatie met de dataset aan waarnemingen valt hierbij weg. De gemeten TRT- en ETRT-metingen doen in dit geval enkel dienst als controle, waarbij de lambda-waarden van de lithoklassen kunnen bijgeschaafd worden om tot beter in overeenstemming met de waarnemingen te komen.

Op basis van een 25-tal wetenschappelijke artikels (zie 2.2.8 referenties en literatuur) werd in de literatuur voor elke van de lithoklassen nagegaan wat de thermische geleidbaarheid is in “droge” en “natte” toestand. Hieruit zijn volgende conclusies te trekken:

1. er is niet voor alle lithoklassen een thermische geleidbaarheid gekend.
2. er wordt meestal geen opdeling in “droog” en “nat” gemaakt, zodat niet geweten is voor welke toestand de opgegeven lambda-waarden gelden.
3. er zijn weinig lambda-waarden gekend voor lithoklassen in “droge” toestand, bij vaste of harde gesteenten wordt er zelfs niet over “natte” of “droge” toestand gesproken.
4. de omstandigheden waarin de thermische geleidbaarheid bepaald werd, zijn niet steeds gekend of zijn zeer verschillend per onderzoek.
5. er is een grote spreiding in de opgegeven lambda-waarden per lithoklasse.

Er wordt vermoed dat de grote spreiding aan lambda-waarden voor elke lithoklasse het gevolg is van de verschillende (niet steeds gekende) omstandigheden waaronder en/of de verschillende eigenschappen van het materiaal waarvoor de thermische geleidbaarheid bepaald werd. Zoals opgemerkt in paragraaf 2.2.2.1 is de thermische geleidbaarheid van een materiaal afhankelijk van een hele reeks parameters (porositeit, korrelgrootte, textuur, ...). Zo zal de thermische geleidbaarheid veranderen met de densiteit van het materiaal. De densiteit van een materiaal verandert op zijn beurt met de diepte als gevolg van compactie. Het in de poriën aanwezige water speelt ook een belangrijke rol bij het bepalen van de thermische geleidbaarheid van een materiaal. In de meeste artikels wordt niet opgegeven wat het watergehalte is in “droge” en “natte” toestand, met andere woorden: gaat het hier om echt droog en verzadigd, of is er in beide gevallen een bepaald % aanwezig? Een detailstudie van de effecten van parameters en eigenschappen op de thermische geleidbaarheid van

In eerste instantie wordt er verder gewerkt met hoofd-lithoklassen lithoklassen (grind, zand, leem/silt, klei en veen), aangezien er daar meer data voor beschikbaar zijn. Voor de hoofd-lithoklassen kunnen 3 tabellen opgesteld worden; een tabel met alle lambda-waarden, ook die waarbij geen vermelding aangetroffen werd of het om “droog” dan wel “nat” gaat, een tweede tabel met lambda-waarden in “droge” toestand en een derde tabel met lambda-waarden in “natte” toestand. Naast de minimale, maximale en gemiddelde (average) lambda-waarde uit de verzamelde literatuurgegevens, wordt ook het aantal (count) weergegeven waarop deze waarden zijn gebaseerd. Verder is ook het gemiddelde (mean) tussen de minimale en maximale lambda-waarde en de spreiding (spread) opgegeven.

all	min	max	mean	average	count	spread
gravel	0,3	3	1,65	1,16	31	2,70
sand	0,15	5,75	2,95	1,50	74	5,60
loam/silt	0,16	3,5	1,83	1,44	59	3,34
clay	0,15	3,1	1,63	1,10	60	2,95
peat	0,04	2,27	1,16	0,58	20	2,23

dry	min	max	mean	average	count	spread
gravel	0,4	0,9	0,65	0,63	10	0,50
sand	0,15	1,8	0,98	0,53	23	1,65
loam/silt	0,16	1,8	0,98	0,71	14	1,64
clay	0,15	2,6	1,38	0,70	21	2,45
peat	0,04	1,7	0,87	0,40	7	1,66

saturated	min	max	mean	average	count	spread
gravel	0,4	3	1,70	1,66	10	2,60
sand	1,7	5,75	3,73	2,70	20	4,05
loam/silt	0,9	3,1	2,00	1,99	12	2,20
clay	0,6	3,1	1,85	1,58	18	2,50
peat	0,54	2,27	1,41	0,88	6	1,73

pagina 22 van 158

Uit de analyse van deze data kan het volgende geconcludeerd worden:

1. er is een zekere spreiding in waarden per lithoklasse tussen een minimale en een maximale waarde
2. de gemiddelde lambda-waarde is niet noodzakelijk het gemiddelde van de minimale en maximale waarde.
3. in tabel 1 (alles) en 3 (nat) is er een opklimmende gemiddelde lambda-waarde van fijn naar grof materiaal, met uitzondering van grind.
4. in tabel 2 (droog) is er geen duidelijke relatie met de korrelgrootte waarneembaar
5. de gemiddelde lambda-waarden “droog” bedragen ongeveer een derde van de lambda-waarden “nat” (met een spreiding tussen 0.20 tot 0.45, met de lage waarde voor zand en de hogere waarden voor klei en veen).

Voor het verdere onderzoek wordt er enkel uitgegaan van de lambda-waarden voor de “natte” toestand. Hierbij wordt “nat” als verzadigd aanzien en dus van toepassing op het sediment onder de grondwatertafel. Boven de grondwatertafel wordt er aangenomen (simplificatie) dat er een afname van watergehalte is naar het maaiveld toe. De zone boven de grondwatertafel is dus niet echt “droog”, ze bevat nog steeds een zeker percentage aan (capillair) water. Dit watergehalte zal doorheen de tijd variëren als gevolg van de seizoensgebonden stijging en daling van de grondwatertafel. Het watergehalte boven de grondwatertafel is bijgevolg niet gekend. Er wordt dan ook gekozen om arbitrair aan te nemen dat de thermische geleidbaarheid voor elke lithoklasse in “droge” toestand de helft bedraagt van de thermische geleidbaarheid in “natte” toestand, dus meer dan de werkelijke “droge” toestand.

Vertrekkend vanuit de hoofd-lithoklassen wordt er een **volgorde** opgesteld van grof naar fijn materiaal, waarbij de andere lithoklassen in gelijkaardige volgorde tussen deze hoofd-lithoklassen ingevoegd worden (bijvoorbeeld: lemig zand en zandige leem komen in die volgorde tussen zand en leem te liggen). Voor elk van de hoofd-lithoklassen is er uit de literatuur een bereik of een minimale en maximale waarde en een gemiddelde gekend voor de thermische geleidbaarheid (zie bovenstaande tabellen). Aan deze minimale, maximale en gemiddelde waarden werden aanpassingen gedaan voor wat de lithoklasse “grind” betreft om aan de volgorde vereiste overeenkomstig de korrelgrootte te voldoen. Hierbij dient vermeld te worden, dat na zorgvuldig nagaan van thermische geleidbaarheid van “zuiver” grind, dat deze inderdaad relatief laag is in vergelijking tot zand (Galgaro et.al., 2018; Dalla Santa et.al., 2017). Er wordt bij het aanpassen van de thermische geleidbaarheid dan ook uitgegaan van een zandig grind, zoals het zich ook voordoet in de Vlaamse ondergrond. **Dit resulteert in een lijst van lambda-waarden (van zware klei naar grind) waarbij tussen 2 opeenvolgende lithoklassen van losse gesteenten telkens een stap van ongeveer 0.06W/mK wordt verkregen.** Voor de harde of vaste gesteenten werd er enerzijds rechtstreeks gebruik gemaakt van data uit de literatuur en anderzijds, waar het gaat om een combinatie van verschillende soorten gesteenten (bijvoorbeeld: Westfaliaan, bestaande uit kleisteen, siltsteen, zandsteen en steenkool) werd een percentuele inschatting van elk aandeel gemaakt en daaruit de thermische geleidbaarheid bepaald. Het antropogeen wordt als een pakket met een grote spreiding wat betreft lambda-waarden (0.50 tot 3 W/Km) aanzien, aangezien dit uit alle mogelijk materialen kan bestaan.

Met de zo bekomen thermische geleidbaarheden per lithoklasse wordt een **controle** gedaan naar de gemeten gemiddelde lambda-waarde in elke TRT- en ETRT-waarneming. Aan de hand van de som van het percentuele verschil tussen de berekende en de gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid per waarneming kan dan een inschatting gemaakt worden of de gebruikte lambda-waarden voor de verschillende lithoklassen tot een overschatting dan wel onderschatting van gemiddelde thermische geleidbaarheid leiden. Met uitzondering van het Sokkelgesteente van het Brabant Massief worden de

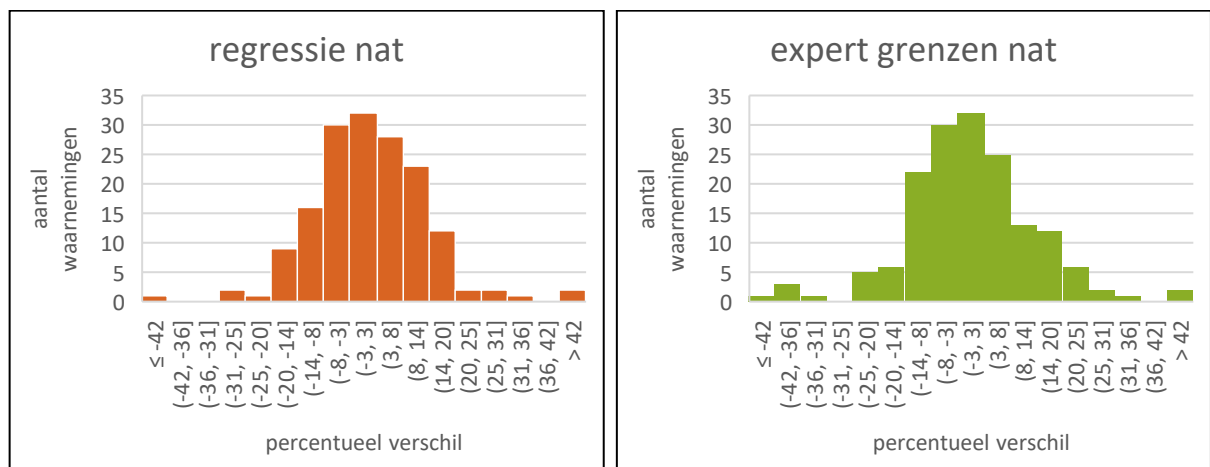
Uit de som van het percentageel verschil tussen de gemeten en berekende gemiddelde thermische geleidbaarheid, volgt dat de lambda-waarden van de lithoklassen gebaseerd op de gemiddelde thermische geleidbaarheid van de hoofd-lithoklassen uit de literatuur in een overschatting resulteren. Op basis van deze observatie worden de lambda-waarden van de lithoklassen aangepast (dus verlaagd in dit geval) om een zo klein mogelijk gesommeerd percentageel verschil tussen de berekende en gemeten lambda-waarde te bekomen. Voor de lithoklassen van de losse gesteenten wordt er vertrokken van een minimale gemiddelde thermische geleidbaarheid van 1.25 W/mK voor zware klei en een maximale gemiddelde thermische geleidbaarheid van 2.75W/mK voor (zandig) grind. De tussenliggende lithoklassen worden een waarde toegekend overeenkomstig hun volgorde tussen deze minimale en maximale grens. Tussen elke 2 opeenvolgende lithoklassen wordt zo telkens een stap van ongeveer 0.05 W/mK verkregen. Dit resulteert in een gemiddelde verlaging van de lambda-waarde per lithoklasse met een factor van ongeveer 0,85. Met de nieuwe waarden wordt opnieuw een controle gedaan naar de gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid uit de TRT- en ETRT-metingen van de huidige dataset.

2.2.3.4 Vergelijking tussen de resultaten uit de “expert-grenzen” en de regressiemethode

pagina 24 van 158

regressie	lambda	delta	abs-delta	delta-%	expert	lambda	delta	abs-delta	delta-%
average	2,01	0,00	0,19	1,52	average	1,97	-0,04	0,22	0,00
max	4,00	0,97	2,37	47,12	max	2,86	0,75	2,83	47,03
min	1,40	-2,37	0,00	-42,70	min	1,48	-2,83	0,00	-51,02

Op basis van een vergelijking tussen de resultaten uit de gewone regressie en die uit de expertgrenzen volgt dat beide, wat percentueel verschil ten opzichte van de werkelijk gemeten lambda-waarden betreft, elkaar sterk benaderen. Voor de expertgrenzen ligt 94% van de waarnemingen onder de grens van 25% het percentuele verschil. Bij de gewone regressie gaat het om 95%. Verder geven de expertgrenzen aan dat 54% van de waarnemingen binnen de grenzen van 8% percentueel verschil ligt, wat voor de gewone regressie op 56% neerkomt. Tenslotte ligt 20% van de waarnemingen bij de expertgrenzen zowel als bij de regressie onder de 3% percentueel verschil.



Wat hierbij van belang is, is dat de lambda-waarden uit de expertgrenzen realistische waarden voorstellen voor de gegeven lithoklassen, terwijl de gewone regressie (die statistisch gezien de beste benadering weergeeft), niet noodzakelijk voor alle lithoklassen, realistische lambda-waarden oplevert. De lambda-waarden uit de expert grenzen werkwijze vormen bijgevolg een zeer goede benadering van de werkelijke thermische geleidbaarheid per lithostratigrafische eenheid bij de gegeven dataset aan TRT- en ETRT-metingen.

pagina 25 van 158

expert grenzen literatuur nat

percentueel verschil	aantal waarnemingen
≤ -42	1
(-42, -36]	2
(-36, -31]	0
(-31, -25]	1
(-25, -20]	0
(-20, -14]	6
(-14, -8]	6
(-8, -3]	22
(-3, 3]	29
(3, 8]	27
(8, 14]	14
(14, 20]	13
(20, 25]	12
(25, 31]	8
(31, 36]	1
(36, 42]	1
> 42	2

percentueel verschil

expert grenzen droog / nat

percentueel verschil	aantal waarnemingen
≤ -42	2
(-42, -36]	2
(-36, -31]	1
(-31, -25]	0
(-25, -20]	7
(-20, -14]	13
(-14, -8]	13
(-8, -3]	28
(-3, 3]	30
(3, 8]	22
(8, 14]	17
(14, 20]	14
(20, 25]	5
(25, 31]	5
(31, 36]	0
(36, 42]	0
> 42	2

percentueel verschil

We deden nog 2 extra analyse-oefeningen, eentje met betrekking tot outliers en een tweede met betrekking tot de verzadigingsgraad van de stalen. Hiervoor verwijzen we naar Bijlage A.

Uit de analyse van de huidige dataset aan TRT- en ETRT-waarnemingen blijkt dat het afleiden van een thermische geleidbaarheid voor elke lithostratigrafische eenheid voorkomend in de ondergrond van het Vlaams Gewest geen rechttoe rechtaan zaak is. Er is geen éénduidige set aan lambda-waarden uit de dataset te extraheren. Te veel parameters hebben een invloed op het gemeten resultaat, parameters die bij het extraheren van lambda-waarden uit de dataset niet allemaal in rekening kunnen gebracht worden, meestal omwille van het feit dat ze niet gekend zijn. Het gaat hier enerzijds om materiaaleigen parameters en anderzijds om parameters verbonden aan de meetomstandigheden (tijd en locatie specifieke omstandigheden, meetopstelling). Uit de literatuur blijkt zelfs dat het meten van de thermische geleidbaarheid van een gesteente of een sediment in het laboratorium tot zeer uiteenlopende resultaten leidt, met een belangrijke spreiding in lambda-waarden als gevolg.

pagina 26 van 158

De waarnemingen waarbij het percentueel verschil tussen de gemeten en de berekende lambda-waarde groter is dan 25%, werden als afwijkende metingen aanzien. Voor deze waarnemingen werd de algemene informatie geïnspecteerd naar mogelijke redenen voor de vastgestelde afwijking. Uitvoerder, type meting en de dikte van de niet verzadigde zone zouden geen (merkelijke) invloed gehad hebben op het resultaat van deze metingen. De diepte van de boring en de tijdsduur waarover de meting gebeurd is, lijken er dan weer wel voor te zorgen dat de kans op een afwijking groter wordt naarmate 1 van de 2 kleiner is of beide kleiner zijn dan het gemiddelde. De vastgestelde afwijkingen zijn zowel overschattingen als onderschattingen.

2.2.5 Referenties / literatuur

Alfaro, C., Avarado, I. & Manrique, A., 2015: Heat flow at eastern Llanos sedimentary basin, Colombia. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, pp. 1-9.

Al Nakanshabandi, G. & Kohnke, H., 1965: Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. *Agricultural Meteorology*, volume 2, issue 4, pp. 271-279.

Becker, B.R., & Fricke, B.A., 1997: Effects of saturation and dry density on soil conductivity. Department of mechanical and aerospace engineering, University of Missouri-Kansas City, p. 16.

Bertermann D., Müller, J., Freitag S. & Schwarz H., 2018: Comparison between measured and calculated thermal conductivities within different grain size classes and their related depth ranges. *Soil Systems* 2018, 2, 50, pp. 1-20.

BGS-report, 2020: Temperature and thermal properties (detailed). Georeports, British Geological Survey, BGS report No: GR 999999/1, pp. 1-6.

Brigaud, F. & Vasseur, G., 1989: Mineralogy, porosity, and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophysical Journal* (1989), 98, pp. 525-542.

Bulbik, S.A, Semin, M. & Levin, L., 2023: Experimental and theoretical study of the influence of saline soils on frozen wall formation. *Applied Sciences*, 13 (18), pp. 1-26.

Busby, J., 2018: A modelling study of the variation of thermal conductivity on English Chalk. British Geological Survey. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, pp. 1-26.

Clauser, C. & Huenges, E., 1995: Thermal conductivity of rocks and minerals. In "Rock physics and phase relations. A handbook of physical constants", pp. 105-126.

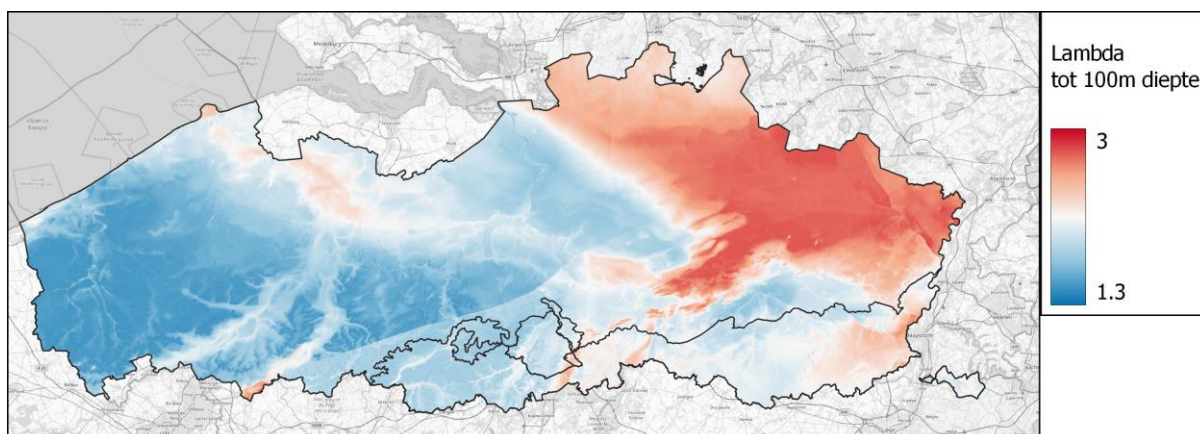
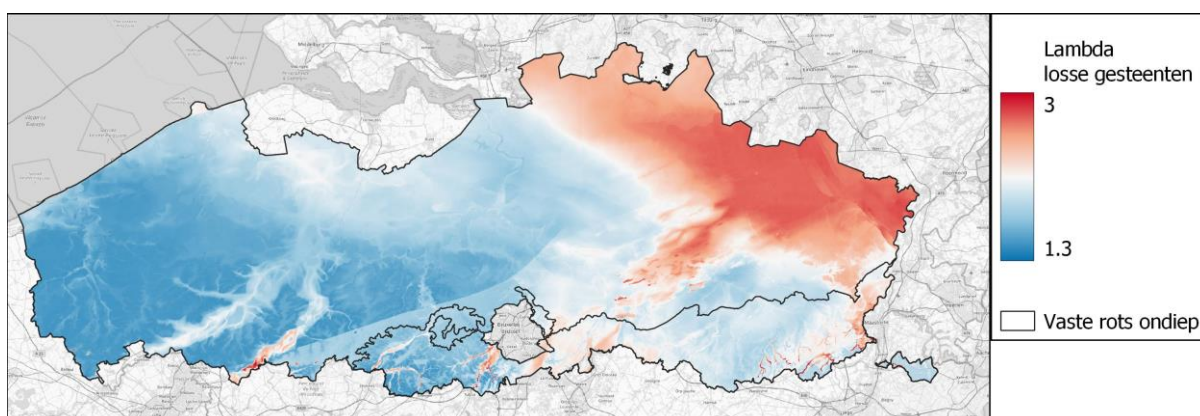
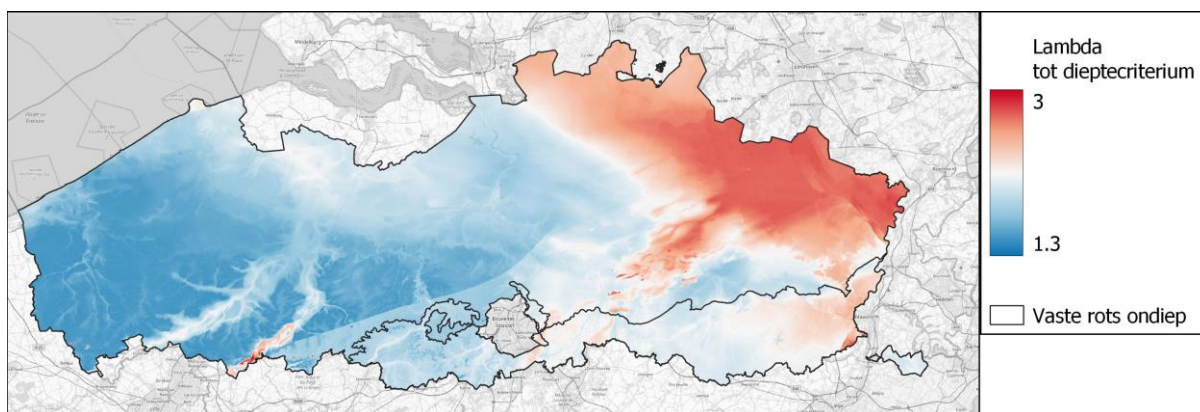
Dalla Santa, G., Peron, F., Galgaro, A., Cultrera, M., Bertermann, D., Mueller, J. & Bernardi, A., 2017: Laboratory measurements of Gravel Thermal Conductivity: An update Methodological Approach. *Energy Procedia* 125, pp. 671-677.

Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R. & Cultrera, M., 2020: An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics* 85 (2020), pp. 1-13.

Deckers, J. De Koninck, R., Bos, S., Broothaers, M., Dirix, K., Hambsch, L., Lagrou, D., Lanckacker, T., Matthijs, J., Rombaut, B., Van Baelen, K. & Van Haren, T., 2018: Geologisch (G3Dv3) en hydrogeologisch (h3D) 3D-lagenmodel van Vlaanderen. VITO rapport 2018/RMA/R/1569, p. 353.

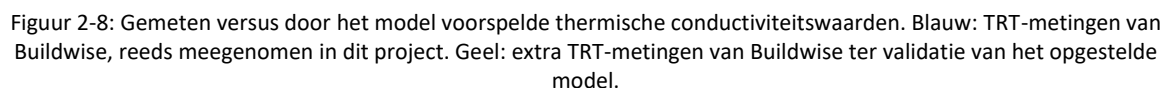
De Vries, D.A., 1952: Het warmtegeleidingsvermogen van grond. Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen, Nederland., p. 73.

Diment, W.H. & Pratt, H.R., 1988: Thermal conductivity of some rock-forming minerals: A tabulation. United States Department of the Interior Geological Survey, Open-File Report 88-690, p. 15.



- Bij het Smart Geotherm project was het meest recente geologische model G3Dv3 nog niet beschikbaar. Het toen gebruikte HCOV-model is voor een aantal eenheden minder nauwkeurig.

Buildwise beschikt over zes TRT-metingen die niet ter beschikking waren bij de start van het project. Deze konden in de finale fase worden ingezet als een validatiecheck. Onderstaande figuur toont dat al deze metingen binnen het 10% betrouwbaarheidsinterval liggen wanneer gemeten en door het model voorspelde waarden met elkaar vergeleken worden.



3.1 INLEIDING

3.2 IMPACT OP DE ONDERGROND EN HAAR ECOSYSTEEDIENSTEN

3.2.1 Temperatuurseffecten bij open en gesloten systemen

- Geochemische effecten

pagina 38 van 158

te voorkomen (François en Van Lysebetten, 2017). Een grootschalige studie op een aantal Vlaamse KWO systemen vond inderdaad geen negatieve effecten op de grondwaterkwaliteit (Possemiers et al., 2014).

3.2.3 Wijzigingen in het hydrologisch systeem bij open systemen

Open geothermische systemen kunnen verstoringen in het grondwaterstromingspatroon met zich meebrengen die een invloed hebben tot op een afstand van enkele kilometers (Ferguson, 2006). Indien een KWO systeem zich in de nabijheid van een grondwaterwinning bevindt, kan deze wijziging een verandering met zich meebrengen in het grondwaterwingsgebied van de winning, waardoor het zich kan uitstrekken buiten de wettelijk vastgestelde grondwaterbeschermingszone (Bonte et al., 2011). In Vlaanderen dient rekening gehouden te worden met grondwaterwinningen binnen 1 km van de projectlocatie. Eventuele interacties kunnen modelmatig gesimuleerd worden. Praktijkvoorbeelden tonen dat KWO systemen gelegen net buiten grondwaterbeschermingszones meestal géén meetbare invloed hebben op de waterwinning. Elk KWO systeem zal 99% van het opgepompte grondwater terug injecteren zodat het hydraulische effect ter hoogte van de drinkwaterwinningen niet kan vastgesteld worden. Omgekeerd is een drinkwaterwinning wél een netto grondwaterverbruiker die omgekeerd wél invloed uitoefent op de KWO. Dit resulteert in de versnelde afvoer van het geïnjecteerde grondwater. Dit grondwater is weliswaar opgewarmd of afgekoeld (+/- 6K) bij injectie, maar de versnelde afvoer zorgt voor een snelle temperatuurstabilisatie. Het onttrokken grondwater zal bovendien niet enkel toestromen naar de winningsputten vanuit de KWO putten, uiteraard stroomt het grondwater vanuit alle richtingen naar deze putten toe (J.Patyn et al., 2012).

Een potentiële uitzondering hierop vormen grootschalige KWO-systemen die in het Krijt worden geïnstalleerd: de grondwaterbeschermingszones rond grondwaterwinningen in deze pakketten zijn typisch kleiner (waarschijnlijk te wijten aan de diepere ligging van deze aquifer), waardoor potentiële interacties meer in detail onderzocht dienen te worden.

3.2.4 Risico's van dwarsstroming tussen aquifers bij open en gesloten systemen

Het doorboren van afsluitende kleilagen kan leiden tot het ontstaan van dwarsstroming tussen aquifers en tot het verspreiden van vervuilingen naar andere aquifers. Om hieraan tegemoet te komen dienen alle geothermische boringen in Vlaanderen opgevuld te worden met een vorstbestendig vulmiddel met een maximale permeabiliteit van 10^{-8} m/s (VLAREM II, bijlage 5.53.1, hoofdstuk 3). Verschillende samenstellingen van het vulmiddel zijn mogelijk (WTCB, 2016). Indien deze eisen worden nageleefd is de kans op natuurlijke lekstromen nihil. Met de grote stijging van het aantal geothermische boringen dat geplaatst wordt in Vlaanderen, neemt het risico op incorrect opgrouten uiteraard toe. Bonte et al. (2013) onderzochten de effecten van lekkage langs een slecht afgedichte bodemlus voor een aantal scenario's. Zij vonden enkel een meetbare verandering in stijghoogte in de directe omgeving (< 5 m) rond het boorgat en concluderen dat er geen significante hydrologische effecten te verwachten zijn op regionale schaal. Ze waarschuwen echter wel voor de toegenomen kwetsbaarheid van afgesloten grondwaterlagen voor grondwaterverontreiniging, zelfs bij kleine lekfluxen.

3.2.5 Risico's van lekkage van koelvloeistof bij gesloten systemen

In Vlaanderen dienen druktesten uitgevoerd te worden om te garanderen dat er geen lekkage is bij de plaatsing van de systemen (zie paragraaf 3.2.7). Echter, het grote aantal gesloten systemen dat geïnstalleerd wordt in Vlaanderen vergroot ook het risico van lekkages in de ondergrond. Bonte et al. (2013) schatten de kans op lekkage voor een BEO-systeem met 200m verticale leidinglengte, 20m horizontale leidinglengte en 7 koppelingen in op 1:435. Deze storingsfrequentie werd berekend op

basis van de centrale storingsregistratie van waterleidingbedrijven in Nederland omdat er geen rechtstreekse data bestaan over lekkages bij gesloten geothermiesystemen (Bonte et al., 2013). Grote lekkages zullen automatisch opgemerkt worden doordat systemen in storing gaan, maar kleinere lekken kunnen gedurende lange tijd onopgemerkt blijven.

In een standaard BEO-systeem bevindt zich meer dan 150 liter circulatievloeistof. De meerderheid hiervan bestaat uit water, aangevuld met ca. 25 - 30% aan antivriesmiddelen en 2 – 5% additieven zoals corrosie-inhibitoren, anti-schuimmiddel, kleurstoffen, oppervlakte-actieve stoffen,... (Bonte et al., 2013). De glycolen die meestal worden gebruikt als anti-vriesmiddel zijn goed afbreekbaar door bacteriën, zowel in oxische als anoxische condities (Klotzbücher et al., 2007), voor Vlaanderen wordt monopropyleenglycol of bietenderivaat aangeraden (VLAREM II, Artikel 5.55.2.7., §2). Deze processen zijn echter aerobisch, wat kan leiden tot een zuurstofverarming in het grondwater, hetgeen op zijn beurt kan leiden tot geochemische en biologische feedbackmechanismen. Dergelijke problemen zijn al aangetoond als gevolg van het gebruik van grote hoeveelheden antivries op vliegvelden, waarbij op de luchthaven van Schiphol bijvoorbeeld een correlatie is aangetoond tussen vissterfte en het overmatig lozen van glycolhoudend afwater (Bonte et al., 2013). Over de milieu-effecten van de toegevoegde additieven is veel minder bekend, ook al omdat weinig informatie beschikbaar is over de aard van de additieven die wordt toegevoegd. Wel tonen studies aan dat bijvoorbeeld corrosie-inhibitoren de biodegradatie van glycolen negatief beïnvloeden (Klotzbücher et al., 2007). Ook zijn bepaalde additieven nauwelijks biologisch afbreekbaar, waardoor ze kunnen accumuleren in de ondergrond, en ook in het drinkwater. Voor meer details in verband met milieu- en toxicologische effecten van verschillende vormen van additieven verwijzen we naar Bonte et al. (2013) en Illeva et al. (2012). **Hun algemene conclusie is dat het risico van vervuiling met anti-vriesmiddelen met additieven groot is, met een kleine kans op lekkage maar met een potentieel groot effect.** Ze wijzen daarbij vooral op de potentieel nadelige effecten van de additieven en bevelen aan om zuiver water te gebruiken, eventueel aangevuld met puur glycol, en bevelen aan om het gebruik van additieven tot een minimum te beperken (Bonte et al., 2013)

3.2.6 Achterblijvend materiaal in de bodem

Aangezien er meer regelgeving bestaat met betrekking tot open systemen, en het aantal van dergelijke systemen significant kleiner is, focust dit onderdeel zich op gesloten systemen. Wanneer de levensduur van gesloten systemen bereikt is, dienen ze uit dienst gesteld te worden volgens de VLAREM-regelgeving (paragraaf 3.2.7). Echter, na de uit dienst stelling blijft er nog materiaal achter in de ondergrond: het grout dat de bodemlussen omhult en de bodemlussen zelf. Desmedt en Draelants (2009) bestudeerden de milieu-effecten van deze materialen en kwamen tot de conclusie dat er voor PE-leidingen en grout gemiddeld respectievelijk 18 en 15-23 kg materiaal achterblijft per MWh thermische energie.

Polyethyleen (PE) is een inert materiaal dat zeer weinig onderhevig is aan biologische of chemische afbraak. Bovendien zijn de leidingen ondergronds niet blootgesteld aan UV-straling, die een belangrijke bron van degradatie vormt voor het materiaal. Fabrikanten garanderen algemeen een levensduur van meer dan 50 jaar (Desmedt en Draelants, 2009). Momenteel is er geen regelgeving die vereist dat deze leidingen terug verwijderd dienen te worden uit de ondergrond, aangezien dit een disproportioneel grote investeringskost met zich mee zou brengen, en de negatieve milieu-effecten op de ondergrond hiervan potentieel groter zijn dan dit materiaal achter te laten in de bodem. Desalniettemin zal dit materiaal na 50 tot 100 jaar fysiek beginnen af te breken in kleinere delen. Op lange termijn zullen hierbij microplastics vrijkomen, waarvan algemeen bekend is dat ze milieu- en gezondheidsproblemen met zich mee kunnen brengen.

Op lange termijn echter zal ook dit materiaal gaan degraderen. Het milieu-effect hangt dan af van zijn samenstelling, en in het bijzonder van eventuele toegevoegde additieven. Aangezien bentoniet en zand natuurlijke materialen zijn, is hun milieurisico algemeen gezien kleiner dan dat van cement, hetwelke bijvoorbeeld een verhoging van de pH in de omliggende bodem- en het grondwater met zich mee kan brengen.

3.2.7 Regelgeving in Vlaanderen

Daarnaast worden er in VLAREM II, artikel 5.53.6.2 (Grondwaterwinningen voor thermische energieopslag in watervoerende lagen met inbegrip van terugpompingen) een aantal punten gespecificeerd om een duurzame toepassing van geothermie voor open systemen te waarborgen:

- In VLAREM II, artikel Artikel 5.55.2 (Boringen in het kader van thermische energieopslag in boorgaten) worden ook een aantal regels vastgelegd voor gesloten systemen:

- ³ Indien de levensduur bereikt is dienen de systemen buiten gebruik gesteld te worden volgens de relevante wettelijke bepalingen.

- Bij gesloten systemen dient de boordiepte bovendien beperkt te worden tot het dieptecriterium. Het dieptecriterium werd opgemaakt op basis van het voorkomen van scheidende en kwetsbare lagen maar ook op basis van de stijghoogteverschillen die er bestaan tussen de verschillende watervoerende lagen. Zo zal in het zuiden van Oost- en West-Vlaanderen de aanwezigheid van het Landeniaan (F.Hannut) de limiterende factor zijn. Het dieptecriterium wordt hier vastgelegd op 10 m boven de top van de formatie van Hannut.

3.2.8 Ondiepe geothermische systemen en vervuiling in Vlaanderen.

Bij open bronsystemen (KWO) zal de impact van de geothermische installatie (met verplaatsing en thermische beïnvloeding van het grondwater) onderzocht worden als onderdeel van de vergunningsaanvraag (klasse 1 of klasse 2, in functie van het verpompte jaarvolume). Bij aanwezigheid van een verontreiniging in de buurt van de bronnen dient dit opgenomen te worden in het onderzoek. Indien de studie een potentiële negatieve interferentie tussen KWO en vervuiling verwacht, zal de toepassing van KWO negatief geadviseerd worden. Op heden is negatieve interferentie gekoppeld aan een verplaatsing van de verontreiniging in de omgeving (verspreiding in x, y of z richting) door toedoen van de geothermische installatie.

pagina 43 van 158

In sommige situaties kunnen maatregelen getroffen worden om de combinatie tussen KWO/BEO en een verontreinigde site wél mogelijk te maken zonder dat er negatieve interferentie zal optreden. Als er een scheidende laag zit tussen de watervoerende laag waarin een open systeem (KWO) wordt geïnstalleerd en de vervuilde zone (die meestal aan oppervlakte zit), dan kan een aangepaste werkwijze een oplossing bieden. In die situatie opereert het geothermisch systeem ruimtelijk gezien 100% onafhankelijk van de vervuilde zone en beïnvloeden ze elkaar niet. De scheidende laag zorgt voor een hydraulische én thermische barrière. Bij de aanleg van de boringen moet de vervuilde zone doorboord worden zonder dat verontreinigde stoffen meegenomen worden in de diepte. Dit kan gerealiseerd worden door het aanbrengen van een metalen verbuizing (casing) die het boorgat isoleert van de omgeving. Deze casing dient op voldoende grote diepte aangebracht in functie van de diepteverspreiding van de verontreiniging. Verder moet de opgehaalde grond eventueel afgezonderd en afgevoerd worden voor behandeling volgens geldende voorschriften. Dan kunnen de boringen verdergezet worden zoals bij standaarduitvoeringen. Na aanleg van de boringen is het wenselijk om het volledige boorgat boven de filterbuizen goed af te dichten met een aangepaste dichtende grout.

Tot slot is het nuttig om aan te stippen dat er ook onderzoeken (en demonstratieprojecten) zijn uitgevoerd rond het bewust toepassen van open bronsystemen (KWO) op vervuilde sites met als doel het winnen van energie in combinatie met het elimineren van verontreinigingen door de behandeling van grondwater (bovengronds) of de versnelde afbraak van verontreiniging als gevolg van temperatuurseffecten en versnelde bewegingen van het grondwater (Dinkla et al., 2012; de Vries et al., 2012; Verburg et al., 2010). Binnen het OVAM Citychlor project zijn de mogelijkheden en bedreigingen ook onderzocht voor Vlaanderen (Hoes et al., 2012).

pagina 44 van 158

3.2.9 Conclusie: Impact van ondiepe geothermie op de ecosysteemdiensten (ESD) van de ondergrond

Ecosysteemdiensten (ESD) vormen een handig hulpmiddel om de ecologische (en sociale) duurzaamheidseffecten van ondiepe geothermie te concretiseren. Volgens hun definitie omvatten ecosysteemdiensten alle goederen en diensten die ecosystemen aan de samenleving leveren. Dit is een zeer breed begrip, maar er bestaan reeds enkele onderzoeken die zich specifiek focussen op ESD van de ondergrond (Driesen et al., 2019; Vermooten et al., 2015). Vervolgens kunnen we deze groep verder verfijnen tot de diensten die specifiek beïnvloed worden door ondiepe geothermie (Tabel 3-1).

Categorie	ESD
Producterende diensten	Beschikbaarheid van voldoende kwalitatief drinkwater Leveren van energie Voorzien van constructiematerialen Voorziening van voedsel, materialen en energie door de teelt van gewassen Voorraad van farmaceutische en genetische bronnen
Regulerende diensten	Reinigend vermogen van de ondergrond Draagkracht Bergingscapaciteit Rol in biochemische cycli Voorzien in watervoerendheid en waterkwaliteit oppervlaktewater Voeding van grondwaterafhankelijke natuur Regulatie erosierisico Regulatie grondverschuivingsrisico Regulatie overstromingsrisico Temperatuurregulatie Klimaatregulatie (C-opslag) Mitigatie van geluid, geur en trillingen Behoud en bescherming van biodiversiteit
Culturele diensten	Cultuurhistorische waarde en educatieve waarde Biodiversiteit Belevingswaarde (bijdrage aan gezondheid, recreatie, ecotoerisme)

Tabel 3-1: Ecosysteemdiensten van ondiepe bodem en ondergrond volgens Vermooten et al., 2015 en Driesen et al., 2019. Vetgedrukte ESD zijn diegene die het meest beïnvloed worden door ondiepe geothermie

Uit de vorige paragrafen kunnen een aantal conclusies getrokken worden omtrent deze selectie van ESD:

- **Beschikbaarheid van voldoende kwalitatief drinkwater:** In afwezigheid van belangrijke vervuilingen, mits een beperkte temperatuurswijziging en mits het respecteren van de relevante wetgeving in Vlaanderen, is het risico van ondiepe geothermie op de kwaliteit van het drinkwater beperkt. Het risico van lekkages van koelvloeistof in de ondergrond is klein, maar de negatieve impact van met name de toegevoegde additieven kan groot zijn. Ongewenste dwarsstromingen tussen aquifers vormen een risico voor de kwaliteit van het grondwater, in het bijzonder bij de aanwezigheid van vervuilingen. Voor KWO-systemen beperkt de Vlaamse vergunningsprocedure het risico op dit fenomeen, maar voor BEO systemen geldt er geen specifieke regelgeving voor dit aspect. Indien ondiepe geothermische systemen geboord worden op vervuilde gronden, kan het gebruik maken van een metalen casing bij het boren het risico op verspreiding van de vervuiling beperken.
- **Leveren van energie:** Indien de technische principes van een duurzaam design van ondiepe geothermische systemen gerespecteerd worden komt het vermogen van de ondergrond tot het leveren van energie niet in het gedrang

- **Reinigend vermogen van de ondergrond:** Dit wordt aangestuurd door gekoppelde fysische, chemische en biologische processen. Met uitzondering van de redoxcondities is de impact van ondiepe geothermie op de fysische en chemische processen beperkt, maar er is nog veel onduidelijkheid over de impact van temperatuursveranderingen en grondwatermixing op het microbiologisch evenwicht van de ondergrond. Bijgevolg is er ook veel onzekerheid over de impact van ondiepe geothermie op het vermogen van de ondergrond om contaminanten te immobiliseren en af te breken.
- **Rol in biogeochemische cycli en behoud en bescherming van biodiversiteit:** Zie bovengaan punt, extra onderzoek is vereist om meer inzicht te krijgen in dit onderwerp. Specifiek verdient hierbij ook de toxiciteit van (additieven in) gelekte koelvloeistof de aandacht.
- **Voorzien in watervoerendheid en waterkwaliteit oppervlaktewater:** Ongewenste dwarsstroming tussen gespannen- en freatische aquifers als gevolg van het perforeren van aquitards vormt het grootste risico voor oppervlaktewater als gevolg van ondiepe geothermie. Mits correct afdichten van de boorgaten kan dit risico geminimaliseerd worden.
- **Temperatuurregulatie:** Dit betreft het vermogen van de ondergrond om de temperatuur te bufferen. Dit effect wordt bepaald door het cumulatieve temperatuur-effect van de systemen, maar seizoenale regeneratie en de invloed van grondwaterstroming hebben een dempend effect op de netto anomalie. Voor gesloten systemen wordt de temperatuur enkel zeer lokaal significant beïnvloed door geothermische systemen. Voor open systemen kunnen de invloedsradii groter zijn. Het netto koude-overschot dat kan verwacht worden bij particuliere ondiepe geothermische systemen in een stedelijke context in Vlaanderen kan potentieel een gedeelte van het urbane hitte-effect in de ondergrond compenseren.

3.3 IMPACT OP DE EFFICIËNTE WERKING VAN GEOTHERMISCHE SYSTEMEN

Het aantal geïnstalleerde geothermische systemen in Vlaanderen neemt gestaag toe. Een nieuwsbericht van het Vlaams Energie- en Klimaatagentschap (VEKA dd. 16 februari 2024) geeft hierin goed inzicht. Zo was er in 2021 in totaal 1 op 2 van de bouwheren (48%) die een warmtepomp plaatsten op basis van de ingediende EPB-aangiften. Het jaar voordien (2020) was dit slechts 1 op 3 (34%) van de projecten die kozen voor een warmtepomp. Uiteraard zijn dit niet allemaal geothermische warmtepompen, de praktijk toont dat ongeveer één derde van de warmtepompen aangesloten zijn op een geothermische bron (meestal verticale sondes). De verkoopcijfers bevestigen dat deze trend zich blijft doorzetten. De sectorfederatie (nieuwsbericht InfoWarmtePomp dd. 20 februari 2024) geeft aan dat er in 2022 ± 30.000 warmtepompen werden verkocht, tegenover ± 50.000 warmtepompen in 2023 (een stijging met 67% op één jaar tijd). Verder worden er acties genomen om mensen met een bestaande woning (zonder grondige renovatieplannen) advies te geven over de mogelijkheden om hun verwarmingssysteem te veranderen naar een warmtepomp. Dit leidt uiteraard tot een steeds grotere dichtheid van geplaatste boringen en een steeds groter wordend risico dat geothermische systemen elkaar gaan beïnvloeden en er een negatief effect ontstaat op de ondergrond en de ecosysteemdiensten die zij kan leveren.

3.3.1 Overzicht geothermische systemen

3.3.1.1 Gesloten systemen met horizontale lussen

Hoewel populair bij de opkomst van geothermische warmtepompen in de jaren 80 van vorige eeuw, is het plaatsen van horizontale lussen niet langer van groot belang. Bij deze systemen worden meestal kunststof buizen (diameter 20/25/32 mm) horizontaal en op beperkte diepte geplaatst, meestal onder de vorstgrens (min. 80 cm diepte). Het voordeel zit in de schijnbaar makkelijkere aanleg van het systeem gezien er géén gespecialiseerde boorwagen nodig is, een graafmachine volstaat. In de praktijk resulteert dit niet onmiddellijk in lagere aanlegkosten, behalve indien graafwerken gecombineerd kunnen worden in het kader van andere grondwerken. Slechts in een beperkt aantal gevallen zullen de lussen onder de grondwaterstand liggen, gezien dit vraagt om maatregelen zoals het plaatsen van droogzuiging (niet gebruikelijk) om de buizen te kunnen aanleggen.

De systemen met horizontale lussen zijn vooral gericht op warmte-onttrekking in de winter. Hierbij zal de ondiepe bodem afkoelen met in extremis kans op bevriezing van de bodem en mogelijk zetting/liften van de bovenste grondlagen. Door de geringe diepte zal er quasi volledige natuurlijke regeneratie zijn in de zomer met als resultaat een volledig herstel van de bodemtemperatuur. Uitzonderingen zijn systemen met permanente onttrekking van warmte (zwembadverwarming in zomer).

De horizontale systemen worden niet verder opgenomen in deze studie, de thermische of hydraulische impact wordt verondersteld beperkt te zijn tot het eigen perceel van aanleg van het systeem. Ruimtelijke verspreiding naar aanliggende percelen is onwaarschijnlijk tot zéér beperkt. In een worst case scenario, met extreme afkoeling van de bodem én aanleg van de buizen tot minder dan 1 meter van de perceelsgrens, in combinatie met aanleg in het grondwater waarin een significante grondwaterstroming aanwezig is, zou een thermische invloed op de eerste paar meters van een naburig perceel vaststelbaar kunnen zijn. De kans op dergelijke negatieve invloed is dus niet onbestaande maar wél onwaarschijnlijk en eerder beperkt, verder enkel geldig indien ook het buurperceel een horizontaal systeem bevat tot aan de perceelsgrenzen. Gezien dergelijke systemen een relatief groot oppervlak vragen én bovendien vaak niet goedkoper zijn dan verticale lussen, worden deze steeds minder toegepast en dus minder relevant.

3.3.1.2 Gesloten systemen met verticale lussen

De geothermische markt wordt vooral ingenomen door particuliere gesloten systemen, waarbij een verticale lus (meestal dubbele U-lus) in een boorgat wordt geplaatst (typisch op een diepte van 100 à 150 meter)⁴. Voor een hedendaagse woning zijn typisch 1 tot 3 boringen nodig. Elk jaar worden er zo naar schatting 1000 à 1500 boringen voor particuliere projecten geplaatst in Vlaanderen. Daarnaast zijn er ook jaarlijks een honderdtal projecten met een veelvoud aan boringen/verticale lussen. Deze bevatten een volledig boorveld en worden vaak aangeduid als Boorgat Energie Opslag (of BEO) met telkens een tiental tot zelfs enkele honderden boringen per project.

De verticale systemen zijn meestal gericht op **verwarming én koeling**, zeker indien het grotere systemen zijn (BEO). Doch ook particulier is de mogelijkheid tot aanwenden van passieve koeling een grote troef en wordt dit quasi steeds (>90%) bij nieuwbouw toegepast, hetgeen positief is in kader van de wens tot regeneratie van de bodem en het vermijden van uitputting.

De energieconcepten in combinatie met verticale lussen kunnen als volgt opgedeeld worden:

1. Enkel verwarmen
2. Verwarmen én passief koelen
3. Verwarmen én actief koelen

⁴ Er kan zonder vergunning geboord worden tot het dieptecriterium. Zie ook paragraaf 3.2.7

De wettelijk maximale injectietemperatuur in de bodem bedraagt in Vlaanderen 25°C. Bij toepassing van concept 2 is er géén risico op hogere temperaturen gezien passief koelen bij temperaturen > 20°C quasi onmogelijk wordt. Toepassing van concept 3 zal daarentegen wél een risico betekenen om 25°C te overschrijden. Een specifieke hydraulische inpassing is immers nodig om de injectietemperatuur te beperken. Bij rechtstreekse injectie zal de temperatuur immers snel hoger worden dan 25°C gezien deze temperatuur voor de meeste warmtepompen te laag is aan condensorzijde en deze bijgevolg in storing zullen gaan.

Bij substantieel onevenwicht tussen koude- en warmtevraag kunnen **regeneratiesystemen** ingezet worden, zoals dry coolers of thermische zonnepanelen. Alternatieve oplossingen bestaan erin om geothermie te combineren met riothermie, aquathermie of zonnethermie. Dit kan vooral bij collectieve systemen een nuttige combinatie zijn, waarbij dit kan bijdragen tot een evenwichtige geothermische belasting. Uiteraard is dit enkel zinvol indien er een onevenwicht is over de totaliteit van het collectieve systeem met een grotere verwarmingsvraag ten opzichte van de koelvraag. Indien de onbalans omgekeerd ligt (bv bij gemengde ontwikkelingen met kantoren en retail) zal dergelijke combinatie niet zinvol zijn. Ook bij de inzet van de regeneratiesystemen dient uiteraard rekening gehouden te worden met de 25°C restrictie zoals hoger vermeld.

3.3.1.3 Open bronsystemen

Een klein deel van de geothermische markt ($\approx 5\%$) wordt ingenomen door open bronsystemen (ook wel Koude Warmte Opslag of KWO genoemd). Anno februari 2024 zijn er in Vlaanderen 356 open systemen ingedeeld volgens VLAREM. Open bronsystemen worden meestal opgebouwd in dubletten (2 putten waartussen het grondwater wordt verpompt via een scheidings-/ warmtewisselaar om warmte/koude over te brengen op de gebouwinstallatie). Dit grondwater kan meerdere tientallen meters rond de putten verplaatst worden, verder zal ook de grondwaterstand verhogen/verlagen in de onmiddellijke omgeving. Deze installaties zijn bij uitstek bedoeld voor niet-particuliere projecten en de toepasbaarheid is sterk bepaald door de geologische condities op de projectlocatie.

Naast de doubletten zijn er ook een beperkt aantal monobronsystemen in België. Hierbij wordt de onttrekking en injectie gerealiseerd in één put, dit kan door de filters boven elkaar te plaatsen ipv naast elkaar. Voor de realisatie van kleine open bronsystemen op een locatie met voldoende dikke aquifer kan dit een oplossing zijn om de installatiekosten te beperken.

Open bronsystemen kunnen op verschillende manieren opgebouwd worden :

1. Bidirectioneel (KWO of Koude Warmte Opslag)
2. Unidirectioneel (KOR of Koude Opslag/Recirculatie)

Bij een bidirectionele werking zal de stromingsrichting van het grondwater omkeren in de zomer ten opzichte van de winter. Op die manier wordt er een warme bron (steeds injectiebron in de zomer en onttrekkingsbron in de winter) en een koude bron (steeds injectiebron in de winter en onttrekkingsbron in de zomer) gecreëerd. Rond de warme bron wordt een warme bel gevormd die groeit in de zomer (injectie van warmte) en krimpt in de winter (onttrekking van warmte). Omgekeerd zal rond de koude bron een koude bel gevormd worden die groeit in de winter en krimpt in de zomer. In een ideaal

Bij een unidirectionele werking zal de stromingsrichting van de installatie steeds dezelfde zijn. Daardoor is er géén sprake van een warme en een koude bron maar spreken we van een onttrekkings- en een injectiebron. De beschikbare temperatuur is dan steeds de natuurlijke bodemtemperatuur (functie van de diepteligging van de aquifer/filter). Er zijn omstandigheden waarbij een unidirectionele opbouw van de installatie nuttig kan zijn, bv. indien een grote grondwaterstroming de opbouw van warmte/koude onmogelijk maakt, indien er een grote onbalans wordt verwacht of om de opbouw/werking van de installatie te vereenvoudigen. De regeling van een unidirectioneel systeem is minder complex/gevoelig voor kleine temperatuurverschillen tussen aanvoer en retour van het grondwater. Bij bidirectionele systemen is het van het grootste belang om steeds grote temperatuursverschillen te bekomen tussen het onttrokken en geïnjecteerd grondwater, zoniet zal de koude bron opwarmen en/of de warme bron afkoelen. Vooral in deellast bedrijf vraagt dit om een solide inpassing en regeling.

1. Enkel verwarmen
2. Enkel koelen
3. Verwarmen én passief koelen
4. Verwarmen én actief koelen

3.3.2 Parameters die het interferentierisico beïnvloeden

	Open systemen	Gesloten systemen
Geo(hydro)logische parameters	- Dikte aquifer - Doorlatendheid aquifer - Thermische geleidbaarheid aquifer	- Thermische geleidbaarheid ondergrond - Warmtecapaciteit ondergrond - Snelheid grondwaterstroming

De hydraulische en thermische invloedstraal van een gesloten bronsysteem zal in de praktijk variëren tussen 5 à 10 meter, in uitzonderlijke gevallen kan dit ter hoogte van de aquifers (gedeelte van de sonde dat in een watervoerende laag zit) enkele tientallen meters bedragen (in dat geval vooral bepaald door de snelheid van het grondwater).

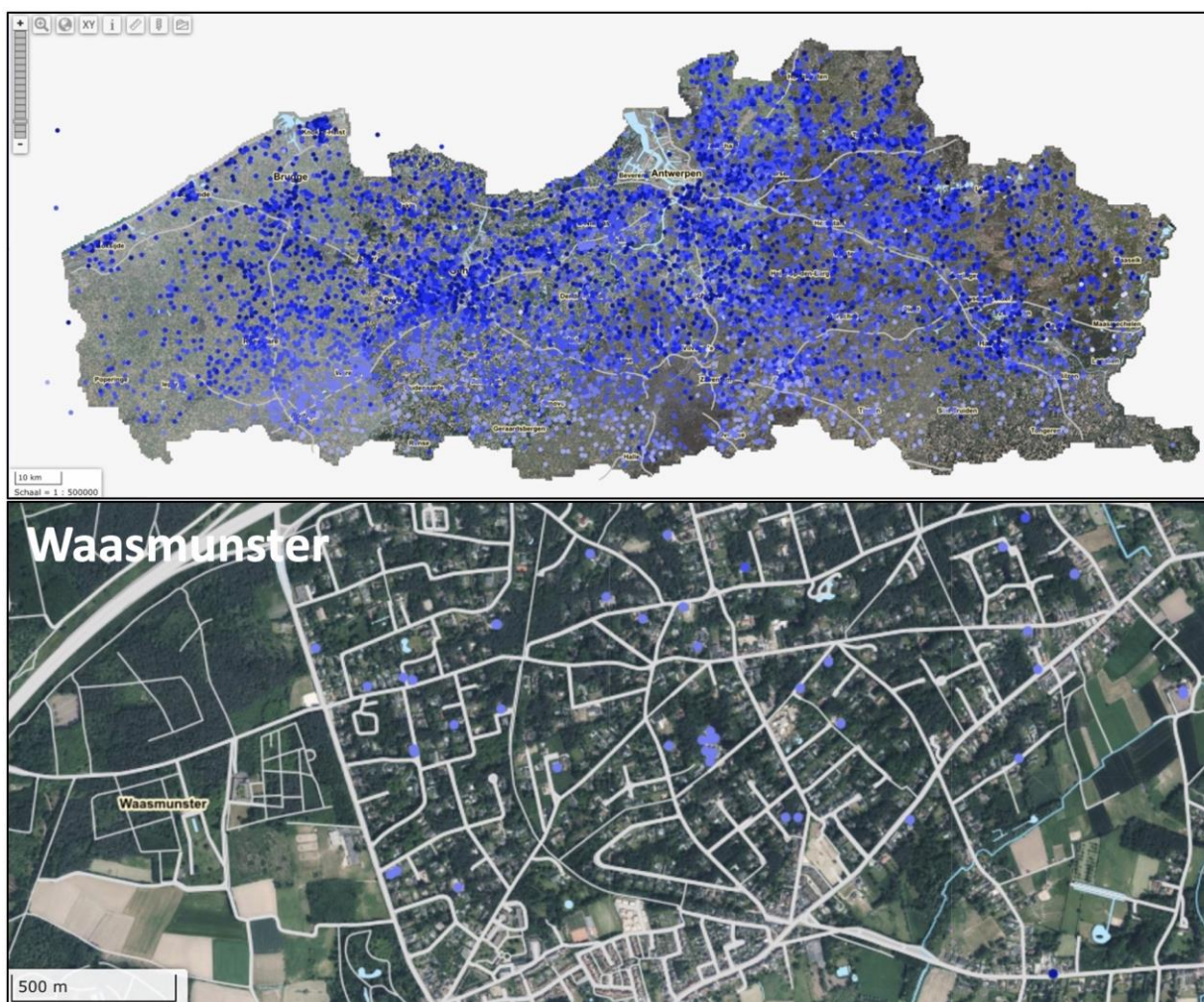
De uitbouw van geothermische systemen kende in het voorbije decennium een sterke groei tot momenteel jaarlijks een duizendtal particuliere installaties en een honderdtal grote installaties (industrie, projectontwikkeling, ziekenhuizen, openbare gebouwen,...). Hierdoor komen de geplaatste systemen onherroepelijk korter bij elkaar te liggen met potentiële interferentie tot gevolg.

Tot op heden leert de analyse van de nabijheid van deze boringen dat dit in de meeste situaties géén probleem zal opleveren. Zo toont de verspreiding van de verticale sondes in woonwijken, waar geothermische boringen intensief aanwezig zijn, dat de gemiddelde afstand makkelijk tientallen tot honderden meters bedragen waarbij interferentie verwaarloosbaar is (zie voorbeeld woonwijk Waasmunster, Figuur 3-2).

Via het e-DOV Meldpunt dienen erkende boorbedrijven hun werkzaamheden te rapporteren. Hun rapporteringsplicht houdt in dat de boringen minimaal 2 werkdagen op voorhand dienen te worden

jaar	Aantal gesloten ondiepe systemen
2017	650
2018	1050
2019	1450
2020	1750
2021	2250
2022	2650
2023	3050

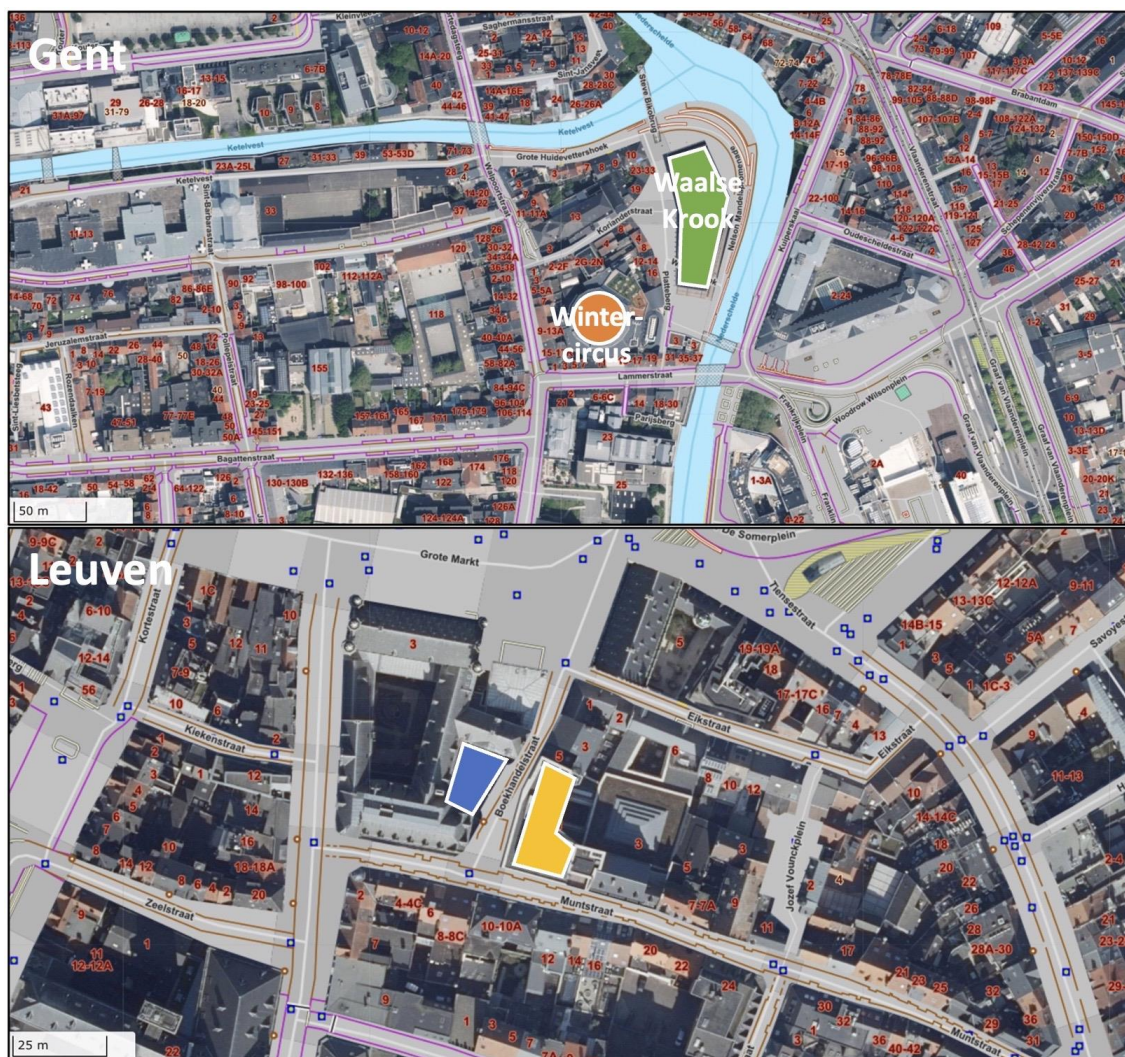
De regelgeving specificeert echter dat er één rapportering mag gebeuren voor een set van gelijkaardige boringen, op voorwaarde dat de boordiepte gelijkaardig is, en de boringen minder dan 500m van elkaar liggen. In principe moet het totale aantal individuele boringen in het opmerkingenveld worden aangegeven. Voor gesloten systemen dienen er geen verdere technische gegevens (bvb. vermogen) te worden doorgegeven.



Figuur 3-2: Boven: registratie van gesloten systemen in DOV (kaartlaag: boringen geothermie). Onder: detailillustratie van de gesloten systemen in de gemeente Waasmunster. De spreiding tussen de gesloten systemen is voldoende groot en het interferentierisico is minimaal.

De informatie verzameld via eDOV wordt ontsloten via de kaartlaag 'Boringen geothermie'. In totaal bevat deze dataset, anno februari 2024, 12 888 objecten. Een detailanalyse toont echter dat niet alle gesloten geothermische systemen zijn opgenomen. Vooral in het centrum van grote steden ontbreken meerdere installaties, dit zijn nochtans belangrijke zones met vaak grote BEO-velden die meestal onder het gebouw zijn geplaatst. Een voorbeeld hiervan is de Gentse bibliotheek 'Waalse Krook' en Wintercircuit 'Mahy', beiden worden gevoed door een groot BEO-veld met tientallen boringen. De onderlinge afstand tussen de boorvelden bedraagt slechts 50 meter. De installaties zijn niet opgenomen in DOV. Idem voor een bestaand groot BEO-veld in de Muntstraat te Leuven dat op slechts 10 meter van een nieuw gepland BEO-veld (bestemd voor het stadhuis) zal liggen. Oorzaken hiervoor kunnen zijn dat deze installaties dateren van vóór de meldplicht, dat de boringen niet correct werden gerapporteerd (bv. dat het 'doel' niet correct werd doorgegeven), of dat simpelweg niet voldaan werd aan de meldingsplicht.

Grote boorclusters met tientallen boringen kunnen in geval van uitputting leiden tot een globale afkoeling of opwarming van de ondergrond, door geleiding of bij lokale grondwaterstroming kan dit een nabijgelegen installatie op enkele tientallen meters positief of negatief beïnvloeden. In de beschreven situaties is de interferentie niet onderzocht terwijl deze niet bij voorbaat als verwaarloosbaar kan geëvalueerd worden.



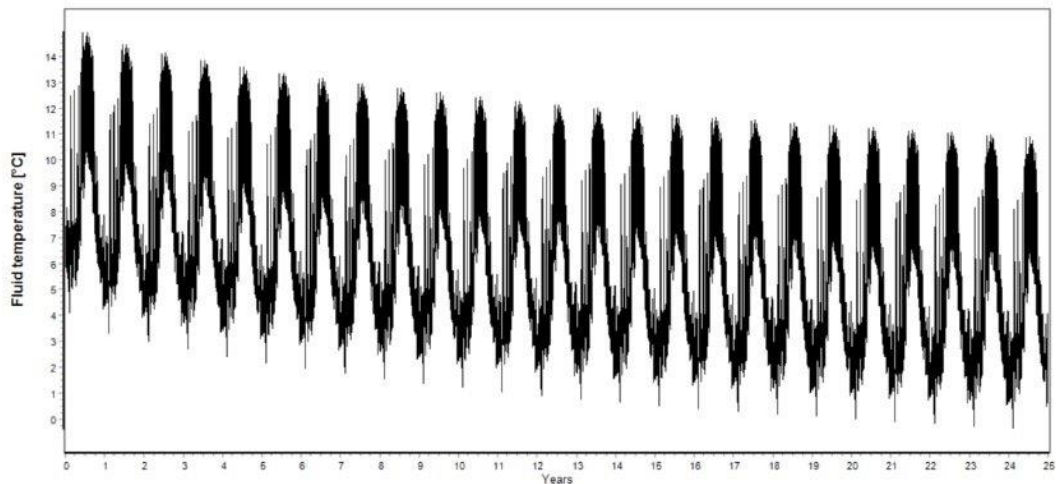
Figuur 3-3: Boven: twee grote BEO-velden op korte afstand in Gent. Beiden worden gevoed door een groot BEO-veld met tientallen boringen. De onderlinge afstand tussen de boorvelden bedraagt slechts 50 meter. De installaties zijn niet opgenomen in DOV. Onder: Een bestaand groot BEO-veld in de muntstraat in Leuven (niet opgenomen in DOV) op slechts 10 m afstand van een nieuw gepland BEO-veld voor het stadhuis. In beide cases is er een reël interferentierisico.

Bovenstaande analyse toont aan dat het huidige gebrek aan kwalitatieve en gedetailleerde informatie op DOV een grondige evaluatie van interferentierisico's bemoeilijkt. Om de effectiviteit van deze analyses te verbeteren, kunnen volgende verbeterpunten worden voorgesteld:

- De locatie van elke individuele boring zou gerapporteerd dienen te worden, niet enkel de centrale locatie van boorclusters.
- Informatie rond het vermogen van installaties zou toegevoegd moeten worden.
- Er zou een meer uitgebreide kwaliteitscontrole moeten zijn, die moet waarborgen dat in ieder geval de gegevens van de grotere systemen correct en volledig beschikbaar worden gesteld.

3.3.3.2 Interferentie in de praktijk: gesloten systemen

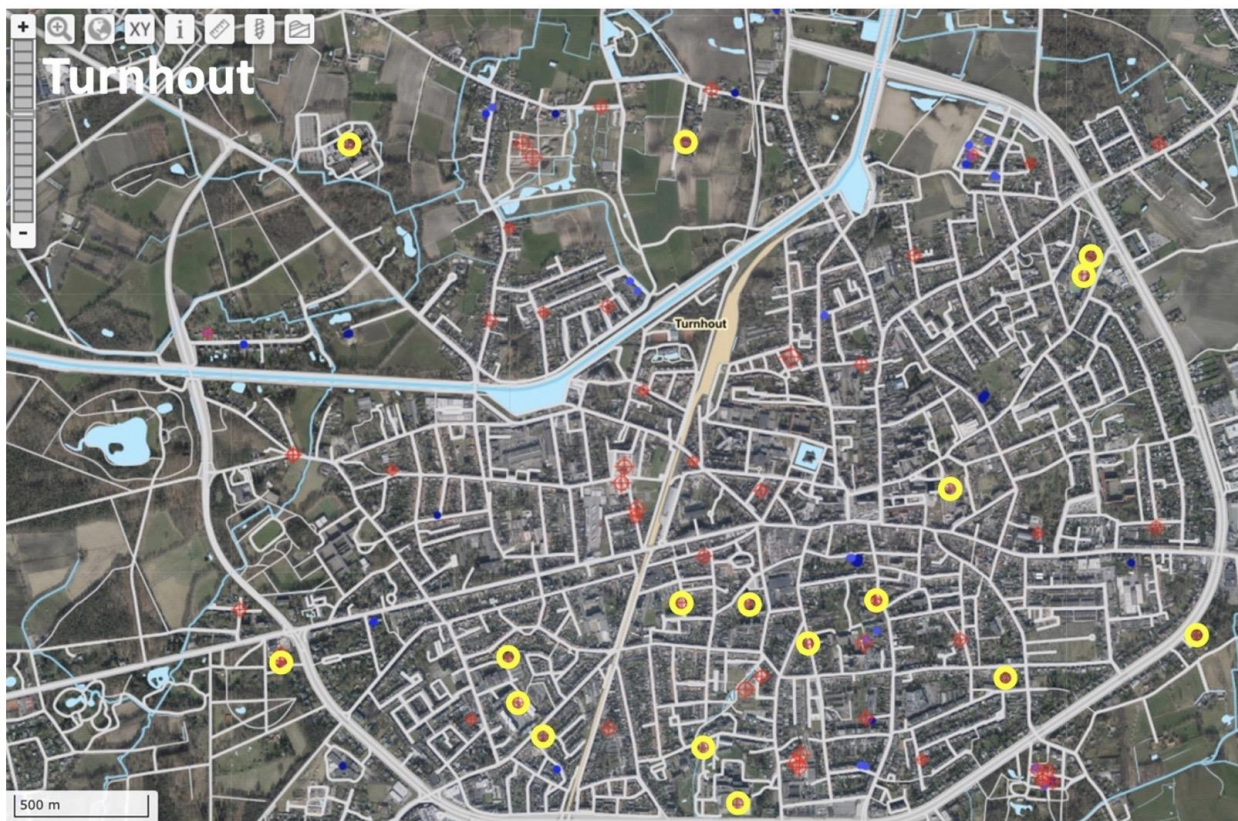
De standaard ontwerpsoftware voor gesloten bronnen (zoals bv. Earth Energy Designer of EED) geeft géén inzicht in de evolutie van de bodemtemperatuur in de omgeving, enkel de in- en uitgaande temperatuur van het circulerende medium wordt weergegeven.



Figuur 3-4: Outputgrafiek EED met verloop gemiddelde vloeistoftemperatuur in de aardsondes. Deze grafiek toont een gemiddelde daling van de bodemtemperatuur op lange termijn in de directe omgeving van de sonde, maar geeft geen inzicht in de ruimtelijke invloedsstraal van deze temperatuursanomalie.

Om inzicht te krijgen in de verspreiding van warmte/koude in de omgeving is gespecialiseerde software nodig. Deze laat toe om de invloed van afzonderlijke geothermische systemen op elkaar in kaart te brengen, elk met een eigen belastingsprofiel. Via een berekening en visualisatie van de temperatuursevolutie in de bodem kan de ernst van de onderlinge beïnvloeding ingeschat worden. Onderstaand voorbeeld geeft een woonverkaveling weer in Merksplas, waar de invloed onderzocht werd van een combinatie tussen individuele boringen voor grondgebonden woningen in combinatie met een collectief systeem (BEO-veld) voor een appartementscomplex. Het temperatuursbeeld geeft links weer wat de invloed is van de individuele sondes (1 per woning) en rechts de bijkomende invloed van het collectieve BEO-veld voor het appartementsgebouw.





Figuur 3-7: Centrum Turnhout met de ligging van gesloten (blauw) en open (geel) geothermische systemen

3.3.4 Modelleren van interferentie bij gesloten systemen: analytische benadering

Interferentie tussen gesloten systemen wordt in de praktijk slechts zelden gemodelleerd, aangezien ze als verwaarloosbaar beschouwd wordt. Bovenstaande praktijkervaringen tonen echter aan dat in bepaalde gevallen interferentie wel degelijk een rol kan spelen. Interferentie kan belangrijk zijn in dicht bebouwde urbane gebieden, of wanneer er gebouwen met een zeer hoge energievraag gesitueerd zijn in een zone met kleine perceeloppervlaktes.

Om hieraan tegemoet te komen ontwikkelden we een analytische tool, die op een eenvoudige manier gebruikt kan worden om interferenties tussen gesloten systemen in te schatten. De tool laat toe om meerdere putten te modelleren (door superpositie) en er kan een achtergrondvloeistofsnelheid in de aquifer worden ingegeven. De aanpak is geïnspireerd op de ITGBES Excel-tool van Witte en Boots (2022), maar maakt gebruik van de oplossing die is gepresenteerd in Attard et al. (2020).

3.3.4.1 Theorie

De algemene warmte-transportvergelijking wordt gegeven door:

$$C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [D_t \nabla T] - C_w \nabla \cdot (qT) + P_t$$

Waarbij T de temperatuur is, t de tijd, $C_{w/m}$ e volumetrische warmtecapaciteiten van respectievelijk water (w) en het poreuze medium (m), D_t de diffusiviteitstensor, q de Darcy-vloeistofsnelheid in het poreuze medium, P_t de warmteproductie per volume-eenheid, en ∇ de ruimtelijke gradiëntoperator.

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{q_{th}}{4\pi C_m \sqrt{D_{t,L} D_{t,T}}} \exp\left[\frac{u_t x}{2D_{t,L}}\right] \times \int_{\left(\frac{x^2}{4D_{t,L}t} + \frac{y^2}{4D_{t,T}t}\right)}^{\infty} \exp\left[-\Psi - \left(\frac{x^2}{D_{t,L}} + \frac{y^2}{D_{t,T}}\right) \frac{u_t^2}{16D_{t,L}\Psi}\right] \frac{d\Psi}{\Psi}$$
$$D_{t,L/T} = D_t + \alpha_{L/T} u_t$$

3.3.4.2 Methodologie

De outputs van de berekening zijn:

- Het cumulatieve dT-effect op alle omliggende putten wordt berekend om de effecten samen te vatten. Het cumulatieve dT-effect en punt (2) zijn analoog aan de outputs die worden berekend door de ITGBES-tool (Witte en Boots, 2022) voor gesloten systemen, exclusief de achtergrondvloeietsnelheid van de aquifer. De tool genereert een contourplot voor de volledige dT-respons en een .csv-bestand met deze gegevens. De dT-matrix voor interacties tussen putten wordt berekend in maandelijkse tijdstappen en opgeslagen in een .csv-bestand. De finale dT-matrix wordt opgeslagen in een geformatteerd .xlsx-bestand.

De rest van het script hoeft niet te worden aangepast, maar kan indien gewenst door de gebruiker worden gewijzigd.

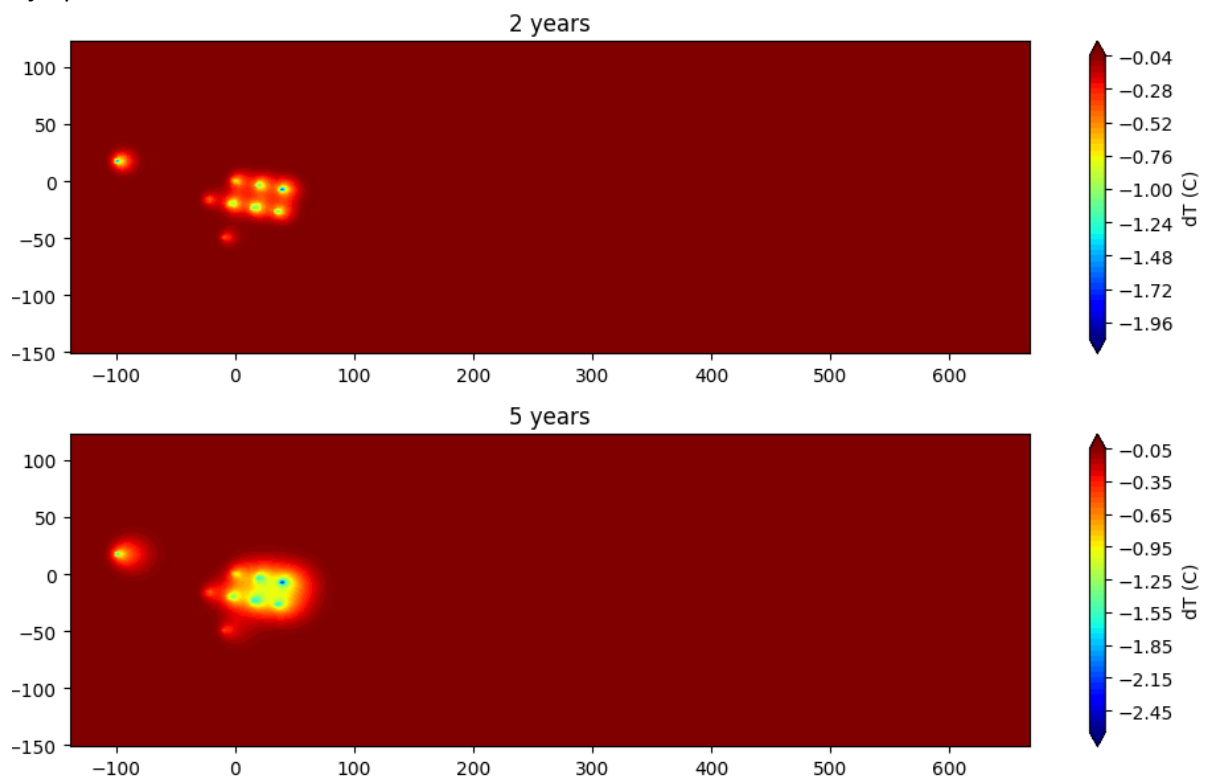
```
fluid_velocity = 1.0e-7      #[m/s]
direction_fluid_flow = 10.0  #[theta] -- counterclockwise angle in degrees from +x-axis
pore = 0.1                  # porosity
rho_rock = 2500.             # density of rock [kg/m^3]
rho_water = 1000.            # density of water [kg/m^3]
kw = 0.6                     # thermal conductivity water [W/m-K]
kr = 2.5                      # thermal conductivity of rock [W/m-K]
cw = 4200.                   # specific heat capacity of water [J/kg-K]
cr = 1000.                   # specific heat capacity of rock [J/kg-K]
a_x = 1.0                    # additional x thermal dispersion term [m] (generally 0 <= a_x <= 1)
a_y = 1.0                    # additional y thermal dispersion term [m] (generally 0 <= a_y <= 1)

# output times [years]
out_times = [1,2,5,30,100]

# time in years for final dT Matrix for well interference effects
FINAL_END_TIME_DT_MATRIX = 50
```

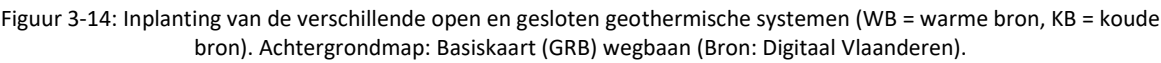
Figuur 3-8: Inputparameters voor de interferentietool.

De ΔT -plots over het volledige veld voor de "**Bruto warmtevraag**"-case voor 2, 5, 30 en 100 jaar worden weergegeven in Figuur 3-9 en Figuur 3-10. De putten worden allemaal weergegeven als warmteverliezen (heat sinks), hoewel warmtebronnen (heat sources) ook mogelijk zijn. Het convectie-effect van de achtergrondvloeijsnelheid is duidelijk zichtbaar in de responsen over langere tijdsperiodes



Figuur 3-9: dT -veldresultaat over het volledige veld voor het "Bruto vermogen"-scenario na 2 jaar (boven) en 5 jaar (onder) voor het voorbeeldprobleem.

pagina 63 van 158



Aquifersysteem	$K_{xx} = K_{yy}$ (m/dag)	K_{zz} (m/dag)	Specific storage (m^{-1})	Warmte capaciteit ρ (MJ/m³/K)	Warmte conductiviteit λ (W/mK)
Quartair Aquifersysteem	0.1	0.1	0.02	2.5	2.4
Klei-zand complex van de Kempen	3	0.3	5.05×10^{-5}	2.5	2.4
Pleistoceen en Plioceen Aquifersysteem	3	0.5	2.18×10^{-5}	3.2	1.6
Mioceen Aquifersysteem	10	0.2	1.1×10^{-5}	2.5	2.4

pagina 66 van 158

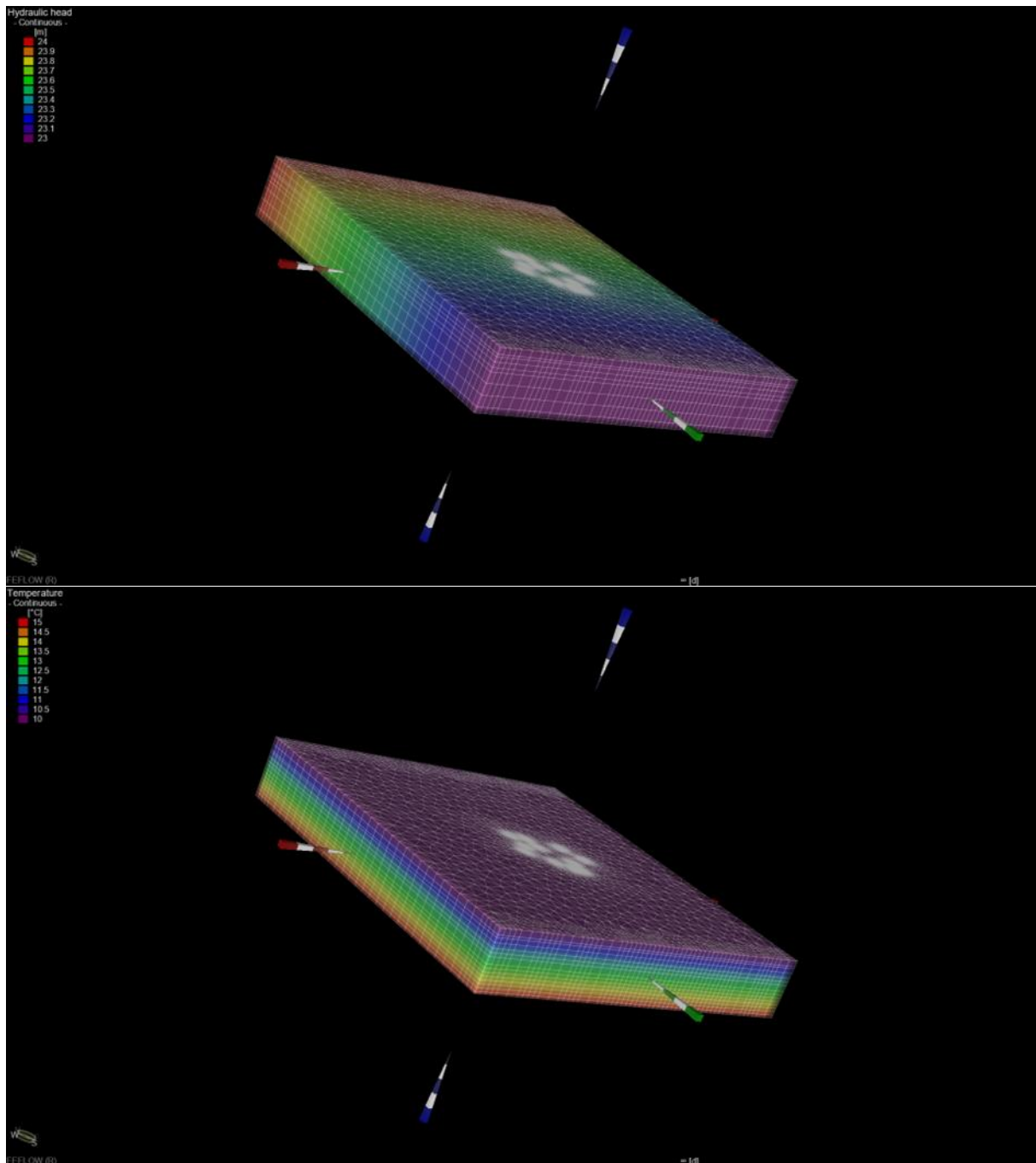
The graph displays power consumption over a 350-day period. The y-axis, labeled 'Vermogen (kW)', ranges from -8.0 to 8.0 with major ticks every 2.0 units. The x-axis, labeled 'Tijd (dagen)', ranges from 0 to 350 with major ticks every 50 units. A solid horizontal line is drawn at 0.0 kW. The data series is a highly volatile signal that fluctuates rapidly around the zero line. There are several peaks, notably around day 110 (reaching ~4.5 kW), day 160 (reaching ~6.5 kW), and day 240 (reaching ~7.0 kW). The signal also shows significant negative excursions, reaching down to -6.0 kW or lower at various points throughout the period.

<i>Parameter</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Waarde</i>
Diameter boring	m	0.15
Buisafstand	m	0.08
Buisdiameter	m	0.032
Buiswanddikte	m	0.0029
Grout thermische conductiviteit	$\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$	2.0
Fluïdum warmtecapaciteit	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$	4.06×10^6
Fluïdum thermische conductiviteit	$\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.475
Fluïdum viscositeit	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	7.9×10^{-3}
Fluïdum densiteit	kg m^{-3}	1.033×10^3

Om de interferentie tussen de verschillende geothermische systemen te onderzoeken, zal er voor een periode van 20 jaar gesimuleerd worden. Om de totale rekentijd in te korten, wordt er telkens data

weggeschreven op bepaalde tijdstappen in de simulatie. Er zal data weggeschreven worden telkens op het einde van de winter en het einde van de zomer na 10 jaar en na 20 jaar van continue activiteit.

Om de initiële situatie van het hydraulisch en thermisch model op te zetten werd er rekening gehouden met de gemiddelde grondwaterstand in rust, de geschatte grondwaterstromingsrichting, de gradiënt en een initiële bodemtemperatuur van 10°C aan de oppervlakte. Deze bodemtemperatuur zal volgens de geothermische gradiënt (van $\approx 2.9^\circ\text{C}$ per 100 m) stijgen met de diepte. De distributie van beide parameters aan het begin van de simulatie is voorgesteld in Figuur 3-17.



Figuur 3-17: Overzicht van de hydraulische (boven) en thermische (onder) distributie bij het begin van de simulatie

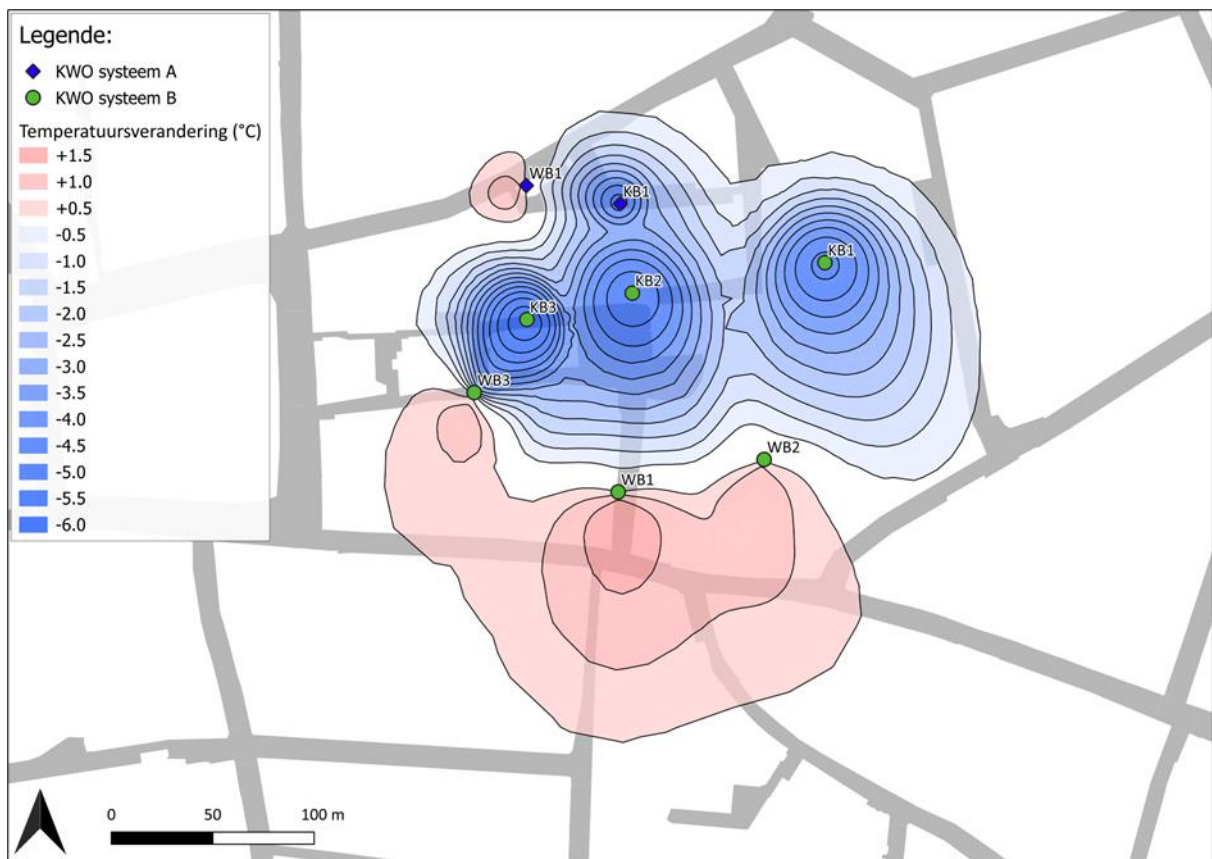
A geological cross-section of the Maastricht area, oriented North (N) to South (Z). The vertical axis represents depth in meters below the surface (mTAW), ranging from 0 to 160. The horizontal axis represents distance in meters, with a scale bar indicating 0, 25, and 50 meters. The cross-section is divided into several geological layers, each color-coded and labeled:

- Quartair Aquifersysteem** (Quaternary Aquifer System): The topmost layer, colored purple, extending from the surface down to approximately 10 meters depth.
- Klei-zand complex van de Kempen** (Clay-sand complex of the Kempen): A layer below the Quaternary, colored green, extending from approximately 10 to 20 meters depth.
- Pleistoceen en Pliocene Aquifersysteem** (Pleistocene and Pliocene Aquifer System): A layer below the Clay-sand complex, colored red, extending from approximately 20 to 40 meters depth.
- Mioceen Aquifersysteem** (Miocene Aquifer System): The bottommost layer, colored teal, extending from approximately 40 to 160 meters depth.

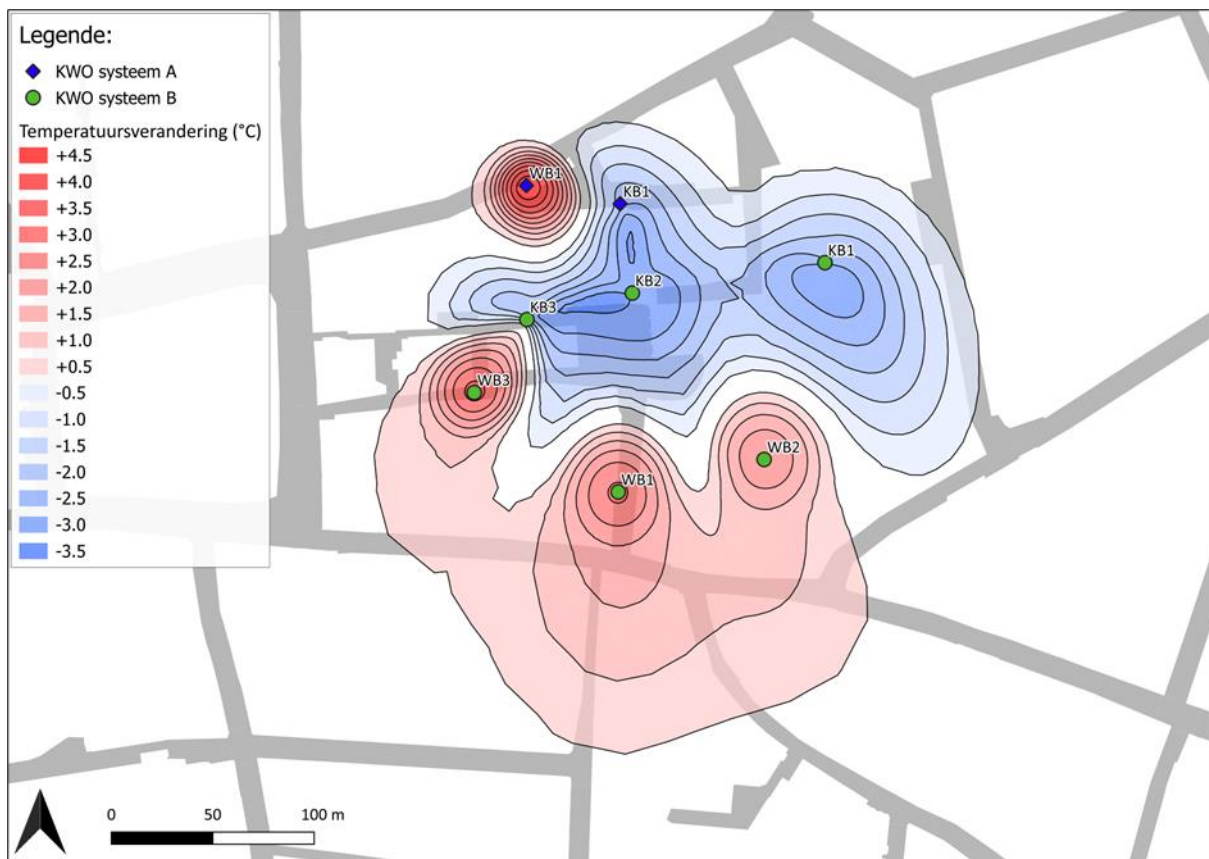
The cross-section shows a complex subsurface structure with various faults and folds. A north arrow is located in the bottom left corner, and a scale bar is in the bottom right corner.

3.3.5.2 Interferentie tussen twee open bron systemen

In de eerste simulaties werden verschillende filter dieptes/lengtes onderzocht van het kleine KWO-systeem (KWO-systeem A) om de interferentie met KWO-systeem B te minimaliseren. Uit deze simulatie is gebleken dat een filter over de volledige dikte van de Formatie van Diest (in dit geval van 60 – 180 m-mv) de beste resultaten gaf. Hierdoor zijn deze filters 60 m langer dan de reeds geplaatste filters in het project van KWO-systeem B en zal de thermische en hydraulische interferentie tussen beide systemen eerder beperkt blijven. Door de koude bron van KWO-systeem A het dichtst bij de koude bronnen van KWO-systeem B te plaatsen, wordt ook hier vermeden dat de warme bron van KWO-systeem A op termijn te hard zal afkoelen. De interferentie tussen beide KWO-systemen (met de meest ideale filtersetting) wordt weergegeven in Figuur 3-19 en Figuur 3-20. In deze figuren wordt de thermische invloedssfeer van beide systemen weergegeven na 20 jaar onafgebroken activiteit, op het einde van het winterseizoen (Figuur 3-19) en op het einde van het zomerseizoen (Figuur 3-20). Deze figuren geven de temperatuursverandering weer ter hoogte van de filters, op 120 m-mv.

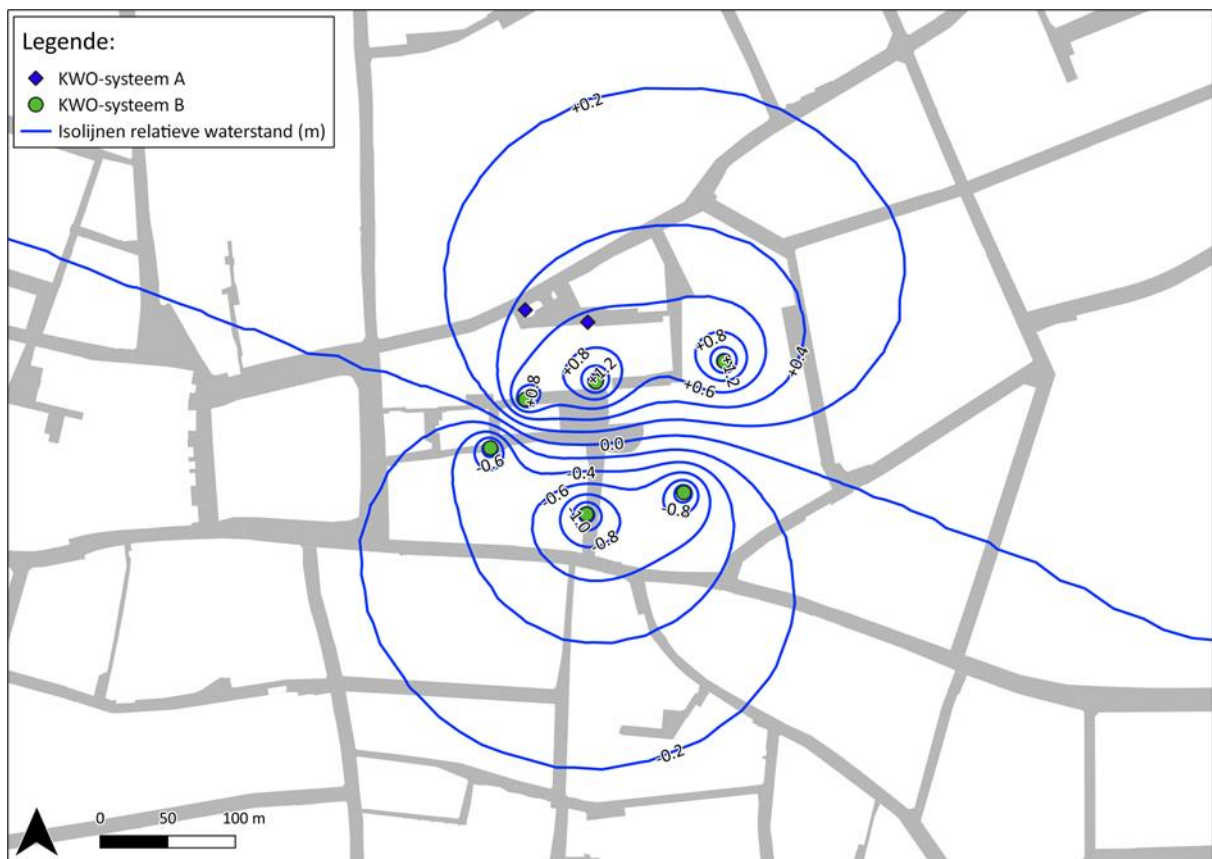


Figuur 3-19: Temperatuursverandering in het Mioceen Aquifersysteem na 20 jaar activiteit (einde winterperiode) – KWO systeem A en B.

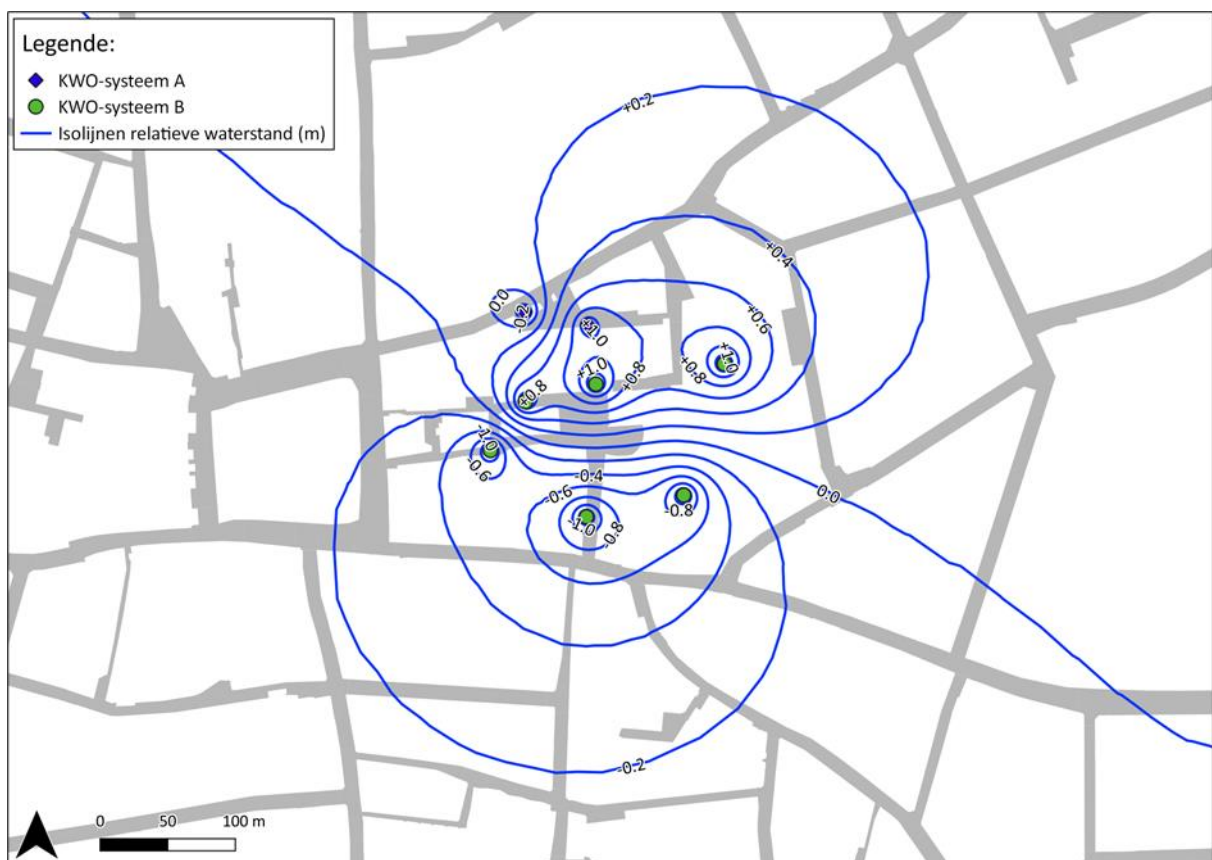


Figuur 3-20: Temperatuursverandering in het Mioceen Aquifersysteem na 20 jaar activiteit (einde zomerperiode) – KWO systeem A en B.

Aangezien beide open bron systemen water onttrekken uit dezelfde aquifer, is het van belang om ook de (cumulatieve) **hydraulische effecten** te bekijken. De hoogste schommelingen in de grondwatertafel zullen voorkomen wanneer één of beide systemen aan maximum debiet water oppompen/injecteren. Deze momenten zullen in de praktijk slechts enkele malen per jaar voorkomen (op heel warme of heel koude dagen). Bovendien zal de aquifer zich nadien terug herstellen naar zijn originele toestand van zodra het debiet terug zakt. De maximale interferentie is dus zeer tijdelijk maar kan cumulatief significant zijn indien beide systemen op hetzelfde moment aan maximum debiet water oppompen/injecteren. In Figuur 3-21 wordt de maximale hydraulische invloed van KWO systeem B op de omgeving weergegeven. In Figuur 3-22 wordt de maximale hydraulische invloed van beide systemen op elkaar en op de naaste omgeving weergegeven. De ruimtelijke verspreiding van de verlaagde/verhoogde grondwatertafel is beperkt. De aanwezigheid van KWO systeem A nabij het KWO systeem B zal de hydraulische impact op de omgeving een beetje groter maken. Ter hoogte van KB2 van KWO systeem B zal er een bijkomende stijging/daling zijn van de grondwatertafel van slechts 20 cm omwille van de nabijheid van KB1 van KWO systeem A. De cumulatieve effecten van beide KWO systemen op elkaar en op de omgeving zijn bijgevolg beperkt.



Figuur 3-21: Maximale hydraulische invloed van KWO systeem B op de nabije omgeving (stijghoogteverschillen in m)

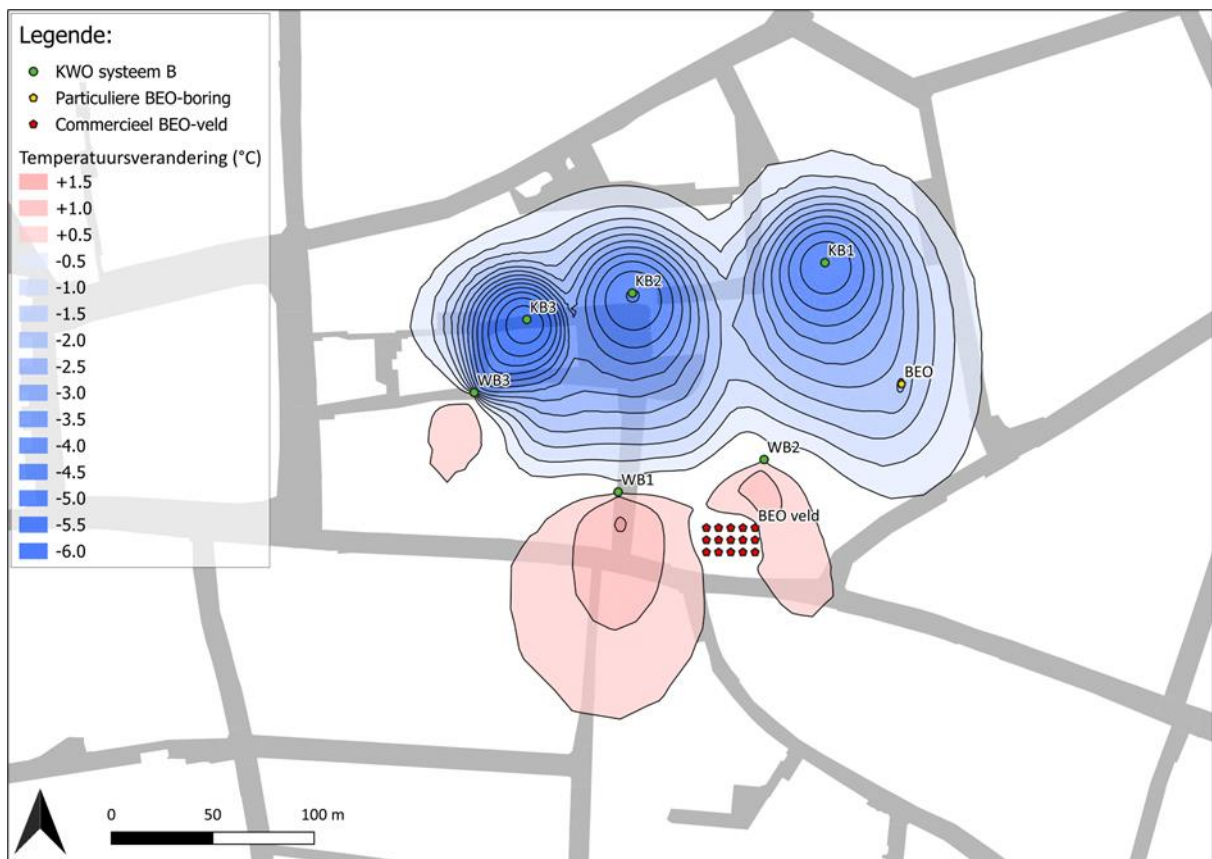


Figuur 3-22: Maximale hydraulische invloed van beide open bron systemen op elkaar en op de nabije omgeving (stijghoogteverschillen in meter).

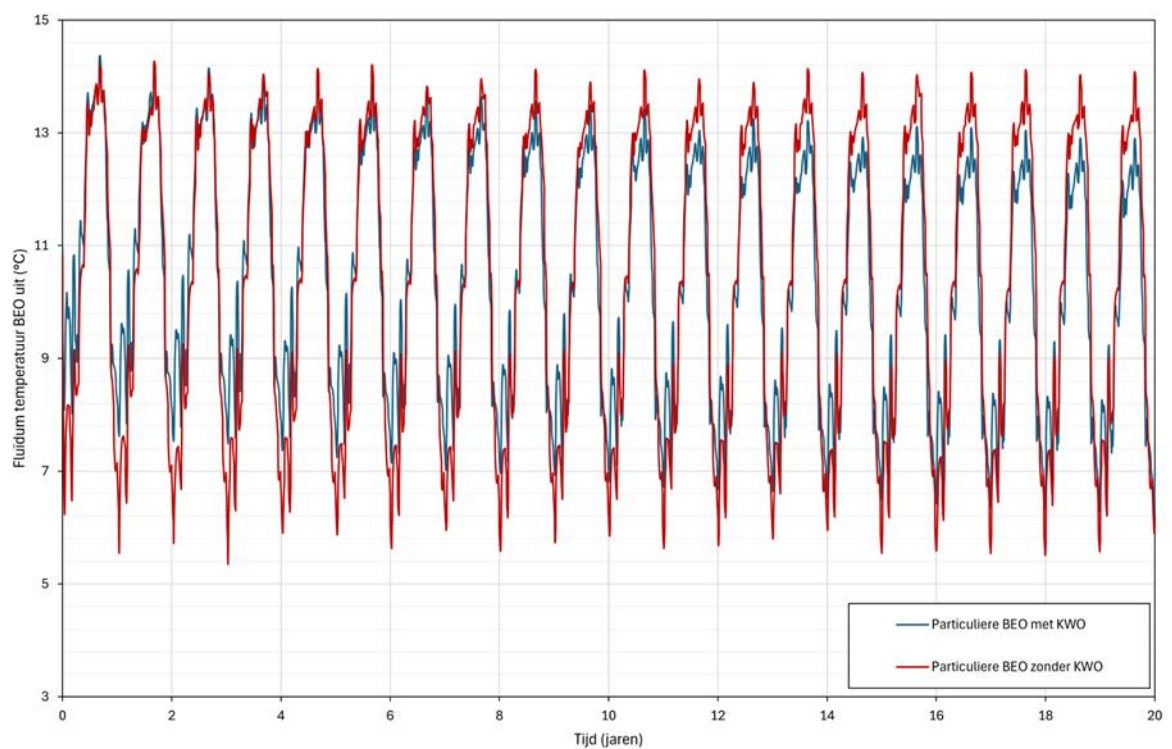
3.3.5.3 Interferentie tussen een open bron systeem en een gesloten bron systeem

Om de interferentie tussen open bron systemen en gesloten bron systemen te onderzoeken, werden er twee simulaties uitgevoerd. De eerste simulatie toont de resultaten van enkel de gesloten bronnen (zowel de particuliere BEO-boring als het commerciële BEO-veld). In de tweede simulatie werd KWO systeem B mee gesimuleerd om de invloed van het open systeem op de gesloten systemen in beeld te kunnen brengen.

Tijdens de winterperiode zal de particuliere BEO boring in de thermische invloedssfeer van KB1 liggen (Figuur 3-23 en Figuur 3-24). Er wordt dus verwacht dat de temperatuur in deze BEO boring lager zal zijn in vergelijking met de situatie zonder de nabijheid van de KWO bron. In Figuur 3-24 wordt de vergelijking gemaakt tussen de vloeistoftemperatuur die uit de BEO-boring komt wanneer de KWO bron wel nabij gelegen is en wanneer niet. De BEO-boring zonder invloed van de KWO zal een redelijk constante gemiddelde vloeistoftemperatuur hebben doorheen de tijd. Wanneer de BEO-boring in de invloedsszone ligt van een koude bron zal er eerder een dalende trend zijn in de gemiddelde vloeistoftemperatuur (Figuur 3-24). Desondanks kan er gezien worden zal de temperatuur in de BEO-boring na 20 jaar tijdens de winter hoger zal zijn in de situatie waarbij de KWO bron aanwezig is. Dit onverwachte resultaat is het gevolg van een verhoogde grondwaterstroming geïnduceerd door KB1 ter hoogte van de BEO-boring. Tijdens de eerste winterperiode van de simulatie zal er water geïnjecteerd worden in KB1 wat ervoor zorgt dat er grondwater met een initiële hogere temperatuur zal weggeduwd worden richting de BEO boring. Dit zorgt ervoor dat de koude die opgebouwd wordt in de BEO-boring tijdens de eerste winter zich sneller zal verplaatsen naar het zuiden (de richting van de grondwaterstroming). De eerste jaren zal dus de BEO-boring positieve effecten ondervinden van de nabijheid van de koude bron omdat een verhoogde grondwaterstroming ervoor zorgt dat de temperatuur rond de boring minder snel zal afkoelen. Op langere termijn (50 of zelfs 100 jaar) zal de BEO-boring hoogstwaarschijnlijk wél de effecten ondervinden van de nabijheid van de koude bron en zal deze bijgevolg meer afgekoeld zijn in vergelijking met een situatie zonder open bron systeem nabij. Omgekeerd heeft de particuliere BEO-boring verder geen (thermische) invloed op KB1 van KWO systeem B.

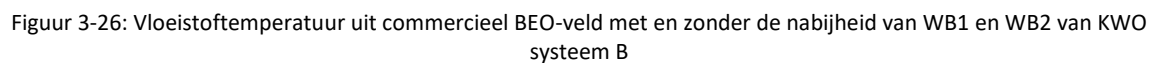


Figuur 3-23: Temperatuursverandering in het Mioceen Aquifersysteem na 20 jaar activiteit (einde winterperiode) – KWO systeem B en BEO boringen



Figuur 3-24: Vloeistoftemperatuur uit particuliere BEO-boring met en zonder de nabijheid van KB1 van KWO systeem B

pagina 76 van 158



3.3.5.4 Conclusions

Een groot BEO-veld kan een kleine positieve impact hebben nabij koude bronnen van een open systeem en een kleine negatieve impact hebben nabij warme bronnen van een open systeem. **De impact van gesloten systemen op open systemen is meestal eerder beperkt. Omgekeerd kunnen open systemen een impact hebben op gesloten systemen, ook op grotere afstanden, afhankelijk van de grootte van het open systeem.** Onze case studie illustreerde dat de impact van open- op gesloten systemen niet noodzakelijk negatief is: omwille van de verhoogde grondwaterstroming die open systemen met zich meebrengen kunnen de prestaties van gesloten systemen net verbeteren. Dit effect zal vooral spelen bij gesloten systemen op ruimere (> 100 m) afstand van open systemen. De invloed die open geothermische systemen op elkaar uitoefenen is groter aangezien open systemen

3.3.6 Interferentie tussen geothermische systemen: wetgeving in Nederland

De afstand tot een nabijgelegen open of gesloten geothermisch project wordt als significant beschouwd wanneer het binnen het zoekgebied ligt. Dit zoekgebied wordt bepaald aan de hand van volgende regel: **zoekgebied = 250 + 0.5*L**, waarbij L de afstand tussen het middelpunt van de koude bron(nen) en het middelpunt van de warme bron(nen) is. Wanneer er vanaf een afstand van 500 m van het middelpunt van het nieuwe open geothermisch systeem een KWO bevindt die grondwater onttrekt uit dezelfde watervoerende laag en een vergund debiet heeft van $\geq 1.000.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$, moet deze bijkomend opgenomen worden in de effectenstudie.

Als uit de vereenvoudigde of de uitgebreide effectenstudie blijkt dat het nieuwe open systeem mogelijks negatieve invloed zal hebben op een bestaand of vergund systeem, zal er een beoordeling op maat gevormd worden door de vergunningverlenende instantie. **Een gesloten geothermisch systeem zal slechts beschouwd worden als nadelig beïnvloed door een open geothermisch systeem wanneer de temperatuur in het centrum van het BEO-veld daalt met meer dan 1.5°C.** Wanneer niet aan dit criterium wordt voldaan, moet de vergunningsaanvrager kunnen staven waarom de temperatuurdaling geen nadelige gevolgen zal hebben voor de werking van het bestaande gesloten systeem (SIKB, 2023a).

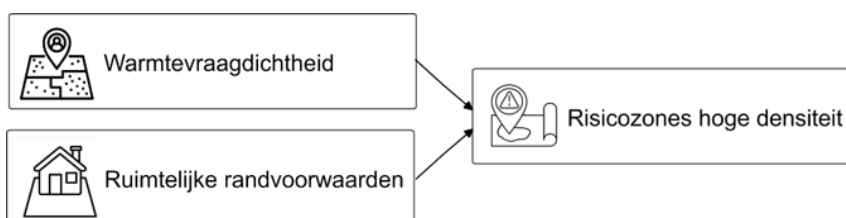
3.4 RUIMTELIJKE DIVERSIFIËRING IN VLAANDEREN: WAAR WORDEN PROBLEMEN VERWACHT ALS GEVOLG VAN EEN HOGE DENSITEIT AAN GEOTHERMIESYSTEMEN?

Hoewel de problematiek met betrekking tot de hoge densiteit aan systemen zeer relevant is, valt te verwachten dat ze in Vlaanderen slechts op specifieke locaties concreet aanleiding zal geven tot problemen. In het bijzonder voor gesloten systemen kan gesteld worden dat in een rurale context, gekenmerkt door open en halfopen bebouwing met individuele tuinen, de thermische invloedstraal van individuele systemen zich veelal zal beperken tot binnen de perceelsgrenzen. Echter, paragraaf 3.3.3 illustreerde reeds dat in een meer urbane context met veel hoogbouw waar steeds vaker grote systemen met tientallen putten worden geïnstalleerd, het cumulatieve effect significant kan worden. Daarnaast vormen ook industriële gebieden risicozones, aangezien er daar bedrijven clusteren met een hoge warmte- of koudevraag. Deze industriële gebieden vallen buiten de scope van deze analyse

Om vanuit een beleidsstandpunt concrete aanbevelingen te kunnen doen met betrekking tot dit onderwerp in Vlaanderen is het van belang om een zo goed **mogelijk inzicht te verwerven in de risicozones waar problemen gelinkt aan een hoge dichtheid verwacht kunnen worden**. Voorliggend project ontwikkelt een methode die toelaat om, gegeven de juiste inputdata, dergelijke risicozones in kaart te brengen. We focussen ons hierbij specifiek op interferentie gelinkt aan gesloten geothermische systemen.

De risicozones worden in kaart gebracht op basis van twee factoren:

1. Informatie over de warmtevraagdichtheid
2. Informatie over de ruimtelijke randvoorwaarden voor geothermische systemen (bijvoorbeeld: hoe kleiner de percelen, hoe groter het risico op interferentieproblemen)



Figuur 3-27: Methode voor het in kaart brengen van de risicozones voor interferentie van geothermische systemen in Vlaanderen

3.4.1 Warmtevraagdichtheid

De basisaanname voor het eerste criterium is dat hoe hoger de warmtevraagdichtheid, hoe meer risico er is op interferentie. Hierbij kunnen we opmerken dat deze zones ook kunnen gezien worden als zones met een hoger potentieel voor warmtenetten, aangezien in deze zones warmte efficiënt verdeeld kan worden.

Voor de concrete opmaak van een warmtevraagdichtheidskaart maken we in eerste instantie gebruik van de warmtevraag per straatdeel voor kleine verbruikers uit de Warmtekaart Vlaanderen. Deze kaart is gebaseerd op de verbruiksdata van Fluviusklanten gerapporteerd in 2019, die via een herschalingsfactor omgevormd werd om de situatie in 2022 in te schatten. Ook de warmtevraag van grootverbruikers werd geïncorporeerd. Deze informatie wordt vertaald naar de **warmtevraag per gebouw** op basis van de vloeroppervlakte van de gebouwen. De methode wordt verderop beschreven.

In de toekomst zal er een meer gedetailleerde indicatie van de warmtevraag per gebouw beschikbaar gesteld worden in de wijkrenovatietool. De wijkrenovatietool ([project Digital Twin Wijkrenovatietool - EnergyVille](#)) is een door EnergyVille ontwikkelde tool die ook rekening houdt met informatie over de kenmerken van gebouwen (voornamelijk geometrie, bouwjaar en renovatiestatus) bij de inschatting van de warmtevraag per gebouw. De warmtedata uit dit project waren echter niet tijdig beschikbaar voor alle gebouwen van Vlaanderen voor de voorliggende studie. Voor de oefening in deze studie is de vereenvoudigde vertaling naar warmtevraag per gebouw ook voldoende om de algemene risicozones voor interferentie in kaart te brengen.

Operationalisering:

Basisdata:

- Gebouwen: GRB, laag Gbg, toestand 2022
- Warmtekaart met warmtevraag kleinverbruikers (≤ 200 MWh/jaar), per wegsegment (geaggregeerd op het niveau van minstens 5 verbruikers), versie 2019 (eenheid KWh/jaar)
- Warmtevraag grootverbruikers versie 2019 (eenheid: GWh/jaar)

De warmtevraag van de **kleinverbruikers** per straatsegment wordt vertaald naar de warmtevraag per gebouw evenredig met de vloeroppervlakte van de gebouwen die aan het straatsegment grenzen. De gebouwen zijn degene die in de GBG laag van het Grootschalig Referentiebestand (GRB) opgenomen zijn.

De warmtevraag van de **grootverbruikers** (> 200 MWh/jaar) zijn enkel beschikbaar in de volgende klassen:

- 0.2 - 1 GWh/jaar
- 1 - 20 GWh/jaar
- 20 - 200 GWh/jaar
- > 200 GWh/jaar

Daarom wordt voor de grootverbruikers telkens de ondergrens van de klasse toegevoegd. Dit is in sommige gevallen een grote onderschatting, maar door de definitie van de hoogste klasse (> 200 GWh/jaar) is het niet mogelijk om met het midden of het maximum van de klasse te werken. Daarenboven zijn alle grootte-orde van de grootverbruikers zo veel maal groter dan de kleinverbruikers (gemiddeld verbruik van een gezin is eerder 0.017 GWh), dat de aanwezigheid van een grootverbruiker van belang is voor deze studie, meer dan de exacte warmtevraag ervan.

3.4.2 Ruimtelijke randvoorwaarden

Naast de warmtevraagdichtheid kunnen een aantal randvoorwaarden bepalen of er al dan niet risico is op interferentie. De operationalisering van deze randvoorwaarden is sterk afhankelijk van het specifieke scenario waarvoor een kaart gewenst is, én van de data die beschikbaar is.

In dit geval maken we een kaart die risicozones op interferentie weergeeft uitgaande van de installatie van individuele, gesloten geothermische systemen in een urbane context. We beschouwen hierbij zowel klein- als grootverbruikers als potentiële warmte-afnemers.

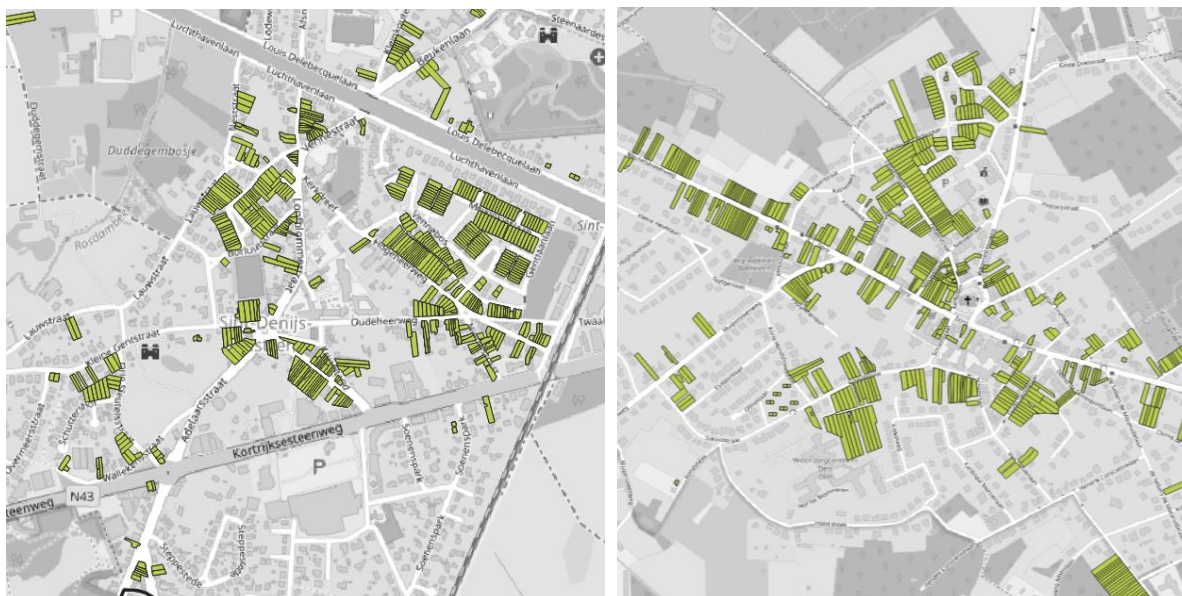
Geometrie van de percelen: Er is interferentie tussen gesloten systemen wanneer de thermische invloedstralen van verschillende systemen mekaar overlappen. In dit project wordt een vaste straal van 5 meter verondersteld als cutoff waarde voor het interferentierisico.

Als er op het midden van een perceel geboord wordt, dan is er bij percelen smaller dan 10 meter mogelijk interferentie met systemen van de burens. Het is te verantwoorden om dit uit te breiden naar **percelen smaller dan 15m** als we ervan uitgaan dat boringen niet steeds perfect in het midden van het perceel geplaatst worden. De richtlijnen met betrekking tot de afstand tot verschillende bouwwerken of de perceelsgrens die vereist zijn, zijn zeer beperkt. In de technische voorlichting rond

Structuurdelen	
Gevel	0,5
Funderingselementen	1,5
Nutsleidingen	
Ondergrondse niet-watervoerende leidingen	1,5
Drinkwaterput	5
Septische put	5
Aanvoer stadsnet waterleiding	3
Riolering	3
Andere elementen	
Perceelgrens	0,5
Bomen	5

Gebouwtype: gezien de technische moeilijkheden om te boren in de vaak onbereikbare tuin van gesloten bebouwing, zou dit gebouwtype eventueel uit de risicozones weggelaten kunnen worden. De kans is namelijk klein dat er een individueel geothermie-systeem geplaatst kan worden. Echter, in een eerste benadering lijkt het ons geen grote meerwaarde om deze opdeling toe te voegen. Enerzijds kan er in de toekomst misschien meer mogelijk worden, anderzijds gelden zulke technische beperkingen ook soms voor halfopen bebouwing en kunnen we in een Vlaanderen brede oefening geen rekening houden met elke specifieke lokale situatie. Ook voor hoogbouw is er geen aparte categorie voorzien omdat de hogere vraag van appartementen in de warmtevraag vervat zit. Voor appartementen of ander landgebruik met een hogere warmtevraag zou verwacht kunnen worden dat er ook bij bredere percelen risico's op interferentie zijn. Echter, er is geen consensus over de drempelwaarden qua warmtevraag en interferentie-buffer om het in deze oefening als een aparte categorie te beschouwen.

- Als basislaag voor de percelen worden de kadastrale percelen van Vlaanderen genomen (toestand 2022).
- We gaan ervan uit dat percelen smaller dan 15m gevoelig zijn voor interferentie met de burelen. Zones met minstens 3 opeenvolgende percelen van smaller dan 15 m worden aangeduid als risicozone voor interferentie.



inzicht geven in zones waaraan extra aandacht besteed dient te worden in lokale warmteplannen: als gebieden met een hoog interferentierisico overlappen met zones die ingekleurd werden als zones waar individuele elektrische oplossingen het meest geschikt zijn kan een lokale overheid opteren om A) in deze zones extra toe te zien op een correcte plaatsing van de bronnen⁵ en het opleggen van strengere regeneratie-vereisten of B) dergelijke zones alsnog in te kleuren als eerder geschikt voor een collectief systeem.



Figuur 3-30: Risicozones hoge dichtheid (lineaire continue schaal in kWh), voorbeeld voor Leuven centrum.



Figuur 3-31: Risicozones hoge dichtheid, in 5 klassen van laag risico (blauw) tot hoog risico (rood) voor (a) Vlaanderen met gemeentegrenzen versie 2022 en detailvoorbeelden voor de centra van (b) Leuven en (c) Bonheiden.

De resultaten tonen dat de risicozones zich vooral in stadscentra bevinden (veel smalle percelen). De inkleuring van de risicoklassen wordt, terecht, sterk beïnvloed door de aanwezigheid van

⁵ Bijvoorbeeld in stadscentra met smalle, maar zeer lange percelen kan een slimme inplanting van bronnen interferentierisico's sterk verkleinen

- De milieu-effecten als gevolg van temperatuursveranderingen en mixing beschouwen we als minder belangrijk, behoudens er rekening gehouden wordt met de redoxgrens bij het plaatsen van filters in open systemen.

De vraag stelt zich bijgevolg wat er nodig is om scenario's te vermijden waarbij er problemen kunnen ontstaan door de interferentie tussen geothermische systemen die in elkaars buurt liggen. Het is daarbij uiteraard belangrijk om te weten welke factoren bepalen of negatieve interferentie een potentieel probleem kan vormen.

Om toe te laten het risico op interferentie tussen de verschillende naburige geïnstalleerde (uit het verleden) en te installeren (in de toekomst) geothermische systemen in te schatten, is het cruciaal dat er aangepaste en correcte informatie beschikbaar is over deze systemen. Het is daarbij zinvol om enkel de nuttige en nodige informatie te delen, zonder onrealistisch uitgebreide datasets te moeten verzamelen per project. Het is belangrijker om cruciale informatie beschikbaar te hebben eerder dan extra informatie die weinig bijdraagt bij de impactanalyse. De gewenste informatie dient makkelijk én snel beschikbaar gesteld te kunnen worden door de juiste personen, zodat onvolledigheden en fouten in de databank maximaal vermeden worden.

3.5.1.1 Open geothermische systemen

pagina 86 van 158

klasse 2 (gemeente). In het kader van de vergunningsprocedure werd voor de huidige bestaande projecten een impactanalyse uitgevoerd met alle relevante aspecten naar invloed op de omgeving (hydraulisch, thermisch en eventueel naar verontreiniging toe).

In het kader van een potentiële interferentieproblematiek is het noodzakelijk om na goedkeuring van een project, bij de planning van een nieuwe geothermische installatie in de buurt van een bestaand systeem, cruciale informatie over de bestaande installatie te vergaren. Het gaat dan over volgende aspecten :

- vergund jaarvolume (wél steeds beschikbaar);
- watervoerende laag (wél steeds beschikbaar);
- exacte locatie van de putten;
- type putten (warme/koude bron of onttrekkings-/injectiebron);
- filterstelling in alle bronnen (top-bodem ten opzichte van maaiveld);
- boor-/filterdiameter;
- bodemzijdig belastingsprofiel (warmteonttrekking/-injectie in MWh/jaar);
- broncapaciteit (maximaal pompdebiet in m³/u);
- thermische invloedstraal;
- hydraulische invloedstraal.

Deze informatie is wél beschikbaar bij de meeste vergunningsaanvragen van de betreffende KWO systemen in het vergunningsdossier (sinds 2015 digitaal op het omgevingsloket en voorheen op papier), maar is nadien niet langer te raadplegen. Het is aangewezen om de cruciale elementen uit de bestaande dossiers beschikbaar te stellen op Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV) voor toekomstige analyses in het kader van de interferentieproblematiek. Momenteel dient er in voorbereiding van een nieuwe installatie, een zoektocht opgezet te worden naar informatie omtrent naburige bestaande KWO systemen bij boorfirma's of studie bureaus.

Uiteraard is het eveneens aangewezen om dezelfde informatie ook voor nieuwe, toekomstige projecten beschikbaar te maken op DOV voor interferentie-analyses.

3.5.1.2 Gesloten geothermische systemen

Voor de gesloten systemen is er meestal géén vergunningsprocedure nodig, het overgrote deel (>99%) van de installaties zal zich immers houden aan het dieptecriterium volgens VLAREM 55.1 uit 2013 waarbij de installatie van verticale sondes géén enkele vergunningsformaliteit dient te ondergaan. Enkel boorbedrijven met een VLAREL-erkenning kunnen deze boringen uitvoeren en zij zijn wél degelijk verplicht om de boringen aan te geven (aanmelding 2 dagen voor de werken en inventaris binnen 2 maand na de werken). De inventaris biedt inzicht in de karakteristieken van de geïnstalleerde boringen, hiervoor is op dov.vlaanderen.be het e-DOV loket Meldpunt Boringen opgezet (achter login). De boorfirma kan hierin alle informatie melden over de geïnstalleerde geothermische boringen. Dit omvat naast het klassieke boorrapport met lithologische beschrijving (beschikbaar op DOV voor alle boringen, ook voor andere doeleinden) ook een fiche met extra informatie (ligging, boorstaatgegevens, namen, grondwaterstanden, wettelijk kader, interpretaties, monsters, opmerkingen en bijlagen). In de fiche is de ligging en de geologische interpretatie beschikbaar en meestal ook een formulier met detailinfo over de boring alsmede eventueel een plan met de boorlocaties.

Hoewel het verplichte meldpunt op DOV vele mogelijkheden biedt om uitgebreid informatie te delen over de aangelegde boringen, ontbreken er soms elementen in de beschikbare dossiers. In het kader van een potentiële interferentieproblematiek is informatie nodig over :

- De Beschikbare tool laat wel de mogelijkheid om het aantal en de locaties van de boringen in te geven, maar in de praktijk is het vaak moeilijk om deze informatie te verifiëren. Het is ook niet duidelijk of het mogelijk is om vanuit het achterliggende X/Y coördinatensysteem, waarop de boringen ingetekend kunnen worden, de coördinaten van de boorlocaties bewaard worden. Indien meer dan één boring, worden deze alvast niet steeds beschikbaar gesteld in DOV. In sommige gevallen wordt wél degelijk aangegeven dat er meerdere boringen zijn geplaatst, maar is er enkel een handmatig of digitaal getekend plan beschikbaar met de boorlocaties (al dan niet met maatvoering). In een enkel geval is er sprake van meerdere boringen maar is er slechts info over één boorlocatie. Zoals eerder in dit rapport aangehaald, is bij de opkomst van geothermie in Vlaanderen (tussen 2000 en 2013) het aantal geïnstalleerde systemen jaar na jaar gegroeid en werd niet alle informatie over deze systemen goed bewaard. Een aantal van de oudere systemen is dan ook niet terug te vinden op DOV (papierenvergunningen). Ook achteraf zijn er nog systemen die niet of foutief gemeld zijn en die ontbreken op het platform.

Uiteraard is het ook hier sterk aan te bevelen om dezelfde informatie ook voor nieuwe, toekomstige projecten beschikbaar te maken op DOV voor interferentie-analyses. Speciale aandacht wordt hierbij gevraagd voor het bodemzijdig belastingprofiel, deze informatie ontbreekt momenteel volledig. In de meeste gevallen kan deze informatie echter relatief makkelijk toegevoegd worden door de boorfirma, gezien zij het ontwerp van de geothermische boringen (aantal/diepte/afstand) baseren op een behoefteprofiel (bv. af te lezen uit een EPB verslag of bij renovatie gebaseerd op historische verbruiksgegevens). In dit profiel is het belangrijk te weten hoeveel warmte enerzijds onttrokken wordt en anderzijds geïnjecteerd wordt op jaarbasis. Vooral de mate van onevenwicht (balans) heeft een grote impact op de invloedzone van een geothermisch systeem.

⁶ Hier kan het gps-volgsysteem dat via de VLAREM regelgeving verplicht wordt mogelijks efficiëntie-opportunities opleveren.

Vlaamse overheid hierin algemene richtlijnen meegeven of opleggen om een uniforme strategie voor Vlaanderen te hanteren.

4.1 DEFINITIES EN SCOPE

De haalbaarheid van een collectief systeem is echter afhankelijk van een aantal technische, financiële, organisatorische en juridische randvoorwaarden. In deze deeltaak wordt een analyse gemaakt van deze aspecten. We besteden daarnaast ook specifiek aandacht aan een aantal Vlaamse cases die reeds operationeel zijn, of in de ontwerpfase zitten.

Een collectief systeem wordt in deze studie gedefinieerd als een **gedeeld systeem dat de thermische energie opgeslagen in de aarde of het grondwater aanwendt om verwarming en/of koeling te leveren aan meerdere gebouwen of structuren**. Het maakt hiervoor gebruik van één of meerdere geothermische warmtepompen en verspreidt de energie via (ondergrondse) leidingen. Onder collectieve geothermiesystemen worden ook systemen beschouwd die naast geothermie ook gebruik maken van andere warmtebronnen (restwarmte, riothermie, aquathermie, etc.)

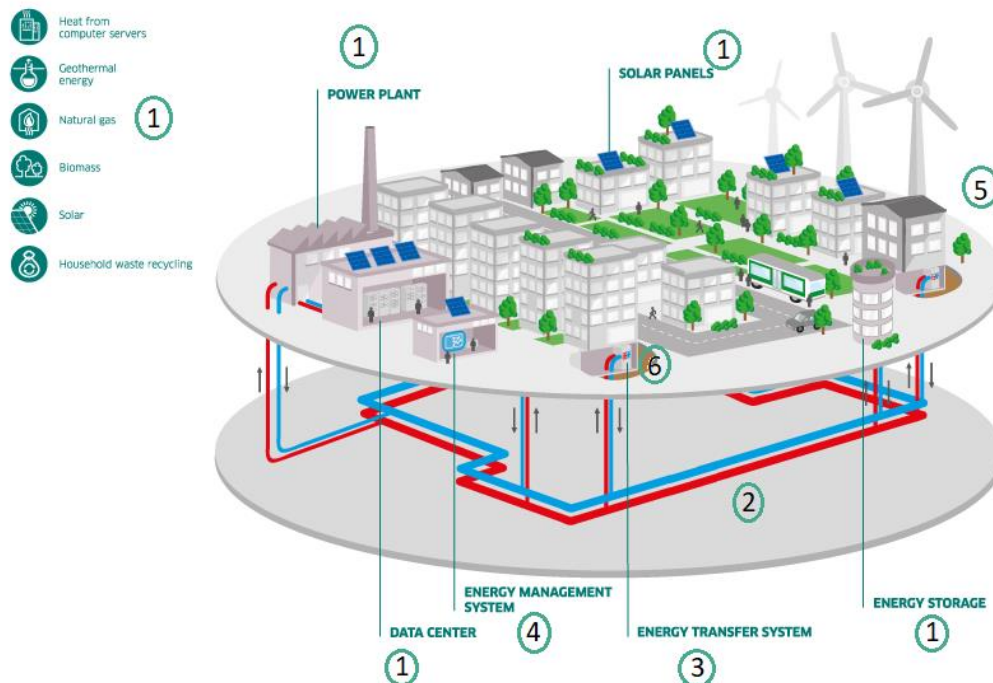
Het regulerend kader is van toepassing voor alle systemen die vallen onder de definitie van warmte- of koudenet in het Energiedecreet, art. 1.1.3.,133/2°: *geheel van onderling verbonden leidingen en de daarmee verbonden hulpmiddelen die noodzakelijk zijn voor stadsverwarming of -koeling, met uitsluiting van netwerken op een industriële site.* Stadsverwarming of -koeling wordt gedefinieerd als: *de distributie van thermische energie in de vorm van stoom, warm water of gekoelde vloeistoffen vanuit een centrale productie-installatie via een netwerk dat verbonden is met meerdere gebouwen of locaties, voor het verwarmen of koelen van ruimten of processen.*

Een eerste categorie is een collectief systeem op perceelniveau. Zo kan bijvoorbeeld een appartementsgebouw verschillende wooneenheden bevatten en een centrale stookplaats hebben. Hierbij wordt ook vaak gesproken van een collectief verwarmingssysteem. Deze vallen bij deze studie buiten de scope.

In dit rapport richten we ons op het uitwisselen van energie tussen verschillende percelen. Deze percelen kunnen een verschillende mix van invullingen hebben voor gebruik: residentieel, kantoor, zorg, industrieel, De focus in deze studie ligt op de eerste drie categorieën omdat ze over het algemeen vergelijkbare en meer beheersbare energiebehoeften hebben en een relatief lage energievraag. Industriële afnemers, met hun vaak aanzienlijk hogere en complexere energievereisten, vallen buiten de scope van dit onderzoek, omdat de dynamiek en omvang van hun energieverbruik een aparte, gespecialiseerde benadering vereist.

4.1.2 Kernelementen collectieve systemen

Een collectief systeem omvat steeds een aantal componenten, die voldoende op elkaar afgestemd dienen te worden :



Figuur 4-1: Illustratie van de verschillende componenten van een collectief geothermisch systeem. Aangepast van: <https://www.thermalearth.co.uk/blog/172/What-is-a-District-Heating-Network>

1. **Centrale of decentrale energiebron(nen):** Er moet een (de)centrale energiebron zijn. Dit kan gas, elektriciteit, warmtepompen, biomassa, restwarmte of een combinatie van verschillende bronnen zijn. In deze studie focussen we ons op ondiepe geothermie als energiebron, afkomstig van open of gesloten systemen. Hierbij zijn verschillende varianten mogelijk, waarbij gebruik gemaakt kan worden van één energiebron, of waarbij meerdere energiebronnen gecombineerd worden. De warmte die onttrokken wordt aan de bodem heeft een temperatuur van minder dan 20°. Er moet daarom steeds een warmtepomp gebruikt worden om de temperatuur te verhogen. De nodige temperatuursverhoging is zeer sterk afhankelijk van het type verwarmingssysteem (radiatoren vloerverwarming, ventilo-convectoren,...) (zie 6.) en van de isolatiegraad van de bouwschil (zie 5.). Er kan daarbij onderscheid gemaakt worden tussen oplossingen die gebruik maken van één collectieve centrale warmtepomp, en oplossingen met meerdere individuele (decentrale) warmtepompen.
2. **Distributiesysteem:** Een effectief distributiesysteem of warmtenet is essentieel om energie van de (de)centrale bron(nen) naar verschillende gebouwen, verdiepingen of ruimten te transporteren. Hierbij kan er gewerkt worden met geïsoleerde buizen, maar recent worden er vaker niet-geïsoleerde HDPE-buizen toegepast.
3. **Warmtewisselaars:** In gebouwen of eenheden zijn warmtewisselaars nodig om de warmte van het distributiesysteem over te brengen naar het verwarmingssysteem van de individuele

eenheden. Ook hier kan er een onderscheid gemaakt worden tussen systemen met één centrale warmtewisselaar of systemen met meerdere substations.

4. **Regel- en Controlesystemen:** Om de temperatuur en het comfort te regelen, zijn regel- en controlesystemen nodig. Deze systemen kunnen thermostaten, kleppen, pompen en andere apparatuur omvatten die de werking van het systeem beheren.
5. **Isolatie:** Goede isolatie in het hele gebouw is belangrijk om energieverlies te minimaliseren en de efficiëntie van het collectieve systeem te optimaliseren.
6. **Afgiftesystemen:** De manier waarop warmte/koude wordt afgegeven in individuele ruimten kan variëren. Dit kan gebeuren via radiatoren, vloerverwarming, convectoren of andere methoden, afhankelijk van de ontwerpvoorkeuren en vereisten. Deze afgiftesystemen bepalen in grote mate het gewenste temperatuursprofiel van collectieve systemen, hetgeen kan variëren van zeer lage temperatuurs-oplossingen van 15°C tot hogere temperatuurs-netten van 40°C.

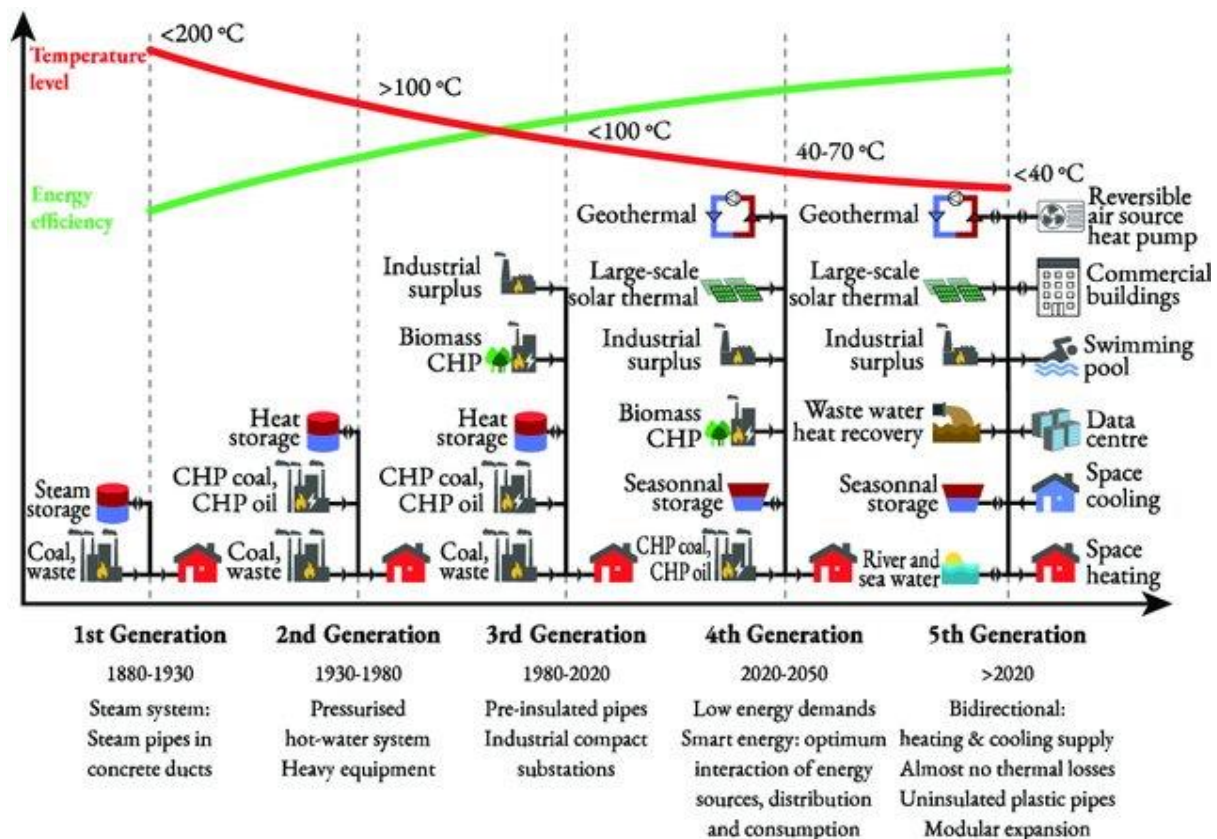
4.1.3 Variaties aan collectieve systemen

In bovenstaand voorbeeld wordt een typische setup voorgesteld van een collectief systeem waarbij een aantal bronnen en verbruikers aan elkaar gekoppeld worden via een thermisch net.

Het scala aan technische oplossingen voor een collectief systeem is breed en de verscheidenheid aan oplossingen wordt weergegeven in onderstaande figuur.

Uit onderstaande figuur kunnen verschillende samenstellingen van collectieve systemen worden afgeleid. Enkele voorbeelden:

- Een appartementsgebouw met een centrale stookplaats met een gasboiler waarbij via een interne leiding de warmte gebracht wordt naar verschillende appartementen (radiatoren).
- Een nieuwbouwproject met een centraal BEO-veld dat via een mini warmtenet energie levert aan 10 vrijstaande gebouwen met vloerverwarming



Figuur 4-3: Evolutie van de verschillende generaties warmtenetten (Bron: Abugabbara, Marwan. (2021). Modelling and Simulation of the Fifth-Generation District Heating and Cooling. 10.13140/RG.2.2.18483.96809)

Oplossingen met geothermie lenen zich het beste tot de zogenoemde 5GDHC warmtenetten. 5GDHC staat voor 5^e Generatie District Heating and Cooling. De 5 principes zijn:

- De energiekringloop sluiten, om energieverstopping te voorkomen.**
Elke keer als je een gebouw koelt, kun je die warmte gebruiken om ergens anders of later een gebouw te verwarmen (bidirectionaliteit).
- Gebruik van laagwaardige bronnen voor laagwaardige vraag.**
Het verwarmen van een ruimte is zo ongeveer de meest laagwaardige energie die bestaat. Hoogwaardige energiebronnen moeten eerst voor hoogwaardige doelen worden ingezet, zoals chemische processen of het aandrijven van vliegtuigen. Pas als een energiebron écht nergens anders meer voor gebruikt kan worden, kan het gebruikt worden om gebouwen te verwarmen.
- Warmte op de gewenste temperatuur brengen precies op de plek waar en het tijdstip waarop dat nodig is.**
Energie wordt geleverd waar het gevraagd wordt, op de temperatuur die gevraagd wordt, en zoveel als gevraagd wordt. Geen overproductie om de circulatie op gang te houden, en geen seizoensgebonden beperkingen.
- Een geïntegreerde aanpak van energiestromen.**
Energiesystemen zoals warmte, elektriciteit en andere stromen zoals waterstof, stoom en biomassa verwerken in één systeem.
- Lokale bronnen als prioriteit.**
Lokale warmtenetten hoeven de elektriciteit van de warmtepompen niet van windturbines op zee te halen. Door het systeem slim vorm te geven, kunnen ze helemaal draaien op lokaal geproduceerde energie.



Floating warm and cold water temperatures



De keuze voor een collectief systeem gebeurt altijd in vergelijking met een individueel systeem. Hieronder worden voor de verschillende type afnemers de collectieve oplossing en de individuele oplossing langs elkaar gezet. De industriële oplossing vraagt hogere temperaturen waardoor er hiervoor nog vaak naar een op gas gebaseerde oplossing wordt gekeken. In deze studie zal onderzocht worden in welke scenario's collectieve systemen te verkiezen zijn boven individuele oplossingen.

Tabel 4-1: Mogelijke collectieve versus typisch gekozen individuele oplossingen voor verschillende types afnemers.

In dit onderdeel werden een aantal Vlaamse cases van collectieve geothermische systemen geselecteerd. De selectie gebeurde op basis van enerzijds technische criteria (open vs gesloten systemen; type afnemer) en anderzijds organisatorische/juridische criteria (uitbatings- en eigenaarsmodel). Ook werd er rekening gehouden met de beschikbaarheid van informatie over de sites. Op basis van de initiële long list van potentiële cases en de input van de stuurgroep werden finaal 5 projecten geselecteerd.

pagina 99 van 158

Voor iedere case worden dus de technische aspecten, de organisatorische set-up, de juridische beperkingen/kaders en het financiële aspect besproken.

De 5 geselecteerde sites zijn de volgende:

	BEO	KWO	Residentieel	Kantoor	Zorg/school	Retail
CollecThor		x		x		
Keerdok	x		x			
Cordium	x		x			
Hertogensite	x		x	x	x	x
Quartier Bleu		x	x	x		x

Tabel 4-2: Bron- en gebruikersvarianten van de verschillende cases. Een aantal cases maakt naast geothermie ook gebruik van andere warmtebronnen

De VREG definieert een aantal rollen in de uitbating van een warmtenet. In dit geval is het een thermisch net dat zowel koude als warmte levert, maar de naamgeving is nog sterk verbonden aan de naamgeving bij warmtenetten. Bij de 5 cases is de rolverdeling als volgt:

<i>Rol</i>	<i>CollecThor</i>	<i>Cordium</i>	<i>Hertogensite</i>	<i>Keerdok</i>	<i>Quartier Bleu</i>
Warmtenetbeheerder	Fluvius	WIL	niet gekend	ESCO ⁸	Geiser
	Thethys	WIL	niet gekend	Aquafin+ESC	Geiser
warmteproducent	CollecThor			O	
	Thethys	WIL	niet gekend	ESCO	Geiser
warmteleverancier	CollecThor				

4.2.1 CollecThor (Genk)

Algemeen

Warmte en koude zijn belangrijke energiedragers in de transitie naar een volledig hernieuwbare energievoorziening. Een groot deel van de primaire energie wordt vandaag immers gebruikt om gebouwen te verwarmen en te koelen. Daarnaast wordt er op grote schaal ingezet op de elektrificatie van het energiesysteem en om deze transitie mogelijk te maken moet de flexibiliteit die inherent aanwezig is in thermische netwerken en de aangesloten verwarmingssystemen optimaal benut worden. Het 5^{de} generatie thermische netwerk op het Thorpark wil een antwoord bieden op deze uitdagingen. De bestaande gebouwen (Thor Central, Incubathor, EnergyVille 1 en 2) en de nog op te richten gebouwen (in totaal 8 kavels) zullen aangesloten worden op dit netwerk.

Technisch

De bedoeling is om de gebouwen duurzaam te verwarmen en te koelen via ondiepe geothermie en tevens maximaal restwarmte en -koude onderling uit te wisselen. Momenteel zijn er 3 KWO bronparen aanwezig, met een diepte van 75m die werken aan een debiet van 50 m³/h.

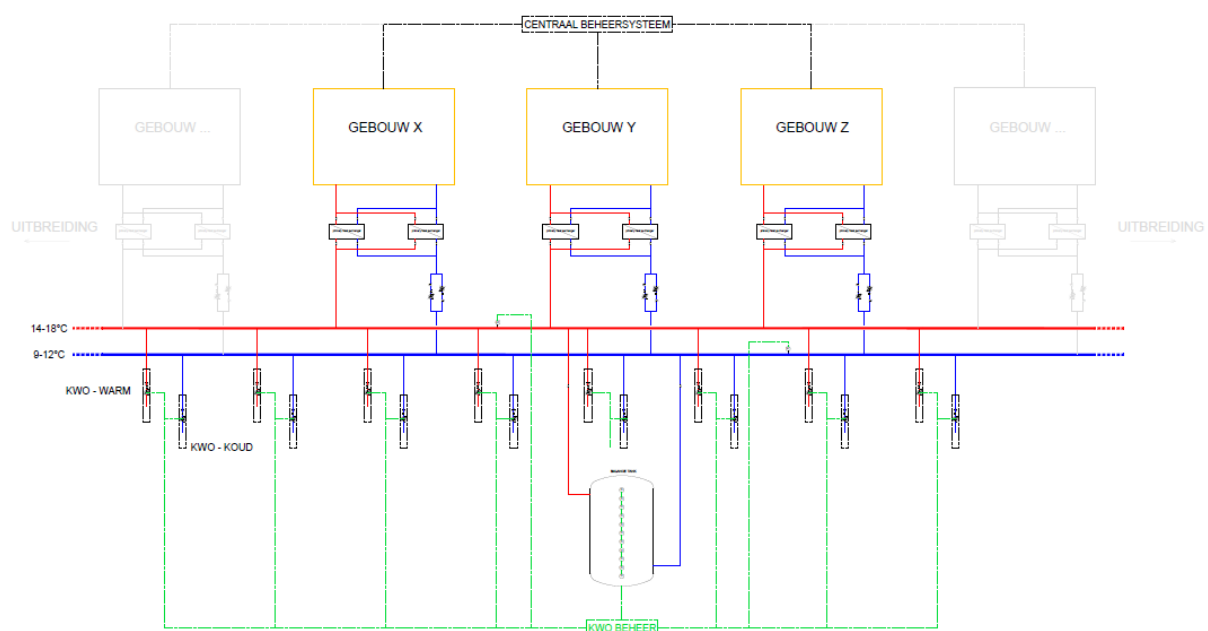
Het thermische netwerk is gebaseerd op het principe van een neutrale kring of open collector. Er worden twee centrale leidingen aangelegd, een 'koude' (6 -10°C) en een 'warme' (12 – 18°C) leiding of collector (zie Figuur 4-6). Ten gevolge van de warmte- of koudevraag van de gebouwen zal er een drukverschil ontstaan over beide leidingen. De druk in beide leidingen wordt constant gehouden door

⁸ ESCO: energy service company

het centrale controlesysteem via KWO bronpompen en in functie van de laadtoestand van de centrale buffer (zie Figuur 4-5). De prioriteiten van de thermische energie-uitwisseling op het netwerk zijn:

- Op gebouwniveau: intern uitwisselen van warmte en koude
- Op netwerkniveau: warmte en koude uitwisselen tussen de verschillende gebouwen
- Opslag van restwarmte en -koude met de centrale buffer
- Netto warmte- of koudevraag invullen met de KWO's

In de gebouwen worden één of meerdere warmtepompen voorzien die de warmte vanuit de collector op het gewenste temperatuurniveau brengen, afhankelijk van het gebouwontwerp en de gekozen afgiftesystemen. Er wordt bij voorkeur gewerkt met lage-temperatuur afgiftesystemen zoals betonkernactivering, vloerverwarming en/of koelplafonds. Gezien de referentie lucht/water warmtepompen is, legt dit de bouwheer geen extra beperkingen op. Dergelijke systemen kunnen als standaard technologie beschouwd worden in energiezuinige nieuwbouw of renovatie.



Figuur 4-5: Principeschema van het thermische netwerk

In een eerste fase wordt beoogd om het volledige leidingnetwerk te installeren zoals voorgesteld op bovenstaande figuur. Dit ontwerp is indicatief, de definitieve inplantingsplannen dienen door de warmtenetbeheerder opgemaakt worden. Hierdoor worden de voorzieningen aangelegd om in een later stadium de connectie te maken naar de nu nog vrij liggende kavels (8 in totaal). De vier reeds bebouwde kavels, zijnde Incubathor, Thor Central, EnergyVille 1 en EnergyVille 2, worden vanaf de opstart aangesloten op het netwerk. Het boren van de KWO bronnen kan dan volgens de groei van de site worden ingepland.

De huidige 3 KWO bronparen bestaan uit een combinatie van bestaande en nieuwe putten. Er werd echter geobserveerd dat het hergebruiken van bestaande putten de ideale inplanting op basis van de hydrogeologie verstoort.

Organisatorisch

Rol	CollecThor
Warmtenetbeheerder	Fluvius

- Het feit dat deze site kan ingezet worden als onderzoeksinfrastructuur impliceert dat niet per definitie de goedkoopste oplossingen worden voorzien. De technische uitwerking is wel gebaseerd op het economisch rendabel maken van de businesscase; maar tegelijk werden er extra meetpunten etc. voorzien om aan de onderzoeksvragen van de toekomst te voldoen. In het businessmodel werd ook er rekening gehouden dat er toekomstige inkomsten zijn niet enkel uit verkoop van energie maar uit verkoop van testinfrastructuur. EnergyVille zal het onderzoeksprogramma coördineren, in overleg met de operationele partners.

Algemeen

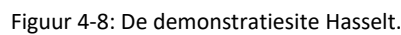
Technisch

Een systeem van 3 gesloten thermische energieopslagen in de vorm van BEO-velden vullen het vermogen van de riothermie aan bij pieklast en laten toe om in de zomer passieve koeling te voorzien. Deze passieve koeling zorgt voor de regeneratie van de bodemtemperatuur. Terwijl deze energieopslagen afzonderlijk worden gerealiseerd zullen ze als een geheel aangewend worden, zo kan bijvoorbeeld bij een pieklast in één van de ontwikkelingen, de geothermie worden aangesproken in de andere ontwikkelingen – zelfs als zij zelf nog geen pieklast hebben – om zo een groter aandeel riothermie naar de ontwikkeling in pieklast te sturen.

Het vermogen van de bron is berekend op het nodige vermogen voor loten Globale Estate Group + DCA, Kairos + Mont Real en ION + New. Het riothermie net wordt modulair opgebouwd waardoor gefaseerde uitbreidingen mogelijk zijn. In een eerste fase worden GEG en KM aangekoppeld, in een volgende fase ION-New.

Cordium investeerde naast de windturbine ook in een warmtenet, waarvan de helft werd gesubsidieerd via Europese projecten, voornamelijk Resilient Europe. Op termijn streeft Cordium ernaar om via de verkoop van energie de investering terug te verdienen. Dit project illustreert hoe energiezuinigheid en betaalbaar wonen hand in hand kunnen gaan, en benadrukt het belang van flexibiliteit in duurzame wijkontwikkeling om in te spelen op nieuwe technologieën en evoluties.

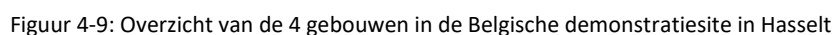
De demosite in Hasselt maakt deel uit van een grotere nieuwbouwwijk en werd opgeleverd in 2018. Het project bestaat uit 68 appartementen en 22 woningen bestemd voor sociale woningbouw. De voorbeeldsite maakt deel uit van deze woonwijk met daarin vier appartementsgebouwen met twintig woningen. De wooneenheden zijn aangesloten op een klein stadsverwarmingsnetwerk dat wordt verwarmd door verschillende thermische energiebronnen (geothermische warmtepompen, hybride warmtepomp en back-up gasgestookte ketels).



De site is onderwerp van verschillende onderzoeksprojecten met het doel de gebouwen om te bouwen tot positieve energiegebouwen. Dit werd bereikt door het implementeren van innovaties, zoals:

- PVT-panelen voor duurzame warmte en elektriciteit
- Multi-source en direct geregelde warmtepomp
- MPC-controller voor optimalisatie van de energiestromen op locatie

- Eenpersoons appartement
- Familieappartement



In een eerste fase van dit project werden de gebouwen verwarmd door verschillende verwarmingssystemen (Figuur 4-10):

- Recent werden de gasgestookte installaties buiten gebruik gesteld en er werd een nieuwe inverterwarmtepomp met een maximaal thermisch vermogen van 50 kW geïnstalleerd. De warmte wordt geïnjecteerd in een kleine buffertank die tevens dienst doet als balanceertank voor de verschillende warmtegeneratoren. Vanuit de tank wordt de warmte via een stadsverwarmingsnetwerk naar de appartementen gedistribueerd. Dit netwerk is ook verbonden met andere gebouwen in de buurt.

Rol	Cordium
Warmtenetbeheerder	WIL
warmteproducent	WIL
warmteleverancier	WIL

Juridisch

aquathermie nog niet actief ingezet op de site. Het aanwezig zijn van water heeft al wel direct een invloed op het hitte-eiland effect .

De Hertogensite integreert diverse hernieuwbare energieoplossingen, waaronder:

- **Zonne-energie:** Op de daken van de gebouwen worden zonnepanelen geïnstalleerd om elektriciteit op te wekken, wat bijdraagt aan de energievoorziening van de site. Gezien de consumptie van elektriciteit relatief hoger ligt door het gebruik van warmtepompen, wordt er al een aanzienlijk gedeelte van de energie lokaal opgewekt en verbruikt.
- **Geothermische energie:** Geothermische warmtepompen benutten de aardwarmte (BEO) voor zowel verwarming als koeling.

Tegenover de Hertogensite ligt het Janseniushof dat al langer gebruikt maakt van geothermie (KWO) en waarbij al het voordeel van geothermie werd aangetoond in de reductie van CO2 en het gunstige effect op de stabiliteit van de energieprijzen. Het project op de Janseniushof toonde zelfs een reductie van de energiekosten aan van 200 euro voor een standaardgezin.

Organisatorisch:

Rol	Hertogensite
Warmtenetbeheerder	niet gekend
warmteproducent	niet gekend
warmteleverancier	niet gekend

Projectontwikkelaar Resiterra NV leidt de aanleg van het geothermische warmtenet op de Hertogensite, maar treed verder niet op als warmtenetbeheerder, warmteproducent of warmteleverancier. We verkregen geen informatie over de gedetailleerde organisatiestructuur voor deze case. De implementatie van dit systeem vereist nauwe samenwerking tussen verschillende partijen om een efficiënte en duurzame werking te garanderen.

Juridisch

Over de juridische instrumenten die werden aangewend voor deze case werd geen informatie verkregen. Hoe het gebruik van openbare ruimte is geregeld is niet duidelijk.

Financieel

De investering in het geothermische warmtenet op de Hertogensite draagt bij aan de duurzaamheid en energie-efficiëntie van het project. Hoewel de initiële aanlegkosten aanzienlijk zijn, biedt het systeem op lange termijn financiële voordelen. Zo besparen bewoners gemiddeld ongeveer 200 euro per jaar op hun energiefactuur, zoals blijkt uit vergelijkbare projecten zoals het nabijgelegen Janseniushof. Bovendien draagt het warmtenet bij aan een jaarlijkse reductie van ongeveer 1.000 ton CO₂-uitstoot, wat niet alleen milieuwinst oplevert maar ook kan leiden tot financiële voordelen in de vorm van subsidies of belastingvoordelen voor duurzame energieprojecten. Voor de aanleg van de bronnen en de leidingen werd een dossier Call Groene Warmte ingediend.

4.2.5 Quartier Bleu (Hasselt)

Algemeen

Quartier Bleu biedt inzichten in duurzame stedelijke ontwikkeling. Het project benadrukt het belang van technologieën met hoge prestaties, solide financiële modellen en effectief stakeholdermanagement. Innovaties zoals het neutrale net en thermische energieopslag tonen aan hoe technische en operationele uitdagingen kunnen worden aangepakt.

Het project fungeert als referentiepunt voor toekomstige stedelijke ontwikkeling en illustreert hoe duurzaamheid kan worden geïntegreerd in grootschalige infrastructurele projecten.

Technisch

Het collectieve verwarmingssysteem van Quartier Bleu maakt gebruik van technologieën zoals geothermie (KWO), water/water-warmtepompen en thermische energieopslag uit oppervlaktewater. Deze systemen leveren hoge energetische prestaties. Echter, operationele problemen, zoals mosselgroei bij thermische energieopslag in oppervlaktewater, vereisen intensief onderhoud.

Een belangrijke innovatie is het neutrale net, dat zowel warmte als koude efficiënt distribueert. Het neutraal net is een tweepijps net. Hierbij worden volgens de principes van een 5^e generatie net een hoofdleiding van koud en warm water aangelegd. Deze zijn verbinden met de bronnen en de afnemers. Een goed georganiseerde sturing is hier van belang om de uitwisseling aan energie te optimaliseren.

Het gebruik van koelmiddelen met een lage Global Warming Potential (GWP) draagt bij aan milieuduurzaamheid. Bovendien is er gekozen voor leveranciers van hoogwaardige componenten om de lange levensduur van het systeem te garanderen. Het verkrijgen van langetermijngaranties van fabrikanten blijft echter een uitdaging.

Organisatorisch

Rol	Quartier Bleu
Warmtenetbeheerder	Geiser
warmteproducent	Geiser
warmteleverancier	Geiser

Het warmtenetwerk in Quartier Bleu bedient meer dan 400 woningen en beslaat een commerciële oppervlakte van ongeveer 22.500 m². Het systeem wordt beheerd door Geiser, een Energy Service Company (ESCO) die bestaat uit een samenwerking tussen Matexi, IFTech en De Watergroep. Geiser is verantwoordelijk voor de financiering, exploitatie en het onderhoud van het warmtenet. Bewoners en bedrijven in Quartier Bleu nemen energie af als een dienst, wat operationele efficiëntie en gebruiksgemak bevordert.

De implementatie van Quartier Bleu werd geleid door een gestructureerd projectteam, met de ESCO als zowel ontwikkelaar als exploitant. Interne expertise werd opgebouwd om operationele efficiëntie te garanderen. Communicatie met eindgebruikers verliep via de Vereniging van Mede-Eigenaars (VME), terwijl ontwikkelaars en aandeelhouders direct betrokken waren.

Belangrijke uitdagingen omvatten het beheer van niet-geoptimaliseerde systemen buiten de invloedssfeer van de ESCO. Vroege betrokkenheid van stakeholders werd als cruciaal ervaren voor flexibiliteit in juridische en operationele structuren.

Juridisch

Het recht van opstal bood een effectieve juridische oplossing voor het eigendom van het verwarmingssysteem. Naleving van milieuwetgeving werd verzekerd door jaarlijkse rapportageverplichtingen. Contracten, zoals aannemings-, onderhouds- en energieprestatiecontracten, waren essentieel voor samenwerking met leveranciers.

Hoewel er geen juridische geschillen waren, onderstreepte het project het belang van een duidelijke basisakte als fundament voor het beheer en de exploitatie. Het proces van voorlopige en definitieve oplevering zorgde voor een gestructureerde overdracht naar de beheerfase.

Financieel

Het systeem heeft een terugverdientijd van ongeveer 27 jaar, na deze periode gaat het eigendom over naar de vzw Quartier Bleu. De gemiddelde maandelijkse energiekosten voor bewoners blijven onder de € 100.

De financiering van het project is gebaseerd op een hybride model. De installatiekosten zijn gedeeltelijk gedragen door eindgebruikers, terwijl de Energy Service Company (ESCO) een deel financierde en inkomsten genereert via vaste gebruiksrechten. Subsidies en aandeelhoudersleningen speelden een sleutelrol in de realisatie. De stijging van elektriciteitskosten door de energiecrisis bleek een financieel risico, omdat dit niet altijd kon worden doorgerekend aan eindgebruikers.

De grootste kostenposten betroffen de aanleg van het grondwatersysteem en het neutrale net. Dankzij de balans tussen warmte- en koudevraag wordt de belasting op het grondwatersysteem verminderd, wat energiebesparingen en lagere operationele kosten oplevert. De financiële haalbaarheid wordt gewaarborgd door een Internal Rate of Return (IRR) van 9-12%.

4.2.6 Samenvatting setup

	CollectThor	Cordium	Hertogensite	Keerdok	Quartier Bleu
Bronnen	KWO, restwarmte, en uitwisseling tussen gebouwen (restwarmte)	BEO, hybride systeem (ook PV panelen en gasgestookte ketels)	BEO, zonne-energie	Riothermie, BEO-velden	KWO
Aantal boringen	3 bronparen	30 boringen tot een diepte van 90m	300 boringen tot 150m diepte	Aantal boringen niet gekend, diepte 105-115 m	6 KWO bronparen tot in het Krijt (213m diepte)
Diepte	75m				
Vermogen/volume	50m ³ /h				2.6 MW thermisch vermogen
Netwerk	5de generatie thermisch netwerk in openbaar terrein	Klein stadsverwarmingsnet over privéterrein, gedeeltelijk over openbaarterrein	warmtenet op openbaar terrein, maar onder de fietspaden en wandelpaden	Riothermie met warmtenet (openbaar terrein)	warmtenet in openbaar terrein
Type	5 ^e generatie (tweepijps)	5 ^e generatie	5 ^e generatie	5 ^e generatie	5 ^e generatie
Lengte	1000 m	300 m	2000 m	+/-1000m (VH)	500 m
Openbaar/privé terrein	Openbaar terrein	Privé + Openbaar terrein	openbaar terrein, maar onder de fietspaden en wandelpaden	Openbaar terrein	Mix openbaar en privé terrein
Afnemers	Gebouwen op Thorpark (Thor Central, Incubathor, EnergyVille)	Sociale woningen	Residentieel en commercieel	Drie ontwikkelingen: D'Ile Maline, Rode Kruisplein, enz.	400 woningen en 22.500 m ² commerciële ruimte
	4 gebouwen, uitbreiding tot 12 225 KWh warmte per gebouw 200 KWh koude per gebouw	68 appartementen en 22 woningen	400 wooneenheden Winkels, horeca	300 wooneenheden Horeca, winkels hotel	400 wooneenheden Winkels, horeca

	CollecThor	Cordium	Hertogensite	Keerdok	Quartier Bleu
Organisatie	EnergyVille coördineert. Warmtenetbeheerder: Fluvius, Warmteproducent: Thetys/CollecThor, Warmteleverancier: Thethys, CollecThor ESCO model	Onderdeel van sociale woonwijk, WIL funceert als warmtenetbeheerder, warmteproducent en warmteleverancier	Geen details bekend	Er wordt gewerkt met één of meerdere ESCO-partijen om de rollen te verdelen. Er zijn geen details bekend. Aquafin fungeert als warmteproducent voor het riothermie-gedeelte.	De ESCO Geiser fungeert als warmtenetbeheerder, warmteproducent en warmteleverancier
Juridisch	Contracten volgens VREG-voorschriften voor warmtenetbeheer. Speciale aandacht voor overdracht gebouwtogang.	Eigen netwerk binnen sociale woonwijk. Geen informatie over juridische instrumenten voor inname openbaar domein	Geen details bekend	Publiek-private samenwerking. Geen details bekend over juridische instrumenten voor inname openbaar domein	ESCO-model met eigendomsoverdracht na 27 jaar
Financieel	Gespreide investeringen door modulair karakter, subsidie via Call Groene warmte	Sociale woningbouw gefinancierd door WIL, extra financiering door als pilot in onderzoeksprojecten te dienen. Sociaal tarief maakt een businesscase moeilijk	Businessmodel geeft een win-win voor zowel uitbater als klant. Hier wordt het NMDA gehaald voor standaardgezinnen. Call groene warmte werd aangevraagd.	Gefaseerde uitbreiding zodat het risico beperkt blijft. Call groene warmte aangevraagd.	Terugverdientijd van 27 jaar



4.3 RANDVOORWAARDEN VOOR COLLECTIEVE GEOTHERMIESYSTEMEN

4.3.1 Technische randvoorwaarden

De technische randvoorwaarden voor een collectief thermisch systeem (verwarmen en koelen) kunnen variëren afhankelijk van verschillende factoren, zoals het type gebouw, de locatie, de energiebron en de specifieke behoeften van de gebruikers.

Generieke beleidsinstrumenten zoals de [inspiratiekaart warmtezoning](#) uitgegeven door de VVSG kunnen steden en gemeenten helpen om zones af te lijnen waar kansen liggen voor collectieve verwarming of koeling. Lokale warmteplannen zoals bijvoorbeeld opgesteld te [Temse](#) of [Hasselt](#) kunnen specifiek op zoek gaan naar lokale warmtebronnen, concrete koppelkansen voor duurzame energiebronnen onderzoeken, het potentieel in specifieke gebieden in kaart brengen en interessante pilootprojecten lokaliseren. Ook kunnen ze inzetten op het koppelen met projecten in andere domeinen (heraanleg openbaar domein, onthardingsprojecten, vernieuwing riolering, wijkrenovatieprojecten,...). Ook binnen de projecten [Klimaatwijken](#) geïnitieerd door het Departement Omgeving, het Team Vlaams Bouwmeester en het Vlaams Energie- en Klimaatagentschap gaat er aandacht naar de wijze waarop collectieve projecten vorm kunnen krijgen en op welke wijze verschillende uitdagingen op het terrein aan elkaar gekoppeld kunnen worden om op die manier een geïntegreerde aanpak op wijkniveau na te streven.

Wanneer de keuze gemaakt wordt om een collectief systeem aan te leggen dan gaan daar vaak heel wat studies aan vooraf. Het potentieel wordt tot op heden vaak per voorgestelde case bekeken. Er kunnen echter wel enkele algemene technische randvoorwaarden geformuleerd worden waarmee rekening dient gehouden te worden voor het installeren van een rendabel collectief systeem.

1. Selectie potentiële aansluitingen

Een haalbaarheidsstudie gaat meestal vooraf om het potentieel in kaart te brengen. Hierbij wordt er vaak gekeken naar de grotere afnemers van de warmte en/of koude. Indien de bronnen gekend zijn (in dit geval geothermie) wordt een afweging gedaan van de afname van de potentiële klanten en de productiecapaciteit. De productiecapaciteit wordt voor ondiepe geothermische systemen sterk bepaald door de eigenschappen van de ondergrond: gesloten systemen kunnen nagenoeg overal in Vlaanderen geïnstalleerd worden, maar voor open systemen (met typisch een hogere productiecapaciteit) is een voldoende dikke en permeabele aquifer nodig op relatief kleine diepte. Daarnaast speelt regelgeving een belangrijke rol in de haalbaarheid van geothermische projecten. Voor gesloten systemen geldt dat de diepte van de installatie onder een bepaalde limiet moet blijven. Open systemen hebben te maken met strengere restricties, zoals het vermijden van installaties binnen beschermde gebieden voor grondwaterwinning, om vervuiling en verstoring van het grondwater te voorkomen. (zie sectie 3.2.7). In deze stap wordt dus de omgeving gescand om na te gaan of de hoeveelheid energie die kan geproduceerd worden ook kan afgezet worden bij klanten.

Eerste voorwaarde: potentiële vraag > potentiële productie

2. Energievraag

Het gebruikersprofiel van potentiële afnemers dient te worden onderzocht. Hoewel er voorbeelden bestaan van kleinschalige collectieve systemen waarbij BEO-velden enkel warmte geven aan residentiële verbruikers, zijn er voordelen aan het aansluiten van een mix van

In onderstaande figuur wordt een warmtevraag en koudevraag op jaarbasis weergegeven. Op de figuur is duidelijk dat er in de zomer een grote koudevraag is en in de winter een grote warmtevraag. De tussentijdse periodes zijn echter een mix van warmte- en koudevraag. Naast de match tussen koude en warmtevraag is het ook belangrijk om te kijken naar piekverbruiken. In de praktijk levert een collectief systeem typisch een basisbehoefte aan energie en worden de piekverbruiken opgevangen door een bijkomende technologie.

The graph displays the annual profile of heat and cold demand (Koude- en warmtevraag) in MW over 8500 hours. The red line represents warmtevraag (heat demand) and the blue line represents koudevraag (cold demand). The y-axis ranges from 0 to 3.5 MW, and the x-axis ranges from 0 to 8500 hours. The graph shows significant fluctuations, with a notable peak in cold demand around 4800 hours and a peak in heat demand around 1000 hours.

3. Energiekwaliteit (temperatuur)

pagina 114 van 158

Derde voorwaarde: temperatuurvraag gebouwen is van dezelfde grootteorde

Ook een substation voor een collectieve oplossing neemt een aanzienlijke ruimte (2 tot 20 m²) in beslag in een gebouw, waar vaak de technische ruimte al vol staat. Bij deze randvoorwaarde dient dus te worden onderzocht of de technische voorziening die moet geplaatst worden te voorzien is in de ruimtes die beschikbaar zijn, of dat er op zijn minst voldoende ruimte beschikbaar is op het private domein. Wanneer deze ruimte niet beschikbaar is, kan ook het openbaar domein gebruikt worden om de voorzieningen te plaatsen.

pagina 115 van 158

- Dankzij de energiezuinigheid van de aangesloten gebouwen en een goede functiemix, waardoor maximale warmte-uitwisseling mogelijk is, kon in o.a. de case van Quartier Bleu een goede business case bekomen worden. De praktijk leert echter dat de business cases van vooropgestelde warmtenetten onder de huidige marktcondities vaak **niet rendabel** zijn in Vlaanderen. Dit beperkte onder andere een meer grootschalige uitrol van een warmtenet rond de Keerdoksite. Oorzaken hiervoor zijn enerzijds te zoeken in de hoge investeringskosten voor het plaatsen van boringen en de installatie van warmtenetten, hetgeen een lange terugverdientijd van dergelijke systemen met zich meebrengt, en anderzijds in de relatief hoge elektriciteitspreis ten opzichte van aardgas.

De moeilijkere business case van warmtenetten kan **negatieve gevolgen hebben voor (potentiële) afnemers**. Zo wordt de rendabiliteit van een thermisch net in bepaalde gevallen bepaald door een eerste grote afnemer (vaak een private partij). Vaak worden er van de private partij garanties voor afname gevraagd; dit zet de beslissing om aan te sluiten vaak eerder onder druk omdat ze dergelijke afnameplicht niet hebben bij individuele oplossingen. Ook worden de prijzen voor de geleverde warmte nu in een aantal gevallen bepaald door (private) ESCO-partijen. **Vlaamse kaders met betrekking tot a) de rechten en plichten van afnemers met betrekking tot aansluiting en b) prijsregulering van warmte kunnen consumenten beter beschermen.**

Het implementeren van een collectief verwarmingssysteem met geothermie vereist niet alleen een stevige financiële basis, maar ook een goed georganiseerde en gecoördineerde aanpak. Verschillende organisatorische voorwaarden spelen een cruciale rol bij het waarborgen van het succes van dergelijke projecten.

Effectieve beheersstructuren zijn noodzakelijk voor het dagelijkse operationele beheer van het geothermische systeem. Een beheerorganisatie kan verantwoordelijk zijn voor onderhoud, monitoring en klantenservice. Duidelijke contracten en overeenkomsten met serviceproviders, onderhoudsteams en warmteafnemers helpen om de operationele aspecten van het systeem soepel te laten verlopen. Er bestaan geen specifieke wettelijke bepalingen rond de organisatiestructuur voor geothermische systemen, maar het Energiedecreet¹⁰ legt in Vlaanderen meer algemeen de rollen vast voor de diverse stakeholders in een warmtenet. Warmtenetbeheerders hebben een meldingsplicht aan de VREG, die toezicht houdt op de warmte- en koudenetten in Vlaanderen (VREG, 2023).

pagina 118 van 158

ROL	Staat in voor (niet-exhaustief)
Warmtenetbeheerder	- Ontwerp, realisatie, financiering en onderhoud van de bronleidingen, het warmtenet en de aansluitingen. - De distributie van thermische warmte/koude via het Warmtenet
Warmteproducent	- De geïntegreerde engineering, realisatie, financiering en beheer (exploitatie) van het geothermisch warmtesysteem en de warmteproductie-installaties - Aansturing en uitbating van het geothermisch warmtesysteem in zijn geheel - De productie van geothermische warmte en koude in functie van de noden van de Warmteafnemers - Het leveren van de geproduceerde warmte en koude aan de Warmteleverancier
Warmteleverancier	- Leveren van de warmte en koude aan de warmteafnemers - Meten van de geleverde warmte en koude - Administratie en facturatie van de warmteafnemers
Warmtenetgebruiker	- Vraagt aan de warmtenetbeheerder de fysieke aansluiting van een gebouw tot het warmtenet en aan de warmteproducent de installatie van de warmteproductie-installatie.
Warmteafnemer	- Neemt voor eigen gebruik thermische warmte en koude af van de Warmteleverancier.

- Publieke stadswarmtebedrijven
- Publieke beheerders van sites of campussen (bijvoorbeeld een universiteitscampus, een sociale huisvestingsmaatschappij zoals WIL,...)
- **Privaat:**
 - Private Energy Service Companies (ESCO's)
 - (Burger)coöperaties actief in de warmtesector (bvb Beauvent, ZuidtrAnt, EcoOB, overkoepeld via REScoop Vlaanderen)
- **Publiek-private samenwerking:**
 - Oprichten van een ESCO door één of meerdere publieke en private partijen
 - Verdelen van de warmtenetrollen, bijvoorbeeld een intercommunale als warmtenetbeheerder en een privébedrijf als warmteleverancier.
 - Energiegemeenschappen uitgebouwd via (subsidies via) Technische assistentiehubs

Voor een collectief geothermisch project is een nauwe samenwerking tussen publieke en private partners vaak essentieel. Publiek-private partnerschappen (PPP's) kunnen de benodigde expertise, middelen en investeringen samenbrengen. Lokale overheden kunnen eveneens een cruciale rol spelen. Zij kunnen, bijvoorbeeld via warmteplannen of klimaatplannen een lokaal en ruimtelijk gediversifieerd beleid naar voorschuiwen dat rekening houdt met langetermijnsdoelstellingen en bredere maatschappelijke baten en zo tegengewicht bieden aan private ontwikkelaars met louter economische objectieven (SERV, 2024). Daarnaast kunnen zij ook een belangrijke rol spelen in het aanbrengen van koppelkansen, tussen warmteleveranciers en afnemers en kunnen zij een efficiënte integratie met andere lokale ontwikkelingsprojecten (werken aan de openbare weg, herontwikkeling van sites,...) faciliteren. Ook kunnen zij ook financiële ondersteuning bieden voor strategisch belangrijke ontwikkelingen.

Tenslotte is het van groot belang om de lokale gemeenschappen vanaf het begin te betrekken. Dit helpt om draagvlak te creëren en zorgt ervoor dat de zorgen en behoeften van bewoners serieus worden genomen. Regelmatige communicatie via inspraakrondes en duidelijke kanalen is hierbij cruciaal.

4.3.3.3 Beheersoverdracht Fluvius

In Vlaanderen is door minstens 1/3^e van de gemeenten een beheersoverdracht getekend met Fluvius voor de activiteit warmtenetten. Via deze beheersoverdracht kent de gemeente de aanleg en exploitatie van warmtenetten op gemeentelijk openbaar domein toe aan Fluvius (gedeeltelijke beheersoverdracht), of het volledige eigenaarschap (volledige beheersoverdracht). Fluvius hanteert daarbij strenge voorwaarden vooraleer het projecten beschouwt als interessante business cases. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit exclusieve recht enkel geldt voor projecten geïnitieerd door de gemeenten. Derde partijen mogen nog steeds op eigen initiatief toelating vragen aan de gemeenten om gebruik te maken van het openbare domein voor de ontwikkeling van warmtenetten. De gemeente kan hiervoor toestemming geven via het opstalrecht of een domeintoelating.

In het kader van dit project werd een overleg ingepland met Fluvijs, waarin zij hun visie als distribution system operator (DSO) toelichten.

Verslag: Warmtenet en Duurzame Energieoplossingen (Pieter De Graeve, Fluvius)

Inleiding Bij het ontwikkelen van duurzame energieoplossingen speelt de vergelijking met aardgas een cruciale rol. Vooralsnog wordt de gasprijs van een jaar als referentie genomen. Voor toekomstige projecten wordt het kostplusmodel overwogen. Dit verslag belicht enkele belangrijke overwegingen en voorwaarden voor de ontwikkeling en implementatie van warmtenetten en andere duurzame alternatieven, zoals lucht-water warmtepompen.

Huidige aanpak en uitdagingen Momenteel wordt de totale prijs als uitgangspunt genomen en vervolgens teruggerekend om te bepalen wat een marktconforme prijs is. Het tekort ten opzichte van deze prijs wordt in veel gevallen gecompenseerd door subsidies. Een marktconforme prijs vaststellen is essentieel om de overgang naar duurzame energie haalbaar en aantrekkelijk te maken. Daarnaast wordt een taxshift genoemd als mogelijke positieve maatregel om deze transitie verder te ondersteunen.

Vijf basisvoorwaarden Bij het implementeren van warmtenetten en andere oplossingen moet rekening worden gehouden met vijf basisvoorwaarden:

1. **Financiële haalbaarheid:** De kosten moeten acceptabel zijn voor zowel de ontwikkelaars als de eindgebruikers.
2. **Technische haalbaarheid:** De technologie moet betrouwbaar en efficiënt zijn.
3. **Comfort:** De oplossing mag niet inboeten op comfort voor de gebruiker.
4. **Sociale aanvaardbaarheid:** Het project moet maatschappelijk draagvlak hebben.
5. **Ecologische voordelen:** De milieuwinst moet significant zijn ten opzichte van traditionele oplossingen.

Openbare ruimte en doorlooptijd De implementatie van warmtenetten brengt specifieke uitdagingen met zich mee, zoals het gebruik van openbare ruimte en de vaak lange doorlooptijd. Deze aspecten vragen om zorgvuldige planning en samenwerking met lokale overheden.

Langetermijnperspectief en perceptie Een belangrijk aandachtspunt is het verschil in perspectief tussen investeerders en klanten. Terwijl investeerders kijken naar een periode van 30 jaar of langer, zijn klanten vaak meer gefocust op de korte termijn. Hierdoor worden de recurrente kosten, zoals onderhoud en energiegebruik, soms over het hoofd gezien. Het is van belang om de totale kosten van eigendom (Total Cost of Ownership, TCO) over 30 jaar in kaart te brengen en duidelijk te communiceren. Dit kan helpen om vertrouwen te creëren bij potentiële klanten.

Restwarmte en regelgeving Het hergebruik van restwarmte biedt veel potentieel, maar vereist een duidelijk wettelijk kader om effectief te worden ingezet. Het is belangrijk om deze regelgeving tijdig te ontwikkelen om onzekerheden te vermijden.

Referenties en struikelblokken Het bepalen van een referentie voor “Niet Meer Dan Anders” (NMDA) is een punt van aandacht. Het is belangrijk om te onderzoeken of NMDA een struikelblok vormt voor de ontwikkeling van warmtenetten. Het definiëren van een heldere en haalbare referentie kan bijdragen aan een vlottere implementatie.

Goed projectmanagement is een tweede belangrijke organisatorische voorwaarde. Een gedegen projectmanagementstructuur, geleid door een ervaren projectmanager of projectteam, is noodzakelijk om de complexiteit van geothermische projecten te beheersen. Het opstellen van een realistische tijdsplanning met duidelijke mijlpalen is hierbij essentieel, zodat de voortgang van het project goed gemonitord kan worden. Daarnaast is risicobeheer belangrijk om potentiële problemen, zoals technische storingen of juridische complicaties, vroegtijdig te identificeren en aan te pakken.

4.3.4 Juridische randvoorwaarden

4.3.4.1 Gebruik van het openbaar domein

Er bestaan verschillende **juridische instrumenten** die kunnen benut worden rond dit vraagstuk: Een overheid kan een domeinvergunning of een domeinconcessie verlenen om privaatief gebruik te maken van een deel van het openbaar domein en de ondergrond. Daarnaast zijn ook de privaatrechtelijke instrumenten erfdienstbaarheid, opstalrecht of erfpacht relevant in deze context. Voor een diepgaande juridische analyse met betrekking tot warmtenetten (op publiek domein) wordt verwezen naar Reynebeau (2022), Dedecker et al. (2024) en de juridische leidraad voor lokale besturen door de [UVSG](#). Hierbij dient opgemerkt te worden dat bovenstaande studies voornamelijk betrekking hebben op warmtenetten; de link met het plaatsen van boringen wordt enkel secundair onderzocht. Voor dit laatste aspect wordt expliciet verwezen naar de 'Code van goede praktijk voor ondiepe geothermische boringen op openbaar domein' door Warmtenetwerk Vlaanderen (in opmaak).

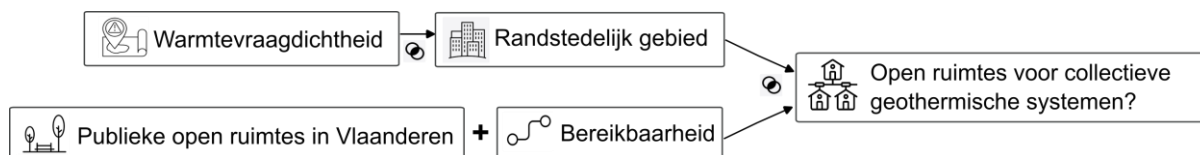
Bovenstaande studies focussen op de juridische bepalingen in verband met de gebruiksrechten van openbaar domein door private partijen. Echter, een ander probleem waarmee lokale overheden te maken krijgen is hoe ze dienen te bepalen **wie het recht heeft om een collectief (geo)thermisch net te mogen plaatsen op een bepaalde publieke locatie** (zie Onderzoeksvraag IV in Dedecker et al.

pagina 122 van 158

CONTRACT	OMSCHRIJVING
Productieaansluitcontract	- Tussen Warmteproducent en Warmtenetbeheerder - Regelt de modaliteiten, rechten en plichten inzake de koppeling en werking van de installaties van het KWO-systeem en de Warmteproductie-installatie in relatie tot de Bronleidingen, het Warmtenet en de Aansluiting
Toegangscontract	- Tussen Warmteleverancier en Warmtenetbeheerder - Regelt de modaliteiten, rechten en plichten inzake het gebruik door de Warmteleverancier van het Warmtenet
Aansluitcontract	- Tussen Warmtenetgebruiker en Warmtenetbeheerder - Regelt de modaliteiten, rechten en plichten inzake de realisatie en het gebruik van de Aansluiting
Warmte-installatiecontract	- Tussen Warmtenetgebruiker en Warmteproducent - Regelt de modaliteiten, rechten en plichten inzake de realisatie en het gebruik van de Warmteproductie-installatie in het Gebouw • Technische vereisten van de Warmteproductie-installatie (temperatuurregimes, piekvermogen, redundantie, ed.). • Financiële bepalingen eenmalige Installatiebijdrage • Bepaling zakelijke rechten voor de verschillende technische installaties in eigendom van de Warmteproducent. • Exclusiviteitsclausule met schadevergoeding in het geval niet-aansluiting of vroegtijdige opzeg door Warmtenetgebruiker.
Leveringscontract	- Tussen Warmteafnemer en Warmteleverancier - Regelt de modaliteiten, rechten en plichten inzake de levering en afname van warmte en koude • Verbruikstarief warmte en koude • Tarief bijdrage Vastrecht

4.4 RUIMTELIJKE DIVERSIFIËRING IN VLAANDEREN: WELKE PUBLIEKE ONBEOUWDE RUIMTES ZIJN GESCHIKT VOOR GEOTHERMIE?

Collectieve systemen met geothermie als bron kunnen (maar hoeven niet noodzakelijk) gebruik maken van publieke open ruimte voor het installeren van de putten. In dit onderdeel ontwikkelen we een methodiek die toelaat om op kaart weer te geven (i) waar publieke ruimtes zich bevinden en welke kenmerken ze hebben (verharding, groenbedekking etc.) en (ii) welke (delen) van deze ruimtes potentieel hebben om geothermische boringen op te plaatsen. We focussen hierbij op (rand)stedelijk gebied zoals ruimtelijke afgebakend in de bestaande ruimtelijke indicator “Verstedelijkt, randstedelijk en landelijk gebied”, opgemaakt in het kader van het RURA. We beperken ons tot deze zones omdat er specifiek in deze gebieden zones zijn waar de installatie van individuele geothermische oplossingen technisch gezien niet of moeilijker haalbaar is, bijvoorbeeld omdat er geen tuin ter beschikking is. Tegelijkertijd nemen we aan dat in deze gebieden de warmtevraagdichtheid hoger is vergeleken met landelijke gebieden.



Figuur 4-12: Methodologie voor het in kaart brengen van publieke open ruimtes die geschikt zijn voor de installatie van geothermische bronnen.

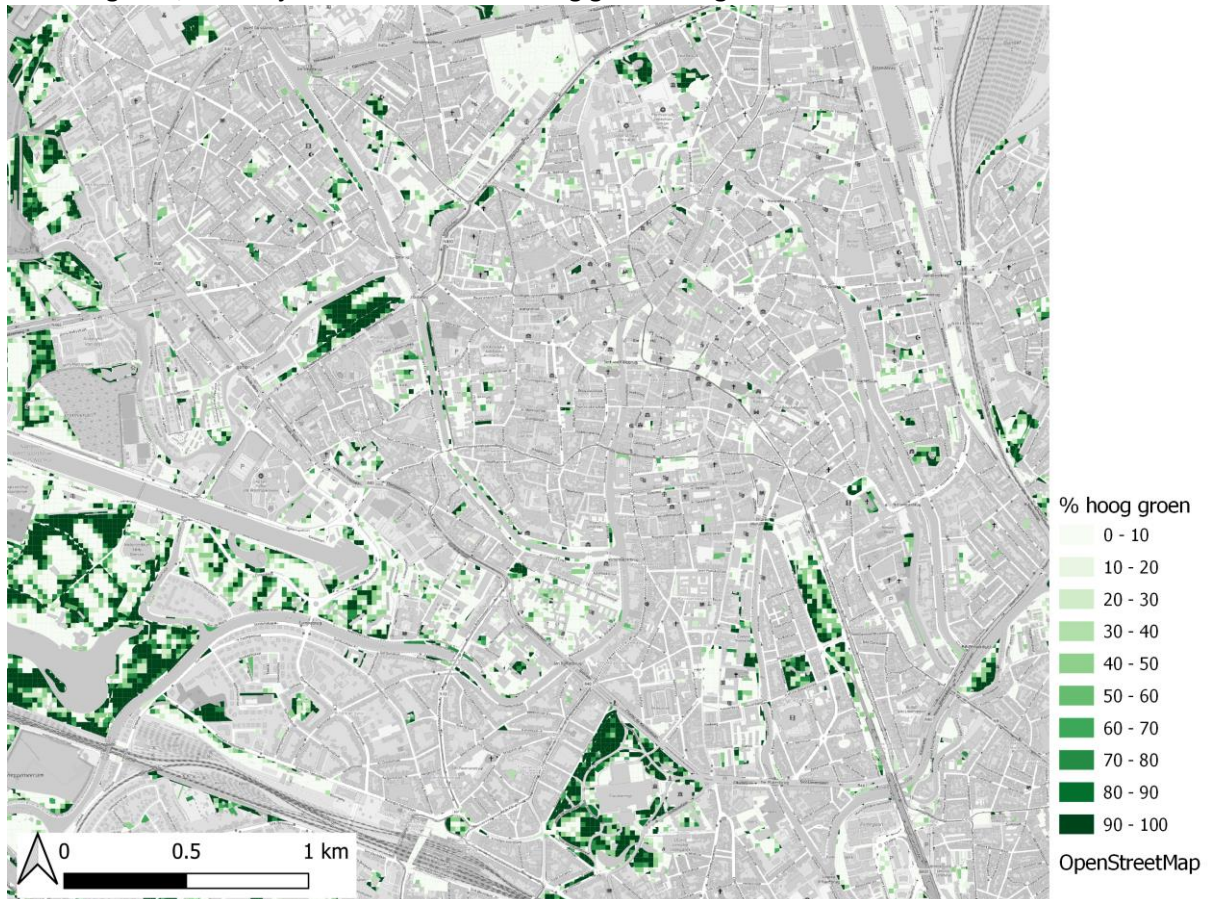
4.4.1 Stap 1: Een Vlaanderen dekkende kaart voor publieke open ruimte

Er is geen volledige kaartlaag beschikbaar van de publieke onbebouwde ruimte in Vlaanderen. In andere projecten (bv. Zwerfvuil i.o.v. OVAM) werden ook benaderingen gemaakt, maar deze waren in de bestaande vorm niet voldoende bruikbaar voor de huidige opdracht. Daarom werd er in eerste instantie een gedetailleerde analyse uitgevoerd van de relevante types van publieke onbebouwde ruimtes die in aanmerking komen voor de installatie van geothermische boringen, en waarover er data bestaat. Vervolgens werd er een methodologie opgesteld om deze verschillende databronnen te combineren.

De publieke onbebouwde ruimte wordt in kaart gebracht door volgende combinatie:

- "Percelen Vlaamse en Lokale Overheden" (kaartlaag: vlo_percelen), zonder de bebouwde delen ervan. In de dataset "Percelen Vlaamse en Lokale Overheden" zitten de percelen in eigendom van en/of in gebruik door de Vlaamse en Lokale Overheden. Hierbij zijn ook inbegrepen de percelen van intercommunales, gemeenschapsonderwijs (GO!), kerkfabrieken, instellingen van het hoger onderwijs, sociale woningmaatschappijen, Aquafin. De speelplaats van een school van het GO! is dus wel opgenomen, maar die van basisscholen en secundaire scholen van het vrije onderwijs niet (mits enkele uitzonderingen waarbij de speelplaats van het vrij onderwijs eigendom is van de gemeente).
- Alle oppervlakte van Vlaanderen waar GEEN kadastraal perceel (kaartlaag: capaperc) voorkomt en die niet behoort tot spoorwegen (Sbn) of water (Wtz) uit het GRB.
- De wegen worden weggelaten op basis van een kruising met het Wegenregister (Agentschap Wegen en Verkeer), maar de pleinen worden behouden.

De attributen kunnen gebruikt worden om bepaalde kenmerken van de onbebouwde ruimte apart weer te geven, zoals bijvoorbeeld voor het hoog groen in Figuur 4-14.



Figuur 4-14: Percentage hoog groen in de publieke open ruimte in Gent centrum (Achtergrond: OpenStreetMap)

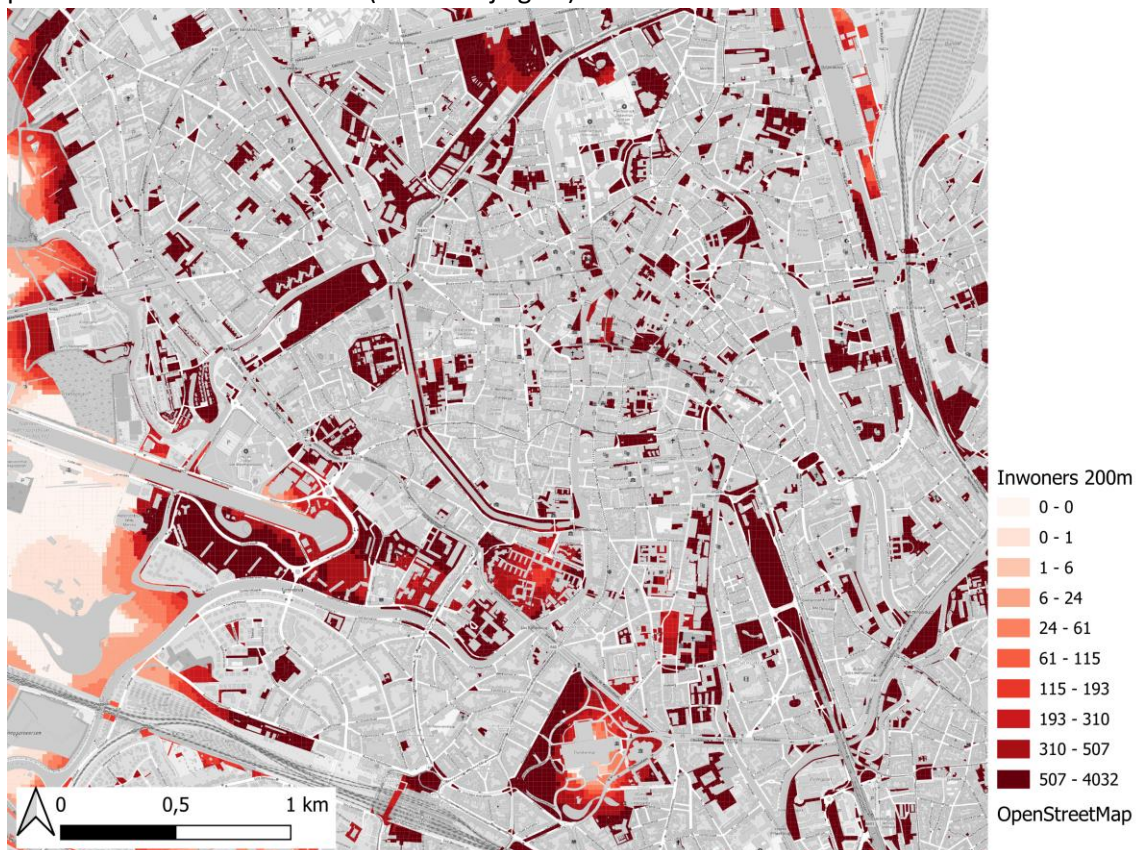
4.4.3 Stap 3: Potentieel van de publieke onbebouwde ruimte bepalen.

Of een publieke onbebouwde ruimte al dan niet potentieel heeft om geothermische bronnen voor collectieve systemen te herbergen wordt in de eerste plaats bepaald door de **afstand tot potentiële warmte-afnemers**. Hoe kleiner deze afstand, hoe korter het buizenstelsel van het thermisch net kan zijn, en hoe rendabeler de business-case.

Om deze afstand tot warmte-afnemers op kaart te zetten wordt enerzijds berekend hoeveel **inwoners er in de buurt van de publieke open ruimte wonen** (Inwonersdichtheid Vlaanderen, toestand 2022, Poelmans et al. 2022). Anderzijds wordt ook de **warmtevraag rondom de open ruimte** in kaart gebracht. Hierbij wordt de warmtevraag per gebouw gebruikt zoals beschreven in paragraaf 3.4.1, dus inclusief ondergrens van de klassen van de grootverbruikers.

Omdat er geen duidelijke richtlijnen zijn over hoe lang zo'n warmtenetten redelijkerwijs kunnen zijn, wordt de berekening uitgevoerd voor **verschillende afstanden** (50 m, 100 m, 200m en 500m) in een buffer rondom de publieke open ruimte. Een voorbeeld voor het aantal inwoners binnen 200m wordt

getoond in Figuur 4-15. Al deze extra attributen worden mee opgeleverd met de GIS-data van de publieke onbebouwde ruimte (zie ook Bijlage E).



Figuur 4-15: Aantal inwoners binnen 200m van publieke open ruimte (Gent centrum; Achtergrond: OpenStreetMap)

4.4.3.1 Stap 3.1: Verfijning van het potentieel op basis van de bodembedekking

Bij het nemen van een cirkelvormige buffer wordt weinig rekening gehouden met het feit dat **niet elke lopende meter warmtenet even duur of wenselijk** is: In de praktijk is het technisch veel complexer (en dus duurder) om verharde straten te kruisen (Dedecker, 2024). Daarbij moeten er namelijk veel leidingen gekruist worden. Daarnaast is het minder wenselijk om buizen onder hoog groen te plaatsen, gezien hun grote ecologische waarde en de potentieel grote omvang van het ondergronds wortelgestel van hoogstammige bomen (Dedecker, 2024.).

Daarom wordt het potentieel verfijnd, waarbij rekening gehouden worden met extra criteria, namelijk verharding, bomen, waterlopen en bebouwing.

Vanuit de publieke onbebouwde ruimte wordt voor verschillende afstanden (50 m, 100 m, 200 m; zie ook §4.4.4.2) opnieuw berekend welke warmtevraag bereikt wordt, maar nu aan een verschillende kost per meter. Bij de berekening worden volgende aannames gedaan:

- leiding door verharding kost 3x zoveel als onverhard terrein (verhard volgens jaarBAK, 2021)
- leiding door hoog groen kost 2x zoveel als door onverhard terrein (hoog groen volgens groenkaart, 2021)
- geen leidingen door gebouwen (Gbg-laag GRB, 2022) of waterlopen (Wtz-laag GRB, 2022)

Dit betekent dat als de volledige afstand van de publieke onbebouwde ruimte tot aan de gebouwen met warmtevraag onverhard en zonder bomen is, de volledige afstand van 50 m (of 100 m, 200 m) gebruikt kan worden. Maar als de route bijvoorbeeld over 10 m verhard terrein gaat, dit al voor 30 m telt en er een kleinere afstand, en dus meestal een lager aantal gebouwen en lagere warmtevraag, aan dezelfde kost bereikt kan worden. Voor elke locatie in de publieke onbebouwde ruimte wordt zo de warmtevraag berekend. Elke bereikte warmtevraag wordt gedeeld door de afstand van die

onbebouwde ruimte locatie tot aan de warmtevragers. De kaartwaarden zijn dus niet exact de som van de warmtevraag maar drukken enkel een potentieel uit. De factoren waarmee hier gerekend werd, werden pragmatisch gekozen. Ze kunnen eenvoudig aangepast worden indien hiervoor concrete informatie ter beschikken zou komen.

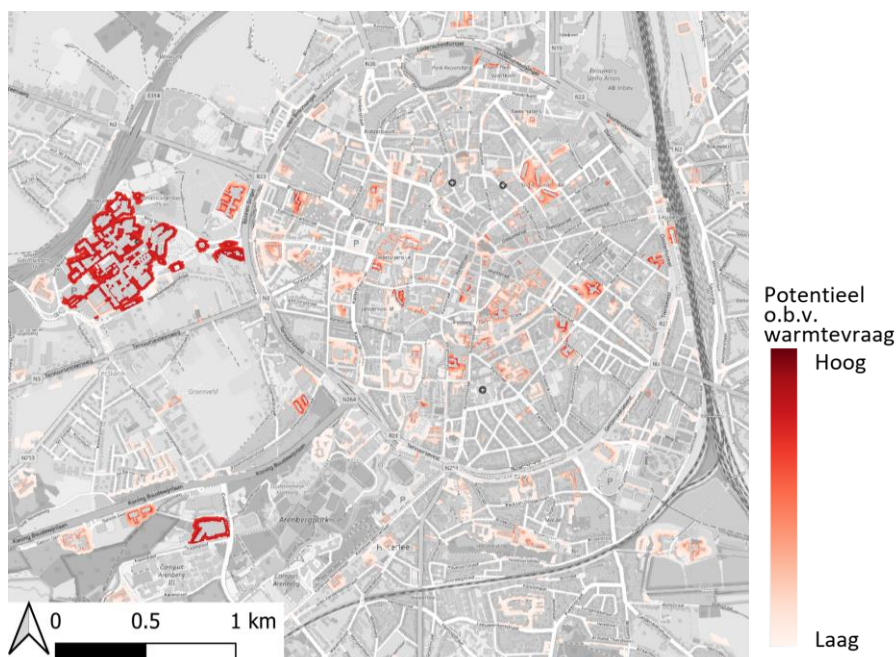
4.4.4 Resultaten

Het resultaat is **een kaart die voor de publieke open ruimte aangeeft zones binnen de onbebouwde ruimte het hoogste potentieel hebben voor het plaatsen van bronnen voor een collectief geothermisch systeem** en dit op basis van de warmtevraag in de omgeving. We maakten deze kaarten voor hypothetische warmtenet-lengtes van respectievelijk 50, 100 en 200m. Hierbij dienen we op te merken dat alle gebieden binnen de publieke onbebouwde ruimte potentieel hebben voor de inplanting van warmtebronnen, maar niet elke locatie biedt dezelfde strategische voordelen. De inkleuring van de cellen helpt bij het identificeren van de meest interessante zones, waar de combinatie van lengte van het benodigde warmtenet, bodembedekking en warmtevraag in de buurt het grootste rendement oplevert. In deze zones kan de ondergrondse ruimte het meest efficiënt worden benut voor het plaatsen van bronnen voor ondiepe geothermiesystemen.

Figuur 4-16 toont een uitsnede van deze kaart voor Leuven, met de berekening op maximaal 50m afstand rekening houdend met de verschillen in bodembedekking. De waarde op een bepaalde locatie geeft een indicatie van het potentieel voor het plaatsen van bronnen, gebaseerd op de **warmtevraag** in de omgeving (in dit geval maximaal 50m). De effectieve afstand tot een warmtevragers is echter niet altijd precies 50 meter. In plaats van een vaste afstand wordt namelijk de *kostprijs* van de verbinding als maatstaf genomen. Wanneer de route door verhard terrein loopt, kan een kortere afstand worden afgelegd, omdat de aanlegkosten hoger zijn. Zo wordt verondersteld dat het boren door verhard terrein drie keer duurder is dan door onverhard terrein en door bebost gebied twee keer duurder. Dit betekent dat een verbinding door volledig verhard terrein effectief slechts een derde van de nominale afstand (50 m) zou beslaan.

Hoe roder de kleur op de kaart, hoe hoger de huidige warmtevraag rondom die publieke open ruimte locatie. Grootverbruikers zoals het Universitair Ziekenhuis hebben een grote invloed op het resultaat. In het algemeen is de directe nabijheid van een grote afnemer inderdaad belangrijk voor het potentieel voor een collectieve geothermie oplossing, aangezien zij een basisvraag kunnen garanderen, hetgeen de financiële haalbaarheid van een collectief systeem verhoogt.

De kaarten tonen dat de randen van de publieke open ruimte roder kleuren en dus een hoger potentieel aangeven dan het midden van een park. Dit is logisch en wenselijk, aangezien deze locaties het dichtst bij potentiële afnemers gelegen zijn. Uiteraard moeten we ook hier benadrukken dat het effectieve potentieel voor collectieve geothermie **zeer projectspecifiek** is, en afhankelijk van meer factoren dan we hier in een Vlaamse oefening rekening kunnen houden zoals het exacte verloop van bestaande kabels en leidingen in de ondergrond, de aanwezigheid van archeologisch erfgoed in de ondergrond, kwetsbare natuur,... . Ook hier geldt de opmerking dat de warmtevraag, die aan de basis ligt van de berekeningen, in de toekomst op een meer gedetailleerde manier beschikbaar komt.



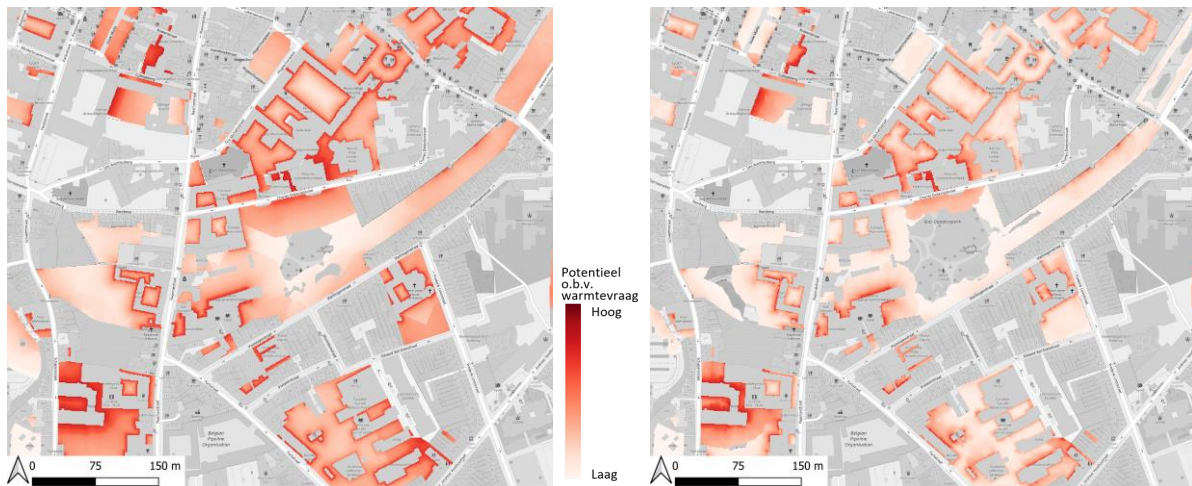
Figuur 4-16: Potentieel van publieke open ruimte voor collectieve systemen op basis van de warmtevraag binnen 50m, rekening houdend met de bodembedekking (Achtergrond: OpenStreetMap)

De kaart kan voor lokale besturen inzicht bieden in welke (delen van) publieke open ruimtes geschikt kunnen zijn als bronlocaties voor collectieve systemen. In de praktijk is er vaak een grootverbruiker nodig om een project opgestart te krijgen en kunnen dan kleinere verbruikers die op de route liggen ook mee aansluiten. Anderzijds betekent het niet dat warmtenetten alleen mogelijk zijn op locaties met een hoge warmtevraag. Er zijn er ook voorbeelden van geothermische warmtenetten bij lage warmtevraag (bv. case 4.2.5 Quartier Blue), maar dat zijn dan typisch nieuwbouwprojecten die niet vertrekken van het potentieel van de publieke open ruimte en de bestaande warmtevraag.

4.4.4.1 Vergelijking geen/wel onderscheid in kosten verhard – hoog groen – onverhard

Om het effect van de verfijning van het potentieel op basis van het type bodembedekking te evalueren, worden twee detail-cases met elkaar vergeleken.

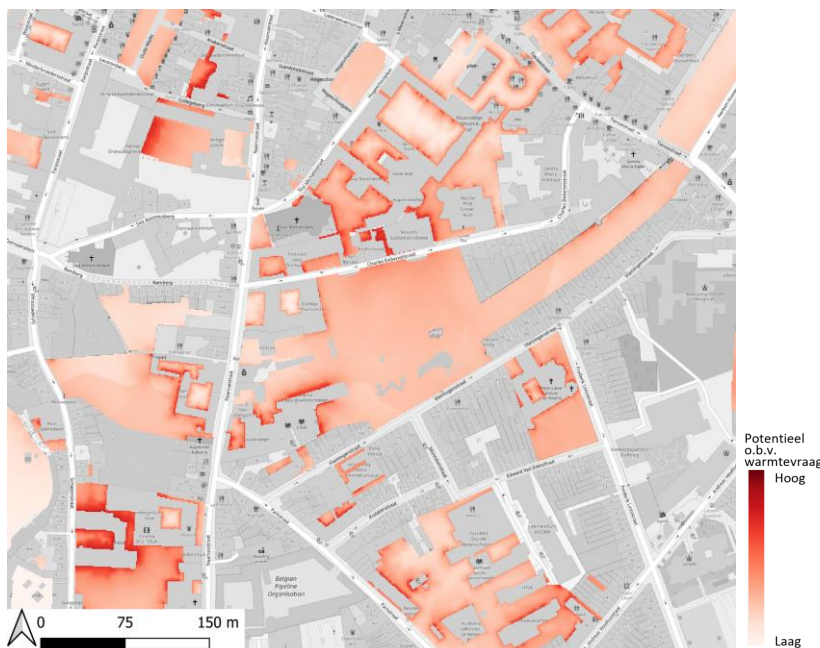
Als er geen rekening wordt gehouden met de verschillen in type ondergrond wordt er telkens de warmtevraag van 50m ver meegenomen. De waarden liggen daarom ook hoger dan wanneer er wel een onderscheid gemaakt wordt (Figuur 4-17). Want omdat een verharde meter dan driedubbel zo veel kost, kan je minder meters afleggen en zal de warmtevraag die je kan bedienen vanuit de open ruimte lager zijn. Dat is ook te zien op de figuur waarbij links (geen onderscheid) de waarden hoger liggen dan rechts (wel onderscheid).



Figuur 4-17: Potentieel berekend op 50m zonder rekening te houden met de bodembedekking (links) en met een verhouding verhard-bomen-onverhard van 3-2-1 (rechts), voorbeeld in Leuven (Achtergrond: OpenStreetMap).

4.4.4.2 Vergelijking van de afstanden (publieke onbebouwde ruimte tot warmtevraag)

Er bestaat algemene consensus dat om de kosten te drukken, de lengte van warmtenetten best zo kort mogelijk gehouden wordt. Maar welke afstanden realistisch zijn is sterk afhankelijk van projectspecifieke parameters. Om abstractie te maken van deze onzekerheid werd de berekening van het potentieel uitgevoerd voor 50 m, 100 m en 200 m. Figuur 4-18 toont het potentieel wanneer uitgegaan wordt van een maximale lengte van 200 m voor het warmtenet en kan vergeleken worden met Figuur 4-17. Hier worden duidelijk grotere gebieden binnen open ruimtes aangeduid als potentieel geschikt. Echter, de locaties met het hoogste potentieel blijven dezelfde in beide kaarten. Het lijkt daarom geen meerwaarde om deze oefening voor nog langere afstanden dan 200m uit te voeren. Het aantal inwoners en de warmtevrage in een eenvoudige buffer rondom de percelen zijn wel tot en met 500m afstand toegevoegd als attribuut aan het bestand van de publieke open ruimte (zie Bijlage E), maar de potentieelkaarten gaan maximaal tot 200m afstand.



Figuur 4-18: Potentieel berekend op 200m met een verhouding verhard-bomen-onverhard van 3-2-1 (rechts), voorbeeld in Leuven (Achtergrond: OpenStreetMap).

- Het gebrek aan rendabiliteit binnen de huidige marktcondities belemmert vandaag de grootschalige uitrol van warmtenetten in Vlaanderen
- Voor integratie in sociale woonwijken is het sociaal tarief een hindernis voor de businesscase.
- Bij de uitrol van een thermisch net is het succes in de praktijk dikwijls afhankelijk van een eerste grote afnemer (regelmatig een private partij). Vaak worden er van deze partij garanties voor afname gevraagd, dit zet de beslissing om aan te sluiten onder druk omdat ze dergelijke afnameplicht niet hebben bij individuele oplossingen¹².
- Het ontwikkelingstraject van collectieve geothermische systemen kent vaak een lange doorlooptijd. De periode tussen de initiële planning en de uiteindelijke realisatie bedraagt doorgaans 5 tot 10 jaar, wat voorfinanciering aanzienlijk bemoeilijkt. Bovendien creëert de onzekerheid over de daadwerkelijke uitvoering van latere projectfasen een bijkomend risico, waardoor investeerders en afnemers terughoudend kunnen zijn. Dit kan leiden tot vertragingen, herzieningen en een verminderde haalbaarheid van het project.

4.5.2 Beleidsaanbevelingen

- De Call groene warmte is momenteel te streng: meer onderzoeks**subsidie** is essentieel om collectieve projecten beter te ondersteunen. De laatste call kon nagenoeg alleen nog aangevraagd worden om de gebouwen aan te sluiten die niet aan energievereisten moesten voldoen bij de omgevingsaanvraag. Verder moesten er harde garanties voor afname meegegeven worden.
- Naar analogie met het Nederlandse systeem kan een **financiering voor de haalbaarheid** van een project nuttig zijn. Indien het project haalbaar is kan de subsidie terugbetaald worden via de opgezette kostenstructuur.
- Het verder doorvoeren van een **tax shift** met lagere accijnzen op elektriciteit ten opzichte van gas kan helpen voor meer rendabele business cases voor oplossingen die gebruik maken van collectieve (geo)thermische systemen.
- **Afwegingskaders** met daarin maatschappelijke- en duurzaamheidsaspecten kunnen overheden bijstaan om beslissingen te nemen over het al dan niet toekennen van gebruiksrechten op de **openbare ruimte**. Hierbij bevelen we aan om de voorkeur te geven aan collectieve projecten, of om te onderzoeken of private projecten niet kunnen worden uitgebreid met een collectieve component. Dit kan voorkomen dat er een ‘first come, first served’ problematiek ontstaat, waarbij partijen met zuiver economische motieven op een suboptimale manier openbare ruimte innemen.¹³
- Aansluitend op voorgaand advies kan een **leidraad** voor steden en gemeenten met concrete randvoorwaarden en regels rond het gebruik van de ondergrond en afstanden tot leidingen, natuurelementen en infrastructuur helpen om een duurzaam gebruik van de ondergrond te waarborgen. In zo’n leidraad kunnen ook richtlijnen met betrekking tot thermische (on)balans vastgelegd worden.
- Op Vlaams niveau kan een kader in verband met tarifiering en regels rond aansluiting op warmtenetten consumenten beschermen.
- Voor collectieve systemen dienen **contracten** de verantwoordelijkheden en regels vast te leggen omtrent de uitbating en het beheer van collectieve systemen, zoals minimale kwaliteitseisen, meetapparatuur en datalogging. Dit moet toelaten om de actuele toestand

¹² Hierbij kan worden opgemerkt dat er dd. 2025 ook onderzoek gedaan wordt naar mini-warmtenetten in Vlaanderen (o.a. door de provincie Oost-Vlaanderen), waarbij specifiek gefocust wordt op kleinschalige cases zonder grote afnemers.

¹³ Voor de diepe ondergrond tracht de Vlaamse 'Structuurvisie Diepe Ondergrond' een dergelijk kader te bieden. Een omvattende structuurvisie ondiepe ondergrond zou een gelijkaardige functie kunnen hebben, zij het dat de concrete invulling van een dergelijke visie in het ondiepe bereik gecompliceerd wordt door het groot aantal factoren dat de ondergrond vervuld en stakeholders die betrokken zijn.

- **Lokale warmteplannen** kunnen belangrijke rol spelen in de verantwoorde uitbouw van collectieve geothermische systemen in Vlaanderen door elementen op te nemen die specifiek betrekking hebben op geothermie. Een goed warmteplan dient daarbij o.a.:
 - Een ruimtelijk gediversifieerd inzicht te bieden in de contextspecifieke mogelijkheden voor collectieve systemen (waar bevinden zich duurzame warmtebronnen en belangrijke afnemers, in welke wijken is er een goede functiemix van gebouwen en een voldoende hoge warmtevraagdichtheid om interessant te zijn voor de installatie van warmtenetten,...)
 - Een overzicht te bieden van de lokaal beschikbare open ruimte waarop geothermische boringen kunnen worden geplaatst
 - Inzicht te bieden in het potentieel voor de lokale ontwikkeling van geothermische systemen met een hoge opbrengst, zoals grootschalige KWO-installaties, die schaalvoordelen opleveren en een efficiëntere energieopwekking mogelijk maken.
 - Aandacht te hebben voor wijken waar er een interferentierisico is of kan ontstaan bij toekomstige individuele ontwikkeling, en specifiek in deze wijken het potentieel van collectieve systemen onderzoeken (vandaag kiezen voor een individuele ontwikkeling kan, in het bijzonder voor grote warmte-afnemers, ervoor zorgen dat een collectieve ontwikkeling in de toekomst onmogelijk wordt door interferentie).
 - Maximaal koppelkansen met projecten in andere domeinen op te lijsten (heraanleg openbaar domein, onthardingsprojecten, vernieuwing riolering, wijkrenovatieprojecten,...)

pagina 134 van 158

5 BESLUIT

Diepe geothermie kan een belangrijke rol spelen bij het realiseren van omgevingsdoelstellingen én binnen het Vlaamse Warmteplan 2025. Een duurzame implementatie van de technologie vereist echter een goed onderbouwd beleid om de efficiëntie van de systemen te waarborgen, binnen de financiële draagkracht van ontwikkelaars en afnemers te blijven, de impact op de ondergrond te beperken en de toegang tot deze duurzame warmtebron voor alle Vlamingen te garanderen.

Deze studie spitste zich toe op drie kernaspecten:

Thermische geleidbaarheid van de Vlaamse ondergrond:

Onze analyse van meetgegevens en literatuurdata heeft geleid tot de opstelling van karakteristieke thermische geleidbaarheidswaarden voor de stratigrafische eenheden in de Vlaamse ondergrond en de ontwikkeling van ruimtelijke kaarten met gemiddelde thermische conductiviteitswaarden in Vlaanderen. We concluderen dat een mathematische afleiding van thermische geleidbaarheden uit thermische responstesten geen betrouwbare resultaten oplevert bij gebrek aan statistisch voldoende kwalitatieve data en stellen daarom een methodologie voor die literatuurdata combineert met een toetsing aan meetgegevens.

Impact van een hoge dichtheid aan geothermische systemen:

Op basis van praktijkvoorbeelden, ruimtelijke studies en modelleringen hebben we de impact van geothermie op de ondergrond en de risico's op interferentie tussen systemen onderzocht. We identificeren drie belangrijke risico's voor de ondergrond:

- Het perforeren van aquitards
- Het achterblijven van materiaal in de bodem
- De lekkage van koelvloeistof

Het risico op interferentie tussen systemen wordt beïnvloed door factoren zoals systeemgrootte, onderlinge afstand, grondwaterstroming en (on)evenwicht in de bodembelasting. Algemeen gezien kan gesteld worden dat interferentie tussen kleinschalige gesloten systemen (< 40-50 kW) onderling enkel van belang is bij een tussenafstand van minder dan ~10-15m. In geval van grote BEO-velden kunnen er wel significante effecten zijn op vlakbijgelegen particuliere boringen. De effecten van gesloten systemen op open systemen zijn meestal verwaarloosbaar. De impact van open systemen op gesloten systemen kan wel significant zijn, ook in positieve zin. Het samenspel tussen de verschillende invloedsfactoren bepaalt hier de grootteorde en de aard van de interferentie. Hetzelfde geldt voor interferentie tussen open systemen onderling. Op een meer grootschalig niveau illustreert deze interferentieanalyse ook hoe een warmtenet op stadsniveau in dichtbebouwde gebieden kan bijdragen aan een eerlijke verdeling van de geothermische energie.

Collectieve geothermische systemen in Vlaanderen:

Uit de analyse van vijf Vlaamse cases identificeerden we een aantal technische, organisatorische, juridische en financiële randvoorwaarden voor collectieve systemen. We besluiten dat de opschaling van collectieve geothermische systemen vooral gehinderd wordt door een gebrek aan een sluitende businesscase. De economische haalbaarheid verbetert aanzienlijk in de volgende situaties:

- In nieuwbouwprojecten met een hoge woningdichtheid
- Bij een slimme functiemix tussen gebouwen en warmtebronnen
- Wanneer er minstens één grote afnemer met een gegarandeerde warmtevraag aanwezig is
- Wanneer subsidies de initiële investeringskosten helpen verlagen

Beleidsaanbevelingen

Op basis van deze inzichten formuleren we de volgende concrete beleidsaanbevelingen:

Thermische geleidbaarheid: De databank met thermische geleidbaarheidswaarden dient verder te worden uitgebreid, de data dienen daarbij voorzien te worden van zo veel mogelijk meet- en ondergrondgegevens, waaronder tijdsduur van opmeten, duur van de proef, grondwaterstand, boordiepte en beschrijving van de lithologie.

Impact van een hoge dichtheid van geothermische systemen: Er is nood aan een meer gedetailleerde publieke ontsluiting van relevante gegevens, vooral voor grotere gesloten systemen. We bevelen aan om, naar analogie met Nederland, rekenregels, tools en beslisbomen te ontwikkelen en publiek beschikbaar te stellen. Hierbij vormt de in dit project ontwikkelde analytische tool voor het inschatten van interferentie tussen gesloten systemen een eerste aanzet. Deze instrumenten kunnen vergunningverleners en ontwikkelaars ondersteunen bij het inschatten van interferentierisico's en bij de verantwoorde inplanning van nabijgelegen geothermische projecten.

Collectieve geothermische systemen:

- De Call Groene Warmte moet hervormd worden om collectieve projecten beter te ondersteunen.
- Een sterke stimulans voor een bredere uitrol van ondiepe geothermie zou volgens de sector gerealiseerd kunnen worden door een taxshift, waarbij de accijnzen op elektriciteit worden verlaagd ten opzichte van gas. Flankerende maatregelen om mensen die in energiearmoede leven niet op extra kosten te jagen zijn belangrijk om ervoor te zorgen dat de energietransitie ook sociaal rechtvaardig gebeurt.
- Extra ondersteuning is vereist voor de ontwikkeling van lokale warmteplannen, die een gedetailleerd inzicht bieden in de contextspecifieke mogelijkheden van geothermische systemen.
- Voor het gebruik van het openbaar domein voor geothermische boringen moeten afwegingskaders worden opgesteld waarin maatschappelijke en duurzaamheidscriteria meewegen tegen louter economische motieven.
- De inname van publieke open ruimte voor ondiepe geothermische bronnen dient in de eerste plaats te worden toegewezen aan collectieve projecten, of aan private projecten met een collectieve component.

Deze studie toont aan dat de verdere ontwikkeling van ondiepe geothermie in Vlaanderen een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan de verduurzaming van de warmtevraag. Een combinatie van doordacht beleid, gerichte subsidies en strategische ondersteuning kan de implementatie versnellen en bijdragen aan een duurzaam en solidair energiesysteem in Vlaanderen.

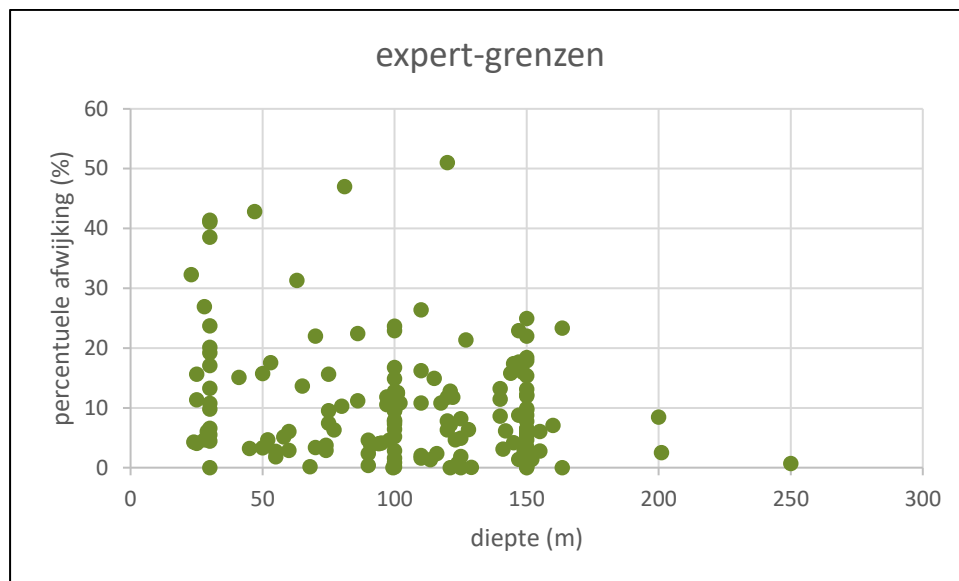
REFERENTIES

- Admiraal, H., 2021. Expertenaadvies over de noodzaak tot ondergrondse planning. Departement Omgeving, Brussel, België 35 pp
- Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., Eisenlohr, L., 2020. A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy*, 145, 914-924.
- Beelen van P, Otte PF, van der Aa M, 2009. Warmte-koude opslag en duurzaam gebruik van de ondergrond. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) 607050007
- Beelen van P., Schijven J.F., de Roda Husman A.M., van der Aa M., 2011. De mogelijke risico's van warmte en koudeopslag voor de grondwaterkwaliteit. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) 607050009/2011
- Brielmann H, Griebler C, Schmidt SI, Michel R, Lueders T, 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol Ecol* 68:273–286
- Brielmann, H., Lueders, T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P., Griebler, C., 2011. Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. *Grundwasser* 16, 77–91.
- Bonte, Matthijs & Stuyfzand, Pieter & Hulsmann, Adriana & Beelen, Patrick., 2011. Underground Thermal Energy Storage: Environmental Risks and Policy Developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society*. 16. 10.5751/ES-03762-160122.
- Bonte, M., van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J., 2013a. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Res.* 47,5088–5100.
- Bonte, M. ; Mesman, G. ; Kools, S. ; Meerkerk, M. ; Schriks, M. ; Kooiman, J.W. 2013b. Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen. BTO rapport (2013.036)
- Borinaga-Trevino, R., Pascual-Munoz, P., Calzada-Pérez, M. Á., & Castro-Fresno, D. 2014. Freeze-thaw durability of cement-based geothermal grouting materials. *Construction and building materials*, 55, 390-397.
- Bot, B., 2016. Grondwaterzakboekje, 465 pp.
- BUUR PoS, VITO, CEDELFT (2021). Regionale Ruimtelijke Energiestrategie: een draaiboek. i.o.v. Departement Omgeving.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. 1959. *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed., Oxford University Press, Oxford, UK.
- Deckers J., De Koninck R., Bos S., Broothaers M., Dirix K., Hambsch L., Lagrou, D., Lanckacker T., Matthijs, J., Rombaut B., Van Baelen K. & Van Haren T., 2019. Geologisch (G3Dv3) en hydrogeologisch (H3D) 3D-lagenmodel van Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van: Vlaams Planbureau voor Omgeving (Departement Omgeving) en Vlaamse Milieumaatschappij 2018/RMA/R/1569.
- Dedecker, J., Vierstraete, E., Bosmans, L., Desmet, R., De Brucker, L., Possemiers, M. 2024. Geothermie in de openbare ruimte. Project in opdracht van Stad Antwerpen (23068.001).
- Dehkordi, S.E., Schincariol, R.A. 2014. Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed-loop geothermal heat pump systems. *Hydrogeol J* 22, 189–203.
- Desmedt, J., Draelants, G. 2009. Studie best beschikbare boortechnieken en evaluatie geschikte hydrothermische technieken in Brussel: aanvraag, kritische analyse en milieuexploitatievoorwaarden. Studie uitgevoerd in opdracht van BIM, VITO-rapport
- De Vries, E., Hoekstra N., 2012. Meer met bodemenergie, mogelijkheden voor combinatie van WKO met bodemsanering, 144 pp.

- pagina 138 van 158

- Santi, P.M., McCray, J.E. & Martens, J.L., 2006. Investigating cross-contamination of aquifers. *Hydrogeol J* 14, 51–68
- SERV, 2024, collectieve projecten: warme dekens voor de energietransitie
- SIKB, 2023a. Handreiking besluiten open bodemenergiesystemen (BUM BE deel 1 – OBES, 25-31 & 76-98.
- SIKB, 2023b. Bijlage 2 BUM en HUM BE deel 2 – GBES, Methode toetsen interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen, p. 7-13.
- Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina-Giraldo, N., Kinzelbach, W., 2017. *Thermal Use of Shallow Groundwater*. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- TCB, 2009. Advies Duurzaam gebruik van de bodem voor WKO. Technische Commissie Bodem (TCB), Den Haag.
- Verburg, R., Slenders, H., Hoekstra, N., van Nieuwkerk, E., Guijt, R., van der Mark, B., Mimpfen, J., 2010. Handleiding BOEG, bodemenergie en grondwaterverontreiniging, het ijs gebroken, 124 pp.
- Vermooten, S; Lijzen JPA, 2015. Ecosysteemdiensten van grondwater en ondergrond, beschrijvingen en relaties met activiteiten en maatregelen. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2014-0167, 178pp
- Van Lysebetten, G.; Hubrechts, N., François, L. 2013. Geschiktheidskaarten Geothermie – Thermische geleidbaarheid ondergrond Vlaanderen, SmartGeotherm.
- Vandevyvere, 2024. Doelmatig naar klimaatneutraal. Beknopt kennisdocument energietransitie gebouwen in Vlaanderen. Reflectienota in opdracht van de Minaraad.
- VREG, 2023. Over de activiteit warmtenetten bij de VREG in 2022-2023.
- VVSG, 2023. Warmtenetten in het Vlaamse Gewest – Juridische leidraad voor lokale besturen.
- Witte, H.J.L., Boots, R. 2022. ITGBES-PRO, a new method for the optimization and integrated design of clustered individual borehole heat exchanger systems. In proceedings: European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany. 17-21 October 2022.
- WTCB, 2016. Technische voorlichting nr 259 - Ondiepe geothermie - Ontwerp en uitvoering van bodemenergiesystemen met U-vormige bodemwarmtewisselaars.
- Verburg, R., Slenders, H., Hoekstra, N., van Nieuwkerk, E., Guijt, R., van der Mark, B., Mimpfen, J., 2010. Handleiding BOEG, bodemenergie en grondwaterverontreiniging, het ijs gebroken, 124 pp.

te halen. Immers 1 ETRT-meting minder bij de outliers en de ratio zou dan ook ongeveer 14% bedragen.



Het percentueel verschil ten opzichte van de gemeten lambda-waarde per waarnemingen uitgezet ten opzichte van de diepte van de waarneming

- **Diepte van de meting:** Voor 9 van de 14 outliers is de diepte van de meting kleiner dan 100m, wat ongeveer 64% uitmaakt. Op de ganse dataset bedraagt het aantal waarnemingen minder diep dan 100m slechts 36%. Mogelijk kan hier een oorzaak voor de afwijkingen gevonden worden aangezien de ratio bij de outliers merkelijk hoger ligt (bijna het dubbele). Ook bij lagere percentuele verschillen tussen de gemeten en berekende gemiddelde thermische geleidbaarheid blijft het aantal afwijkende waarnemingen ongeveer dubbel zo groot bij metingen met een kleine diepte (<100m) in vergelijking tot metingen over een grote diepte (>100m). En hoe lager de grens tussen ondiepe en diepe waarnemingen gezet wordt des te groter het percentueel verschil tussen het aantal waarnemingen dat als afwijkend kan aanzien worden. Zo gaat het bij een grens op 100m van ongeveer het dubbele naar ongeveer het drievoudige bij een grens op 50m. Het lijkt er bijgevolg op dat de diepte van de meting een factor is die een rol speelt in de betrouwbaarheid van de waarneming.
- **De dikte van de niet verzadigde zone:** de dikte van de niet verzadigde zone wordt voor elk van de waarnemingen afgeleid uit de kaart met het gemiddelde grondwaterpeil (Francken & Wolfs; 2022). De dikte van de niet verzadigde zone varieert bij de outliers tussen 1.21m en 12.88m. Percentueel ten opzichte van de totale diepte van het boorgat gaat het hier om 1.56% tot 30.37%. Hoe groter het percentueel aandeel van de niet verzadigde zone des te groter de invloed ervan op de gemiddelde thermische geleidbaarheid (zie 2.2.6.2). Enkel voor 3 van de 14 outliers ligt dit aandeel hoger dan 10%, wat neerkomt op ongeveer 21% van het aantal afwijkende waarnemingen. Op de ganse dataset zijn er 31 boringen op de 176 of ongeveer 18% waarbij het aandeel van de niet verzadigde zone groter is dan 10%. De impact van de niet verzadigde zone kan dus niet als oorzaak voor de afwijkende meetresultaten gezien worden.
- **Tijdsduur van de meting:** de duur waarover de waarnemingen plaatsheeft varieert tussen 30 uren en 185 uren, met een gemiddelde van ongeveer 78 uren. Van 16 waarnemingen is de tijdsduur niet gekend. De totale dataset bevat 14 waarnemingen (8%) met een verschil tussen

de gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid sterk kan afwijken van de berekende lambda-waarde, is dan ook zonder een gerichte studie moeilijk uit de huidige dataset te achterhalen.

Casestudies

Voor de 4 outliers die zowel in de regressiemethode als in de expert grenzen werkwijze voorkomen, kan er met relatief grote zekerheid gesteld worden dat de gemeten thermische geleidbaarheid sterk beïnvloed is geweest door afwijkende omstandigheden tijdens het meetproces. Wat de oorzaak van deze afwijkende omstandigheden was, kan moeilijk met zekerheid vastgesteld worden. Op basis van voorgaande analyse gaat het om 3 verschillende uitvoerders, 2 maal Terra Energy, 1 maal Geoforage en 1 niet gekende uitvoerder. Verder gaat het om 3 TRT-metingen en 1 ETRT-meting. Qua diepte zijn er 2 metingen met een minder diep dan 50m en 2 met een diepte groter dan 100m. De niet verzadigde zone neemt slechts in één meting een aandeel van meer dan 10% in, in 2 gaat het om ongeveer 5% en in 1 meting om ongeveer 1.5%. Wat tijdsduur van de metingen betreft, zijn er 2 waarnemingen die korter dan 48 uren duren en 2 waarvoor er geen informatie rond tijdsduur gekend is. Verder gaat het om 2 overschattingen en 2 onderschattingen van de gemiddelde thermische geleidbaarheid.

Het gaat om 2 waarnemingen in Anderlecht, 1 in Ranst en 1 in Aalter. Geografisch en geologisch gezien gaat het dus om 3 verschillende situaties.

Aalter (1):

De waarneming in Aalter werd uitgevoerd door Terra Energy binnen de meetcampagnes voor ALBON. Hier werd de gemiddelde thermische geleidbaarheid van de Formatie van Gentbrugge bepaald in een boorgat van 30m diep over een tijdsduur van minimaal 48 uren en bij een grondwaterpeil op 1.57m onder het maaiveld. De gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid bedraagt 3.26W/mK. De TRT-meting geeft een overschatting van 41% ten opzichte van de berekende lambda-waarde (uit de expert grenzen) en ongeveer 29% uit de regressiemethode. Het gaat om een vlak terrein, er is geen sterk reliëf aanwezig. Er komen veel plassen, kanaaltjes en kleinere waterlopen voor (ondiepe grondwatertafel). In de omgeving, maar op een afstand van minstens 1km, zijn er veel grondwatervergunningen en één bemaling. De dichtstbij gelegen geothermische boring (150m diep) ligt op ongeveer 500m van de waarneming. Het Quartair bedraagt er minder dan 0.50m en wordt gevolgd door een pakket van ongeveer 14m behorende tot de Leden van Aalterbrugge en Vlierzele en nog eens 14m sediment van het Lid van Pittem, de laatste 3 behorend tot de Formatie van Gentbrugge. Het gaat hier bijgevolg hoofdzakelijk om fijn zand en klei, waardoor er eerder een lage thermische geleidbaarheid verwacht wordt en niet de hoge gemeten waarde.

Anderlecht (2 en 4):

De 1^{ste} waarneming in Anderlecht ligt op de westkant van de vallei van de Zenne. De uitvoerder en de tijdsduur van de meting zijn niet gekend. Het gaat om een boring van 120m diepte en het grondwaterpeil ligt op ongeveer 13m onder het maaiveld. De niet verzadigde zone neemt bijgevolg een aandeel van meer dan 10% in. De gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid bedraagt 5.54W/mK. De ETRT-meting geeft een overschatting van ongeveer 51% (uit de expert grenzen methode) en ongeveer 43% volgens de regressiemethode. De waarneming ligt op een heuvelrug ongeveer 17m boven de Zennevallei. In vergelijking tot de vorige en de volgende waarnemingen is er een relatief sterk reliëf aanwezig. Er komen geen waterlopen of beken in de onmiddellijke nabijheid voor. Op een minimale afstand van ongeveer 1500m komen er grondwatervergunningen en geothermische boring (50m diep) voor. Het Quartair bestaat er uit ongeveer 28m fluviatiele afzettingen van de Zenne, gevolgd door 20m kleiige sedimenten van de Formatie van Kortrijk, 12m van de zandige Formatie van Hannut en 60m Sokkelgesteenten. Omwille van de dikke zandige en grindrijke eenheden uit het Quartair en de Formatie van Hannut evenals omwille van het

Sokkelgesteente wordt er een relatief hoge lambda-waarde verwacht, maar toch niet zo hoog als de extreem hoog gemeten thermische geleidbaarheid.

De 2^{de} waarneming in Anderlecht ligt in de Zennevallei op een 2km van de voorgaande. Ze werd uitgevoerd door Geoforage. Het gaat om een waarneming van 110m diep, waarvan de tijdsduur niet gekend is. Het grondwaterpeil ligt op gemiddeld 1.36m onder het maaiveld. De gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid bedraagt 2.06W/mK. In tegenstelling tot de vorige waarneming geeft deze TRT-meting een onderschatting van ongeveer 26% ten opzichte van de berekende lambda-waarde (uit de expert grenzen) en ongeveer 47% uit de regressiemethode. Het gaat om een vlak terrein, er is geen sterk reliëf aanwezig. De Zenne en het Kanaal Charleroi-Brussel-Rupel liggen op ongeveer 200m van de boorlocatie, vandaar ook de ondiepe grondwatertafel. In de omgeving komen verschillende grondwatervergunningen voor evenals geothermische boringen (60m tot 70m diep). De meest dichtbij gelegen geothermische boring ligt op een afstand van ongeveer 650m. Het Quartair bestaat er uit ongeveer 16m alluviale en fluviatiele sedimenten van de Zenne, gevolgd door 19m kleiige sedimenten van de Formatie van Kortrijk, 24m van de Formatie van Hannut en 52m Sokkelgesteenten. Omwille van de dikke zandige eenheden uit het Quartair en de Formatie van Hannut evenals omwille van het Sokkelgesteente wordt er een hogere lambda-waarde verwacht dan deze die gemeten werd.

Opvallend bij de waarnemingen van Anderlecht is dat de ene een overschatting geeft en de andere een onderschatting, terwijl beiden een zeer gelijkaardige geologische opbouw hebben. Het belangrijkste verschil zit in de topografische positie en de daarbij aansluitende diepte van de grondwatertafel. Maar hier zou de aanwezigheid van een relatief dikke niet verzadigde zone in de 1^{ste} waarneming (13m) een omgekeerde uitwerking moeten hebben, met andere woorden een groot aandeel “droog” materiaal zou de gemeten gemiddelde geothermische geleidbaarheid naar onder moeten halen en niet tot een overschatting moeten leiden. Het omgekeerde kan dan ook weer gezegd worden voor de 2^{de} waarneming waar het grondwater op slechts 1.36m onder het maaiveld ligt.

Ranst (132):

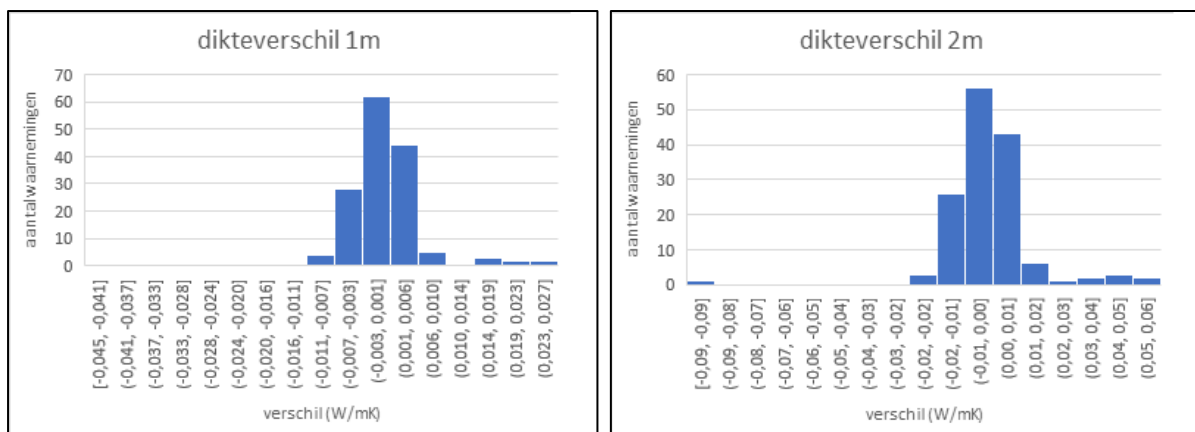
De waarneming in Ranst werd uitgevoerd door Terra Energy binnen de meetcampagne voor ALBON. Hier is de Formatie van Berchem de target. Het boorgat heeft een diepte van 47m en er werd gedurende minimaal 40 uren gemeten. Het grondwaterpeil ligt er op 5.53m onder het maaiveld. De gemeten gemiddelde thermische geleidbaarheid bedraagt 1.74W/mK. De TRT-meting geeft een onderschatting van ongeveer 43% ten opzichte van de berekende lambda-waarde (uit de expert grenzen) en ongeveer 46% uit de regressiemethode. Het gaat weerom om een vlak terrein, er is geen sterk reliëf aanwezig. Er komen verschillende kleine waterlopen voor in nabijheid van de waarneming. In de omgeving zijn er verschillende grondwatervergunningen, waarvan de dichtstbij gelegen op ongeveer 300m afstand ligt. Op een afstand van 500m zijn er ook een bemaling en geothermische boringen (70m tot 100m diep) aanwezig. Het Quartair is er ongeveer 4m dik, gevolgd door 2 dunne pakketten van ongeveer 1m van de Formaties van Lillo en Kattendijk, verder nog 13m van de Formatie van Diest en 28m van de Formatie van Berchem. Het gaat hier bijgevolg voornamelijk over fijn en middelmatig tot grof zand. Er wordt dan ook een relatief hogere lambda-waarde verwacht en niet de eerder lage gemeten waarde.

In elk van de casestudies komen er in de omgeving (radius van 500m à 1500m) grondwatervergunningen en geothermische boringen voor. Dit geldt ook voor de meeste, zo niet alle andere waarnemingen uit de dataset en voor die afstand. Bijgevolg is het moeilijk om hieromtrent enige conclusies te trekken met betrekking tot de mogelijke invloed bij de verschillende afwijkende waarnemingen. Voor Aalter en Ranst kan mogelijk de beperkte diepte en/of de beperkte tijdsduur van de metingen als oorzaak aangehaald worden (zie 2.2.5.1). Bij de waarnemingen te Anderlecht zal de

Impact dikteverschillen en niet verzadigde zone

Dikteverschillen

Bij een afname in dikte van 1m is er een gemiddeld verschil in lambda-waarde van minder dan 0.00W/mK, met een maximum van ongeveer 0.03W/mK en een minimum van ongeveer -0.05W/mK. Dit komt neer op een relatief verschil van gemiddeld 0.22%, een maximum van 1.86% en een minimum van 0.01%. Hierbij zijn 152 waarnemingen van de 161 betrokken. Bij een afname in dikte van 2m zijn er nog 143 van 161 waarnemingen betrokken en is het relatief verschil gemiddeld 0.46%, het maximum bedraagt dan 3.88% en het minimum 0.02%.



pagina 146 van 158

dikteverschil 5m

verschil (W/mK)	aantal waarnemingen
≤ -0,10	1
(-0,10, -0,09]	0
(-0,09, -0,07]	0
(-0,07, -0,06]	0
(-0,06, -0,05]	3
(-0,05, -0,03]	3
(-0,03, -0,02]	13
(-0,02, -0,01]	27
(-0,01, 0,01]	26
(0,01, 0,02]	23
(0,02, 0,03]	11
(0,03, 0,05]	4
(0,05, 0,06]	0
(0,06, 0,07]	0
(0,07, 0,09]	1
(0,09, 0,10]	1
> 0,10	4

dikteverschil 10m

verschil (W/mK)	aantal waarnemingen
≤ -0,10	2
(-0,10, -0,09]	0
(-0,09, -0,07]	3
(-0,07, -0,06]	2
(-0,06, -0,05]	4
(-0,05, -0,03]	4
(-0,03, -0,02]	11
(-0,02, -0,01]	19
(-0,01, 0,01]	9
(0,01, 0,02]	7
(0,02, 0,03]	8
(0,03, 0,05]	5
(0,05, 0,06]	6
(0,06, 0,07]	0
(0,07, 0,09]	1
(0,09, 0,10]	1
> 0,10	4

Dit betekent dat er al belangrijke verschillen moeten optreden tussen de werkelijke dikte van een lithostratigrafische eenheid op een bepaalde locatie en de dikte van diezelfde eenheid uit het G3Dv3.1 om een significante invloed te hebben op de berekende gemiddelde thermische geleidbaarheid op diezelfde locatie. De impact van de dikteverschillen in W/mK is beduidend kleiner dan de spreiding op de lambda-waarde binnen één lithoklasse. Verder moet het dikteverschil al groter zijn dan 5m om een invloed te hebben op de gemiddelde thermische geleidbaarheid die groter is dan het gemiddelde verschil tussen de gemeten en de berekende lambda-waarde. Verder blijft de gemiddelde impact van de meetomstandigheden of meetopstelling percentueel gezien (13% uit de weliswaar beperkte set aan “dubbels”, zie 2.2.2.3) veel groter dan die van de dikteverschillen.

Niet verzadigde zone

pagina 147 van 158

Algemeen gezien blijft de impact van de niet verzadigde zone op de thermische geleidbaarheid eerder beperkt. Enkel in geval van een diepe grondwatertafel in vergelijking tot de diepte van de boring dient er rekening gehouden te worden met een impact van de niet verzadigde zone met sediment in “droge” toestand op de gemeten en/of berekende gemiddelde thermische geleidbaarheid van een locatie. Uiteindelijk blijft de impact van de niet verzadigde zone in W/mK beduidend kleiner dan de spreiding op de lambda-waarde binnen één lithoklasse. Verder blijft voor meer dan 90% van de waarnemingen deze impact kleiner dan het gemiddelde verschil tussen de gemeten en de berekende lambda-waarde. Tenslotte is voor ongeveer dan 95% van de waarnemingen de impact op de lambda-waarde als gevolg van de niet verzadigde zone kleiner dan de gemiddelde invloed van de meetopstelling of de meetomstandigheden (13% uit de weliswaar beperkte set aan “dubbels”, zie 1.2.2.3)

BIJLAGE B – LAMBDA-WAARDEN PER LITHOSTRATIGRAFISCHE EENHEID IN VLAANDEREN

volgorde_id	code	klasse_ID	lithoklasse_toegekend	lambda
1	A	0	antropogeen	1.96
2	010101Q_GtAb	15	fijn_zand	2.24
3	010102Q_GtDp	18	middelfijn_zand	2.42
4	010103Q_GtDi_GtTi_GtOg	15	fijn_zand	2.24
5	0101Q_Gt	15	fijn_zand	2.24
6	010201Q_VICa_VIDu	6	klei_fijn_zand_veen	1.70
7	010202Q_VIDh	21	middel_zand	2.60
8	0102Q_VI	6	klei_fijn_zand_veen	1.70
9	0103Q_Ab_Sk	10	leem_silt_klei_veen_zand_grind	1.94
10	0104Q_Ve_Gm	9	leem	1.88
11	0105Q_Lk_Ln_Zd	29	grind	3.08
12	010601Q_StLo	26	grof_zand	2.91
13	010602Q_StHa	26	grof_zand	2.91
14	010603Q_StBo	26	grof_zand	2.91
15	0106Q_St	26	grof_zand	2.91
16	0107Q_Rb_Kh_Mb_Mx_Ag_Ow_El_Ot_Hz	28	grind_middel_zand_leem	3.02
17	0108Q_We	4	klei_fijn_zand	1.58
18	0109Q_My	15	fijn_zand	2.24
19	01Q	27	grind_middel_zand_leem_silt_klei	2.97
20	01Q_nt_pakket	27	grind_middel_zand_leem_silt_klei	2.97
21	0201NE_Me	26	grof_zand	2.91
22	0202NE_MI	24	middelgrof_zand	2.78
23	020301NE_KzX	19	middel_zand_klei	2.48
24	020302NE_KzBr	25	grof_zand_klei_veen	2.84
25	020303NE_KzWb	26	grof_zand	2.91
26	0203NE_Kz	26	grof_zand	2.91
27	020401NE_LiX_Pd	18	middelfijn_zand	2.42
28	020402NE_LiZa_LiMe	24	middelgrof_zand	2.78
29	020403NE_LiKr	18	middelfijn_zand	2.42

30	020404NE_LiOo_LiLu	21	middel_zand	2.60
31	0204NE_Li_Pd	21	middel_zand	2.60
32	0205NE_Kd_Kl	18	middelfijn_zand	2.42
33	0206NE_Di	24	middelgrof_zand	2.78
34	0207NE_Di_Bb	21	middel_zand	2.60
35	020801NE_BbGe	18	middelfijn_zand	2.42
36	020802NE_BbHo	15	fijn_zand	2.24
37	0208NE_Bb	18	middelfijn_zand	2.42
38	020901NE_BcAn_BcZo_BcKi_Vo	18	middelfijn_zand	2.42
39	020902NE_BcEd	15	fijn_zand	2.24
40	0209NE_Bc_Vo	18	middelfijn_zand	2.42
41	02NE	19	middel_zand_klei	2.48
42	030101PA_VoSo	15	fijn_zand	2.24
43	030102PA_VoVe	2	klei	1.46
44	030103PA_VoVo	18	middelfijn_zand	2.42
45	0301PA_Vo	18	middelfijn_zand	2.42
46	0302PA_Eg	14	fijn_zand_silt	2.18
47	030301PA_BmBt	7	silt_klei	1.76
48	030302PA_BmPu	2	klei	1.46
49	030303PA_BmTe	1	zware_klei	1.40
50	030304PA_BmBw	8	silt	1.82
51	0303PA_Bm	3	klei_silt	1.52
52	030401PA_BiKe	21	middel_zand	2.60
53	030402PA_BiKs	2	klei	1.46
54	030403PA_BiBe	18	middelfijn_zand	2.42
55	0304PA_Bi	17	middelfijn_zand_klei	2.36
56	030501PA_BoKe	24	middelgrof_zand	2.78
57	030502PA_BoOb	23	middelgrof_zand_mergel	2.73
58	030503PA_BoHe_BoBt	1	zware_klei	1.40
59	0305PA_Bo	22	middelgrof_zand_mergel_klei	2.66
60	030601PA_ZzRu	15	fijn_zand	2.24
61	030602PA_ZzWa	2	klei	1.46
62	030603PA_ZzBa	15	fijn_zand	2.24

96	031701PA_TiKn	5	klei_fijn_zand_mergel	1.64
97	031702PA_TiLo_TiDo	5	klei_fijn_zand_mergel	1.64
98	0317PA_Ti	5	klei_fijn_zand_mergel	1.64
99	031801PA_HnGr	15	fijn_zand	2.24
100	031802PA_HnCh_HnLi_HnHa	14	fijn_zand_silt	2.18
101	031803PA_HnWa	1	zware_klei	1.40
102	031804PA_HnBe	2	klei	1.46
103	0318PA_Hn	4	klei_fijn_zand	1.58
104	031901PA_HsMa	2	klei	1.46
105	031902PA_HsGe	11	mergel	2.00
106	031903PA_HsOr	15	fijn_zand	2.24
107	0319PA_Hs	12	mergel_fijn_zand	2.06
108	032001PA_OpEi	15	fijn_zand	2.24
109	032002PA_OpOp	2	klei	1.46
110	0320PA_Op	4	klei_fijn_zand	1.58
111	0321PA_Ho	39	kalkareniet	2.71
112	03PA	16	middelfijn_zand_klei_silt_mergel	2.30
113	0401KR_Ma_Ku	39	kalkareniet	2.71
114	0402KR_Ne_Do_Gu_Va_Be_Vg_Es_Ms	37	krijt_silex_mergel_middel_zand	2.19
115	0403KR_Ak	20	middel_zand_zandsteen	2.55
116	04KR	38	kalkareniet_krijt_silex_mergel	2.47
117	05JU	30	kleisteen	2.38
118	05JU_Aa_SI	30	kleisteen	2.38
119	06TR_07PE	36	kleisteen_zandsteen_kalksteen_evaporiet	3.38
120	06TR_Ke_Mu_Ro_Bu_07PE_He	36	kleisteen_zandsteen_kalksteen_evaporiet	3.38
121	0801CA_We	31	kleisteen_siltsteen_zandsteen_steenkool	2.47
122	0802CA_Na	34	kleisteen_zandsteen_kalksteen	3.05
123	0803CA_Di	40	kalsteen_dolomiet	3.43
124	08CA	32	kleisteen_siltsteen_zandsteen_kalksteen_dolomiet_steenkool	3.11
125	09DE	35	kleisteen_zandsteen_kalksteen_conglomeraat	3.15
126	10SI_11OR_12CM	33	kleisteen_siltsteen_zandsteen_kwartsiet	3.12

BIJLAGE C – LAMBDA-WAARDEN PER LITHOKLASSE

klasse_ID	lithoklasse	lambda_min	lambda_max	lambda_average	lambda_used
0	antropogeen	0.50	3.00	1.75	1.96
1	zware_klei	1.00	1.50	1.25	1.40
2	klei	1.04	1.57	1.31	1.46
3	klei_silt	1.07	1.64	1.36	1.52
4	klei_fijn_zand	1.11	1.71	1.41	1.58
5	klei_fijn_zand_mergel	1.14	1.79	1.46	1.64
6	klei_fijn_zand_veen	1.18	1.86	1.52	1.70
7	silt_klei	1.21	1.93	1.57	1.76
8	silt	1.25	2.00	1.63	1.82
9	leem	1.29	2.07	1.68	1.88
10	leem_silt_klei_veen_zand_grind	1.32	2.14	1.73	1.94
11	mergel	1.36	2.21	1.79	2.00
12	mergel_fijn_zand	1.39	2.29	1.84	2.06
13	fijn_zand_klei	1.43	2.36	1.90	2.13
14	fijn_zand_silt	1.46	2.43	1.95	2.18
15	fijn_zand	1.50	2.50	2.00	2.24
16	middelfijn_zand_klei_silt_mergel	1.54	2.57	2.05	2.30
17	middelfijn_zand_klei	1.57	2.64	2.11	2.36
18	middelfijn_zand	1.61	2.71	2.16	2.42
19	middel_zand_klei	1.64	2.79	2.22	2.48
20	middel_zand_zandsteen	1.68	2.86	2.27	2.55
21	middel_zand	1.71	2.93	2.32	2.60
22	middelgrof_zand_mergel_klei	1.75	3.00	2.38	2.66
23	middelgrof_zand_mergel	1.79	3.07	2.43	2.73
24	middelgrof_zand	1.82	3.14	2.48	2.78
25	grof_zand_klei_veen	1.86	3.21	2.54	2.84
26	grof_zand	1.89	3.29	2.59	2.91
27	grind_middel_zand_leem_silt_klei	1.93	3.36	2.65	2.97
28	grind_middel_zand_leem	1.96	3.43	2.70	3.02
29	grind	2.00	3.50	2.75	3.08

30	kleisteen	0.25	4.00	2.13	2.38
31	kleisteen_siltsteen_zandsteen_steenkool	0.34	4.07	2.21	2.47
32	kleisteen_siltsteen_zandsteen_kalksteen_dolomiet_steenkool	0.64	4.90	2.77	3.11
33	kleisteen_siltsteen_zandsteen_kwartsiet	0.75	4.81	2.78	3.12
34	kleisteen_zandsteen_kalksteen	0.53	4.90	2.72	3.05
35	kleisteen_zandsteen_kalksteen_conglomeraat	0.79	4.82	2.81	3.15
36	kleisteen_zandsteen_kalksteen_evaporiet	0.97	5.06	3.01	3.38
37	krijt_silex_mergel_middel_zand	0.90	3.00	1.95	2.19
38	kalkareniet_krijt_silex_mergel	0.90	3.50	2.20	2.47
39	kalkareniet	1.00	3.83	2.42	2.71
40	kalksteen_dolomiet	0.62	5.50	3.06	3.43

BIJLAGE D – FACIESVERSCHILLEN

volgord e_id	code	Laterale facies 1	Laterale facies 2	Laterale facies 3
37	0208NE_Bb	Formatie van Bolderberg deels	Formatie van Berchem	
47	030301PA_BmBt	Lid van Boerentang	Formatie van Eigenbilzen	
51	0303PA_Bm	Formatie van Boom deels	Formatie van Bilzen	
52	030401PA_BiKe	Lid van Kerniel	deels Lid van Terhagen?	
53	030402PA_BiKs	Lid van Kleine Spouwen	deels Lid van Terhagen	
54	030403PA_BiBe	Lid van Berg	Lid van Belsele-Waas	
55	0304PA_Bi	Formatie van Bilzen	deels Formatie van Boom	
63	0306PA_Zz	Formatie van Zelzate deels	Formatie van Sint- Huibrechts-Hern	
66	0307PA_Sh	Formatie van Sint- Huibrechts-Hern deels	Formatie van Zelzate	
91	031602PA_KoRo	Lid van Roubaix	Formatie van Mons-en- Pévèle	
100	031802PA_HnCh_HnLi_Hn Ha	Lid van Cherq	Lid van Halen	Lid van Lincent
104	031901PA_HsMa	Lid van Maaseik	Lid van Gelinden	
113	0401KR_Ma_Ku	Formatie van Maastricht	Formatie van Kunrade	
114	0402KR_Ne_Do_Gu_Va_B e_Vg_Es_Ms	Formatie van Nevele	Formatie van Gulpen	Formatie van Dorne

BIJLAGE E – OPGELEVERDE DATABESTANDEN

GIS-data:

Thermische geleidbaarheid:

1. *Vaste_rots_ondiep.gpkg*:
Polygoonbestand dat weergeeft waar vaste rots voorkomt op een diepte kleiner dan het dieptecriterium
2. *Lambda_dieptecriterium.tif*:
Raster van de gemiddelde thermische geleidbaarheid (W/mK) tot op het dieptecriterium.
3. *Lambda_lossegesteenten.tif*:
Raster van de gemiddelde thermische geleidbaarheid (W/mK) tot op de vaste rots of het dieptecriterium.

Ruimtelijke diversifiëring: risicozones voor interferentie

1. *Small_percelen.gpkg*: Clusters van minstens 3 percelen in Vlaanderen met een breedte van maximum 15m.
2. *Risicozones_hoge_densiteit_radius30m_buffer15.tif*: Risicozones voor een hoge dichtheid van gesloten systemen, op basis van heatmaps van de warmtevraag over een afstand van 30 meter vanuit de centroides van de percelen. Enkel zones van 15m rondom een cluster van kleine percelen worden behouden.
3. *Style_risicozones_hoge_densiteit_5kl.qml*: Q-Gis stijl bestand dat gebruikt kan worden om de raster op een correcte manier te kleuren

Ruimtelijke diversifiëring: potentieel van publieke open ruimtes

1. *publieke_open_ruimte.gpkg*:
de publieke open ruimte in Vlaanderen zoals beschreven in paragraaf 4.4, met informatie over het % groen, parking, verharding binnen het perceel en de inwoners en warmtevraag in de omgeving (afstanden 50m tot 500m).
2. *publieke_open_ruimte_opgedeeld_plus_attributen.gpkg*:
idem als *publieke_open_ruimte.gpkg*, waarbij de grote percelen in kleinere hokken van 20x20m opgedeeld zijn om fijnmaziger informatie over de publieke open ruimte weer te geven.
3. *Potentieelkaart_50m_1_2_3.tif*:
het potentieel van publieke open ruimtes in Vlaanderen als bronlocatie voor collectieve geothermische systemen, maximale lengte 50 m. Diversifiëring op basis van type bodembedekking¹⁴
4. *Potentieelkaart_50m_alles1.tif*:
het potentieel van publieke open ruimtes in Vlaanderen als bronlocatie voor collectieve geothermische systemen, maximale lengte 50 m.. Geen diversifiëring op basis van type bodembedekking
5. *Potentieelkaart_100m_1_2_3.tif*:
het potentieel van publieke open ruimtes in Vlaanderen als bronlocatie voor collectieve geothermische systemen, maximale lengte 100 m. Diversifiëring op basis van type bodembedekking
6. *Potentieelkaart_100m_alles1.tif*:
het potentieel van publieke open ruimtes in Vlaanderen als bronlocatie voor collectieve geothermische systemen, maximale lengte 100 m. Geen diversifiëring op basis van type bodembedekking
7. *Potentieelkaart_200m_1_2_3.tif*:
het potentieel van publieke open ruimtes in Vlaanderen als bronlocatie voor collectieve geothermische systemen, maximale lengte 200 m. Diversifiëring op basis van type bodembedekking
8. *Style_potentieelkaart_collectief.qml*:
Q-Gis stijl-bestand dat gebruikt kan worden om de rasters op een correcte manier in te kleuren.

Gestructureerde data:

Thermische geleidbaarheid:

¹⁴ Warmtenet door verharding kost 3x zoveel als onverhard, door hoog groen kost 2x zoveel als door onverhard terrein en er mogen geen leidingen door gebouwen lopen

1. *TRT_ETRTdata.xlsx*:
Dataset van thermische responstesten in Vlaanderen
2. *Lambda_lithoklasse_lithostrat.xlsx*:
Dataset met 2 tabbladen. Tabblad g3dv3: link tussen stratigrafische eenheden van G3Dv3 (kleinst mogelijke niveau), een lithoklasse en de in dit project berekende thermische geleidbaarheid (W/mK). Tabblad lithoklassen: Minimale, Maximale, gemiddelde en finaal gebruikte thermische geleidbaarheden voor 41 in Vlaanderen voorkomende lithoklassen.

Niet gestructureerde data:

Analytische tool voor het berekenen van interferentie:

1. *Interferentietool.ipynb*:
Jupyter Notebook met daarin de analytische tool die toelaat om, gegeven een aantal inputparameters, de interferentie tussen verschillende ondiepe geothermische systemen te berekenen en visualiseren. De notebook kan gerund worden in een python 3.11 omgeving.
2. *INPUT – Wells.xlsx*:
Inputbestand voor de interferentietool. Bevat verschillende tabbladen die toelaten relatieve coördinaten, dieptes en vermogens van verschillende gesloten geothermische bronnen in te voeren.
3. *OUTPUT – dT_FullField.csv*:
Voorbeeld resultaten bestand met de temperatuursverschillen in het volledige veld op het einde van de simulatie.
4. *OUTPUT – dT_MATRIX_alltimes.csv*:
Voorbeeld resultaten bestand met de temperatuurmatrix op de locatie van de putten voor de gevraagde tijdstappen.
5. *OUTPUT – dT_FINAL_MATRIX.xlsx*:
Voorbeeld resultaten bestand met de temperatuurmatrix op de locatie van de putten op het einde van de simulatie.