

Een raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies

Abstract

In dit onderzoek zijn geothermiesystemen in Nederland beschreven vanuit een ruimtelijk, functioneel en exergetisch perspectief. Geothermiesystemen worden in dit onderzoek ingedeeld in drie groepen: WKO, ondiepe en diepe geothermie. De drie groepen hebben elk hun eigen kenmerken met betrekking tot ruimtegebruik, functies, exergie en mogelijke toepassingen. De bevindingen van dit onderzoek zijn samengevat in een raamwerk dat kan worden toegepast bij het opstellen van energie-ruimtevisies. Energie-ruimtevisies zijn een tool om duurzame energielandschappen in kaart te brengen.

Sander Visser

12-05-2019

Colofon

Een raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies

Master Environmental and Infrastructure Planning, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen
Rijksuniversiteit Groningen

Gegevens student

Sander Visser

S2698102

s.visser.24@student.rug.nl

Begeleider

dr. F.M.G. (Ferry) Van Kann

Datum

12-05-2019

Plaats

Groningen



**rijksuniversiteit
groningen**

Samenvatting

Energie-ruimtevisies zijn een tool voor regionale overheden om de ontwikkeling van duurzame energielandschappen te visualiseren en zo het lange termijn denken binnen de regionale planning te versterken. In dit onderzoek is een raamwerk voor geothermie opgezet, welke naast de vijfstappenbenadering van Broersma et al. (2011) kan worden toegepast om energie-ruimtevisies vorm te geven. Dit is gedaan omdat geothermie een complex onderwerp is en regionale overheden moeite hebben met het opstellen van beleid voor geothermie. Het raamwerk bestaat uit een aantal acties, figuren en literatuur over geothermie. De literatuur betreft een literatuurstudie over de ruimtelijke, exergetische en functionele eigenschappen van verschillende geothermiesystemen. Uit de literatuurstudie is gebleken dat er in Nederland onderscheid kan worden gemaakt tussen drie hydrothermische geothermiesystemen: WKO, ondiepe geothermie en diepe geothermie. WKO bevindt zich op een diepte tot 250m, ondiepe geothermie tussen de 250 en 1000m en diepe geothermie tussen de 1000 en 5000m.

WKO is geschikt voor de levering van warmte en koude aan nieuwbouw en utiliteitsbouw. Ondiepe geothermie kan warmte leveren aan nieuwbouw, utiliteitsbouw en glastuinbouw. Diepe geothermie kan door de productie van hogere temperaturen zowel warmte leveren aan woningbouw en glastuinbouw als vele andere industriële en agrarische processen met een grote warmtevraag. Diepe geothermie levert daarnaast warmte op een grotere schaal en heeft een aanzienlijk groter ondergronds ruimtebeslag dan WKO en ondiepe geothermie. Hierdoor is diepe geothermie ook meer gebonden aan een specifieke locatie. WKO en ondiepe geothermie zijn relatief op veel locaties mogelijk. Bij ondiepe en diepe geothermiesystemen is het wel belangrijk dat er een goede piek- en back-up warmtevoorziening is, omdat bij uitval onderhoudswerkzaamheden lang kunnen duren. Een belangrijk voordeel van ondiepe geothermie is dat er op deze diepte weinig andere activiteiten zijn en er nog veel ruimte is. WKO-systemen produceren op grondwaterniveau en moeten daardoor met veel andere functies rekening houden, zoals grondwaterwinning. Diepe geothermiesystemen moeten voldoende afstand houden van andere functies die eveneens een groot ondergronds ruimtebeslag hebben, zoals gaswinning.

De informatie over geothermie uit dit onderzoek kan nuttig zijn bij het opstellen van energie-ruimtevisies met geothermiesystemen. Daarom zijn er een aantal acties gedefinieerd, welke omschrijven hoe en in welke volgorde de informatie uit de literatuurstudie kan worden ingezet. Deze acties vormen tezamen met de literatuur een raamwerk voor geothermie, waar bij het opstellen van energie-ruimtevisies rekening mee kan worden gehouden. Het nut en de effectiviteit van het raamwerk is getest in een casestudie, door met behulp van het raamwerk energie-ruimtevisies op te stellen voor de IJsseldeltaregio. Uit deze casestudie is gebleken dat er in deze regio zowel potentie is voor WKO, als ondiepe geothermie en diepe geothermie. Om de mogelijkheden van duurzame warmtelevering middels geothermie te vergroten wordt er in de nabije toekomst eerst ingezet op verduurzaming van de woningbouw en de ontwikkeling van kleinschalige warmtenetwerken. Hierdoor kunnen al op korte termijn meerdere WKO en ondiepe geothermiesystemen worden gerealiseerd. Diepe geothermiesystemen krijgen pas op de lange termijn een grotere rol in de toekomstige warmtevoorziening, door te voorzien in de basislast van stedelijke en regionale warmtenetwerken.

Over het algemeen is het raamwerk nuttig gebleken bij het opstellen van energie-ruimtevisies. Daarnaast kunnen door energie-ruimtevisies de werkelijke mogelijkheden van geothermiesystemen in een regio op de lange termijn goed in beeld worden gebracht. De werking en effectiviteit van het raamwerk is wel afhankelijk van het doel van de energie-ruimtevisies en het huidige raamwerk is een concept waar nog veel informatie aan kan worden toegevoegd.

Begrippen en afkortingen

Aquifer	Watervoerende grondlaag
CBS	Centraal Bureau voor Statistiek
COP	Coefficient of Performance. Verhouding tussen gevraagde energie voor het proces en geproduceerde energie
Energie-ruimtevisies	Een lange termijn visie voor de ontwikkeling van een duurzaam energielandschap, weergegeven in kaarten en tabellen
Exergieplanning	Ruimtelijke planning op basis van het exergieprincipe; effectief omgaan met energie
IJsseldelta regio	Gemeentes Kampen, Zwolle en Zwartewaterland
HTO	Hoge Temperatuur Opslag
HTV	Hoge temperatuur verwarming
Geothermiesystemen	Systeem van twee of meerdere putten voor de productie en injectie van water in een aquifer en enkele bovengrondse installaties voor het transport van de warmte en koude
LTV	Lage temperatuur verwarming
NLOG	Dataportaal voor informatie over mijnbouw in Nederland
NGR	Nationaal Geodata Register
PRH	Potential Recoverable Heat
Regionale overheden	Provincies, gemeenten en waterschappen
Regionale planning	Ruimtelijke ordening op een regionale schaal
Ruimtelijke interventies	Ingrepen in de ruimtelijke ordening zoals de aanleg van woonwijken of infrastructuur
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
SREX	Synergie tussen regionale planning en exergie
Thermisch vermogen	Warmteproductie in Kilowatt of Megawatt, afhankelijk van temperatuur en hoeveelheid warm water
WKO	Warmte Koude Opslag

Lijst van figuren

<i>Figuur 1 De exergiefactor van warmte en koude bij verschillende temperaturen (Van Kann, 2015)</i>	16
<i>Figuur 2 Waardes van de energiegraad voor verschillende vormen van energie (Stremke, 2010)</i>	17
<i>Figuur 3 Het principe van warmtecascadeering (Van Kann, 2015)</i>	18
<i>Figuur 4 Ruimtelijke eigenschappen van verschillende duurzame warmtebronnen (Van Kann, 2015)</i>	19
<i>Figuur 5 De Nieuwe Stappenstrategie (Broersma et al., 2011)</i>	20
<i>Figuur 6 Mogelijkheden om warmte en koude uit te wisselen tussen functies (Broersma et al., 2011)</i>	20
<i>Figuur 7 Een geïntegreerd netwerk met een energiering voor back-upvoorziening (Van Kann, 2015)</i>	23
<i>Figuur 8 schematische weergave van functies in de ondergrond naar diepte (I&W & EZ&K, 2018)</i>	24
<i>Figuur 9 Opbouw van de Nederlandse ondergrond (Oomes, 2012)</i>	25
<i>Figuur 10 Vijfstappenbenadering voor het opstellen van energie-ruimtevisies (Van Kann, 2015)</i>	29
<i>Figuur 11 Conceptueel model</i>	30
<i>Figuur 12 Deelvragen fase 1</i>	33
<i>Figuur 13 Deelvragen fase 2</i>	35
<i>Figuur 14 Hoofdvraag fase 3</i>	37
<i>Figuur 15 Temperatuurverdeling in de Nederlandse ondergrond op 1000m diepte. De zwarte punten zijn putten met temperatuurmetingen (Bonté et al., 2012)</i>	40
<i>Figuur 16 Schematische weergave van de drie geothermiesystemen</i>	41
<i>Figuur 17 Schematische weergave van een WKO systeem (Broersma et al., 2011)</i>	42
<i>Figuur 18 Schematisch overzicht van een ondiep geothermiesysteem (Willemsen, 2017)</i>	44
<i>Figuur 19 Schematische weergave diep geothermiesysteem (Gonzalez, 2012)</i>	45
<i>Figuur 20 Overzicht met temperatuurintervallen van geothermiesystemen en processen</i>	51
<i>Figuur 21 Schematisch overzicht van de locatiegebondenheid en het ruimtebeslag van geothermiesystemen in vergelijking met andere duurzame warmtebronnen. Gebaseerd op bevindingen vanuit dit onderzoek en het onderzoek van Van Kann (2015).</i>	55
<i>Figuur 22 Overzicht raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies</i>	60
<i>Figuur 23 Overzicht van IJsseldelta regio</i>	64
<i>Figuur 24 Basiskaart Ondergronds ruimtegebruik IJsseldelta regio</i>	65
<i>Figuur 25 Basiskaart met natuur in de IJsseldelta regio</i>	66
<i>Figuur 26 Potentiekaart WKO-systemen</i>	67
<i>Figuur 27 Potential recoverable heat Vesse member in GJ/m²/jaar</i>	68
<i>Figuur 28 Potential recoverable heat Brussel zand in GJ/m²/jaar</i>	69
<i>Figuur 29 Potential recoverable heat Heers member in GJ/m²/jaar</i>	69
<i>Figuur 30 Temperatuurkaart Vesse member in °C</i>	70
<i>Figuur 31 Temperatuurkaart Brussel zand in °C</i>	70
<i>Figuur 32 Temperatuurkaart Heers member in °C</i>	71
<i>Figuur 33 potentieel vermogen ondiepe geothermie met aquifer in Vesse member in MW (megawatt)</i>	71
<i>Figuur 34 potentieel vermogen ondiepe geothermie met aquifer in Brussel zand in MW (megawatt)</i>	72
<i>Figuur 35 potentieel vermogen ondiepe geothermie met aquifer in Heers member in MW (megawatt)</i>	72
<i>Figuur 36 potential recoverable heat Triasgroep zandsteen in GJ/m²/jaar</i>	73
<i>Figuur 37 Temperatuurkaart Triasgroep zandsteen in °C</i>	74
<i>Figuur 38 potentieel vermogen diepe geothermie met aquifer in Triasgroep zandsteen in MW (megawatt)</i>	74
<i>Figuur 39 Potential recoverable heat Rotliegendgroep zandsteen in GJ/m²/jaar</i>	75
<i>Figuur 40 Temperatuurkaart Rotliegendgroep zandsteen in °C</i>	75
<i>Figuur 41 potentieel vermogen diepe geothermie met aquifer in Rotliegendgroep in MW (megawatt)</i>	76
<i>Figuur 42 Warmtevraag IJsseldeltaregio op basis van gasverbruik</i>	77
<i>Figuur 43 Basiskaart IJsseldelta regio met geothermiesystemen en warmtenetwerken</i>	78
<i>Figuur 44 Overzicht energielabels IJsseldelta regio</i>	79
<i>Figuur 45 Overzicht van woningbouw die momenteel door LTV of HTV kan worden verwarmd</i>	80
<i>Figuur 46 Basiskaart nabije toekomst</i>	81
<i>Figuur 47 Basiskaart nabije toekomst, met transitie in de woningbouw van HTV naar LTV</i>	82
<i>Figuur 48 Scenario-basiskaart</i>	83

<i>Figuur 49 Energie-ruimtevisie IJsseldelta regio voor 2030</i>	84
<i>Figuur 50 Energie-ruimtevisie IJsseldelta regio voor 2040</i>	85

Lijst van tabellen

<i>Tabel 1 Overzicht van potentiële aquifers voor geothermie in Nederland. Op basis van Wong et al. (2007) en Doornenbal & Pagnier (2004)</i>	26
<i>Tabel 2 een indicatie van het energie rendement (COP), de warmteproductie (vermogen) en het beïnvloedingsgebied (oppervlak) in de ondergrond voor de drie geothermiesystemen. Referenties: 1: (Hellebrand et al., 2012), 2: (Lako et al., 2013), 3: (Bouwmeester, 2013), 4: (Bot & Zwamborn, 2013a), 5: (Mijnlieff & Van Wees, 2009)</i>	52

1. Inhoudsopgave

1.	Inleiding	8
1.1	Probleemstelling	9
1.2	Doelstelling	11
1.3	Vraagstelling	13
1.4	Leeswijzer	14
2.	Theoretisch kader	15
2.1	Exergie	16
2.2	Ruimte	19
2.3	Verbindingen	20
2.4	Geïntegreerde warmtenetwerken	22
2.5	Ruimtelijke ordening	24
2.6	Ondergrondse potentie geothermie	25
2.7	Energie-ruimtevisies	28
2.8	Conceptueel model	30
3.	Methodologie	31
	Pre-design fase (analyse)	33
	Design fase (projectie)	35
	Post-design fase (synthese)	37
4.	Raamwerk voor geothermie	38
4.1	Geothermiesystemen	39
4.2	Exergie	47
4.3	Ruimte	52
4.3.1	Ruimtebeslag	52
4.3.2	Locatiegebondenheid	54
4.4	Verbindingen	56
4.5	Ruimtelijke ordening	58
4.6	Raamwerk	60
5.	Casestudie	63
5.1	Analyse van huidige condities	64
5.1.1	Onderzoek huidig bodemgebruik	65
5.1.2	Onderzoek potentie geothermie	67
5.1.3	Onderzoek het warmtenetwerk	77
5.1.4	Breng de warmteconsumenten in kaart	77
5.2	Nabije-toekomstontwikkelingen	81
5.3	Mogelijke verre-toekomstbeelden	83
5.4	Energie-ruimtevisies	84
5.5	Resultaten	86

6.	Conclusie	87
7.	Discussie en Reflectie	90
8.	Literatuurlijst	92
9.	Bijlagen	96
	Bijlage 1: Overzicht van informatie raamwerk voor geothermie	0
	Bijlage 2: Lijst van zoektermen literatuurstudie	0
	Bijlage 3: Overzicht van bronnen per deelvraag	1

1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt eerst verder ingegaan op de ambities, ideeën en problemen die ten grondslag liggen aan dit onderzoek. Daarna wordt beschreven wat de doelstelling is van dit onderzoek en welke vragen worden onderzocht om het gewenste doel te bereiken.

1.1 Probleemstelling

Energie speelde tot voor kort nauwelijks een rol in de planologie. Het huidige energiesysteem in Nederland verbruikt een grote hoeveelheid hoogwaardige primaire energie en dumpst grote hoeveelheden afval en restwarmte (Broersma et al., 2011). Aardgas wordt bijvoorbeeld het meest gebruikt voor verwarmingssystemen in gebouwen. Vanuit een energiekwaliteit perspectief kan dit worden gezien als een enorm potentieel verlies, aangezien een gasvlam van 1200-1500°C beter kan worden gebruikt voor industriële processen met hoge temperaturen in plaats van gebouwen te verwarmen tot 20°C. Gebouwen kunnen dan worden verwarmd met restwarmte of duurzamere warmtebronnen (Broersma et al., 2011). Een energiesysteem dat efficiënt gebruik maakt van restwarmte en duurzame warmtebronnen zal veel minder primaire energie nodig hebben, alleen voor die hoogwaardige processen die wel primaire energie nodig hebben (zoals gascentrales, industrie, enz.).

Er is in Nederland een duidelijke urgentie om het gebruik van primaire energie te verminderen en meer duurzame energie te produceren. In 2013 ondertekenden meer dan 40 organisaties (waaronder de nationale overheid) een energieovereenkomst die het Nederlandse energiesysteem duurzamer zou moeten maken. De overeenkomst omvat de stimulering van meer duurzame energiebronnen, evenals energiebesparende maatregelen voor huishoudens, energie-efficiëntiemaatregelen voor industriële processen en het gebruik van restwarmte. Deze maatregelen en andere moeten leiden tot een aandeel van 14% hernieuwbare energie in het Nederlandse energiesysteem in 2020 en een aandeel van 16% in 2023 (SER, 2013).

Om deze doelstellingen te behalen ziet de Nederlandse overheid veel kansen voor de ontwikkeling van geothermie. In 2011 heeft het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie een Actieplan Aardwarmte opgesteld om de ontwikkeling van deze duurzame warmtebron te stimuleren. Het ministerie ziet de productie van 11 Peta joule aardwarmte in 2020 als een haalbaar doelwit. In het Actieplan wordt vermeld dat regionale overheden (provincies, waterschappen en gemeenten) een actieve rol spelen in het stimuleren van geothermie projecten. Zij kunnen projecten initiëren, financieel ondersteunen, een verbindende rol spelen of haalbaarheidsstudies uitvoeren. Daarnaast zijn zij verantwoordelijk voor de ruimtelijke ordening van hun regio en leggen zij zowel het ruimtelijk beleid als het energiebeleid voor hun regio vast in visies en plannen.

Ruimtelijk beleid is ook van belang voor de ontwikkeling van geothermie, onder andere om warmtenetwerken te ontwikkelen en kansen voor warmte cascadering te benutten. Bij het opstellen van ruimtelijk beleid voor geothermie is het van belang dat er wordt nagedacht over hoe de warmtevoorziening in de bebouwde omgeving met behulp van geothermiesystemen kan worden verduurzaamd en hoe ondergrondse potentie kan worden verbonden met bovengrondse warmtevraag (EL&I, 2011). Verder is het voor de verduurzaming van de warmtevoorziening belangrijk om rekening te houden met de huidige energiestromen en mogelijkheden voor warmte cascadering en duurzame warmtelevering vanuit het exergieprincipe (Broersma et al., 2011). Daarnaast is het van belang dat men zich niet beperkt tot de huidige mogelijkheden voor duurzame warmtelevering maar ook kijkt naar toekomstige ontwikkelingen en veranderende energiestromen (Broersma et al., 2011).

De vijfstappenbenadering vanuit het SREX onderzoeksprogramma (Broersma et al., 2011) biedt een methodiek om ruimtelijk beleid op te stellen vanuit het exergieprincipe, waarbij ook wordt gekeken naar ontwikkelingen in de toekomst. De methodiek ondersteunt een visievormingsproces waarbij deelnemers gezamenlijk toekomstige duurzame energielandschappen vormgeven in energie-ruimtevisies. De visies representeren de waarden van de verschillende deelnemers en dienen als input voor debat. Energie-ruimtevisies zijn een tool binnen het visievormingsproces, die een lange termijn visie op het ruimtelijk beleid en de energievoorziening in kaart brengen. Het uiteindelijke doel van de vijfstappenbenadering is om met behulp van energie-ruimtevisies robuuste ruimtelijke interventies in kaart te brengen die onderdeel kunnen worden van ruimtelijk beleid. Op deze manier kunnen energie-ruimtevisies mogelijk ook bijdragen aan het opstellen van ruimtelijk beleid voor geothermie. Energie-ruimtevisies kunnen dan als tool worden ingezet om duurzame energielandschappen vorm te geven, waarin geothermiesystemen een rol vervullen als duurzame warmtebronnen. Op basis van de energie-ruimtevisies kunnen er robuuste ruimtelijke interventies en zowel korte- als lange termijn acties worden geschetst die ook betrekking hebben op de ontwikkeling van geothermie en onderdeel kunnen worden van ruimtelijk beleid.

Geothermie is echter zeer context specifiek en kan een complex onderwerp zijn voor regionale overheden. Schoof (2017) heeft onderzoek gedaan naar de problemen waarmee regionale overheden te maken krijgen als ze ruimte willen maken voor geothermie in het regionale energielandschap. Hij stelt dat geothermie relatief nieuw en onbekend is voor gemeenten en provincies en dat ze moeite hebben om ruimtelijk beleid op te stellen voor deze bron van duurzame warmte (Schoof, 2017). Projecten voor geothermie en stadsverwarmingsnetwerken zijn complex en uitdagend, omdat de technieken, wetten en procesbenaderingen nieuw zijn voor deze regionale overheden. Er is behoefte aan ondersteuning, raamwerken en informatie (Schoof, 2017).

Dit onderzoek heeft daarom als doel om regionale overheden te ondersteunen in het opstellen van energie-ruimtevisies waarin geothermiesystemen een rol hebben als toekomstige duurzame warmtebron. Deze energie-ruimtevisies kunnen bijdragen aan het ontwikkelen van ruimtelijk beleid voor geothermie. In dit onderzoek wordt onderzocht hoe geothermiesystemen kunnen worden toegepast in energie-ruimtevisies, door literatuur over geothermiesystemen in Nederland te bundelen in een raamwerk en te testen of dit raamwerk bruikbaar is bij het opstellen van energie-ruimtevisies. Over de doelstelling van dit onderzoek wordt dieper ingegaan in de volgende paragraaf.

1.2 Doelstelling

Dit onderzoek is gericht op de verduurzaming van de warmtevoorziening op een regionale schaal. In de voorgaande paragraaf is duidelijk geworden dat er in Nederland een urgentie en een ambitie is om het energielandschap te verduurzamen en minder primaire energie te verbruiken. Aangezien voor de verduurzaming van de energievoorziening zowel het exergieprincipe (effectief en efficiënt omgaan met energie) als het realiseren van meer duurzame energiebronnen belangrijk is, speelt de regionale schaal voor deze verduurzaming een belangrijke rol (Van Kann, 2015). Dit komt enerzijds doordat duurzame energiebronnen zoals geothermie meer gebonden zijn aan specifieke locaties. Anderzijds is er met betrekking tot het exergieprincipe een focus op het effectief en efficiënt gebruik maken van warmte (Van Kann, 2015). Warmte is altijd gebonden aan een locatie en een lokale of regionale schaal. Transportafstanden dienen zo kort mogelijk te worden gehouden om distributieverliezen te voorkomen en kosten te beperken. Ook kan warmte cascadering op een lokale of regionale schaal bijdragen aan het optimaal benutten van duurzame warmtebronnen zoals geothermie. Daarnaast is met name voor de realisatie van geothermie projecten een belangrijke rol weggelegd voor regionale overheden (EL&I, 2011).

De doelstelling van het project SREX (synergie tussen regionale planning en exergie) is dan ook gericht op regio's. SREX heeft als doel om synergiën te creëren tussen energie en ruimtelijke planning op de regionale schaal, door inrichtingsprincipes, ontwerpstrategieën en ruimtelijke concepten te ontwikkelen met het exergieprincipe als uitgangspunt. Dit moet leiden tot de ontwikkeling van een optimaal energiesysteem op de regionale schaal, waarbij duurzame energie bronnen optimaal worden gebruikt (Gommans, 2010). Om dit te realiseren is het noodzakelijk om het langetermijndenken in regionale planning te vergroten. Dit kan worden verwezenlijkt door lange termijn toekomstvisies samen te stellen. Het SREX project biedt de vijfstappenbenadering als methodiek om middels een visievormingsproces zulke lange termijn visies op duurzame energielandschappen te ontwikkelen en in kaart te brengen in energie-ruimtevisies (Broersma et al., 2011). Energie-ruimtevisies zijn geen einddoel, maar een tool binnen het visievormingsproces. Het uiteindelijke doel is om met behulp van de energie-ruimtevisies robuuste ruimtelijke interventies in kaart te brengen die onderdeel kunnen worden van ruimtelijk beleid.

De doelstelling van deze studie bouwt voort op het doel en de methodieken van het SREX project, maar met een focus op geothermie. Het onderzoek is gefocust op duurzame warmtelevering middels geothermie. De levering van duurzame elektriciteit wordt buiten beschouwing gelaten. De energie-ruimtevisies binnen dit onderzoek brengen een regionaal energielandschap in beeld met een duurzame warmtevoorziening door duurzame warmte uit geothermiesystemen. Het doel van deze studie is om regionale overheden te ondersteunen in het opstellen van energie-ruimtevisies waarin geothermiesystemen een belangrijke rol hebben. Energie-ruimtevisies kunnen regionale overheden helpen om effectiever een bijdrage te leveren aan de lange termijn ontwikkeling van duurzame regio's (Broersma et al., 2011). De energie-ruimtevisies waarin geothermiesystemen een belangrijke rol hebben kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van ruimtelijk beleid voor geothermie. De visies representeren de waarden van de verschillende deelnemers aan het visievormingsproces en dienen als input voor debat. Op basis van de visies kunnen robuuste ruimtelijke interventies in beeld worden gebracht die onderdeel kunnen worden van ruimtelijk beleid. Energie-ruimtevisies integreren verwachtingen over ontwikkelingen in de nabije toekomst met mogelijke verre toekomstbeelden en bewuste veranderingen/interventies in de ruimtelijke ordening. Daarnaast bevatten energie-ruimtevisies een energetische en ruimtelijke analyse van de regio en een evaluatie van potentiële ruimtelijke interventies (Van Kann, 2015).

Voor het opstellen van energie-ruimtevisies kunnen regionale overheden de methodiek volgens de vijfstappenbenadering uit het SREX project toepassen. Dit onderzoek zal regionale overheden ondersteunen in het opstellen van energie-ruimtevisies met geothermiesystemen door een raamwerk te introduceren op basis van literatuur over geothermie. Dit raamwerk kan helpen om grip te krijgen op wat voor soorten geothermie er zijn en met wat voor ruimtelijke en energetische eigenschappen rekening moet worden gehouden bij de constructie van energie-ruimtevisies. In Nederland zijn er over het algemeen 3 soorten geothermie: Warmte Koude Opslag (WKO, diepte <250 m), ondiepe geothermie (diepte <1000 m) en diepe geothermie (diepte >1500 m) (Hellebrand et al., 2012). Het raamwerk kan regionale overheden helpen om te bepalen welk type geothermie waar kan worden ingezet, met het oog op warmteconsumenten, de cascadering van warmte en de locatie in het regionale energielandschap.

Het raamwerk kan ter aanvulling op de vijfstappenbenadering worden ingezet voor het opstellen van energie-ruimtevisies. In de vierde stap van de vijfstappenbenadering worden mogelijke energie-ruimtevisies opgesteld voor verschillende scenario's. Deze scenario's zijn verre toekomstbeelden welke zijn opgesteld in stap 3 en zijn vastgelegd op scenario basiskaarten. De scenario basiskaarten zijn illustraties van hoe een regio in verschillende scenario's er in de toekomst kan uitzien. Broersma et al. (2011) hanteren hiervoor 4 mogelijke scenario's: Mondiale Markt, Veilige regio, Mondiale solidariteit en Zorgzame regio. In stap 4 wordt inzichtelijk gemaakt hoe (met welke interventies) in een bepaald toekomstig scenario een gewenste (duurzame) toekomst kan worden bereikt (Van Kann, 2015). In paragraaf 2.5 Energie-ruimtevisies wordt meer uitleg gegeven over de vijfstappenbenadering.

Het doel van stap 4 is om een variatie aan ruimtelijke interventies in beeld te krijgen die passen bij de condities van een bepaald scenario (Van Kann, 2015). Door deze stap uit te voeren in een multidisciplinair team, met bijvoorbeeld beleidsmedewerkers, energie-experts en landschapsarchitecten, kan een variatie aan ruimtelijke interventies inzichtelijk worden gemaakt. Dit is ook waar het raamwerk voor zal dienen. Geothermie is namelijk een interventie die van veel factoren afhankelijk is en veel variaties kent. Met behulp van het raamwerk zullen deelnemers aan het visievormingsproces grip krijgen op de mogelijkheden en de beperkingen van geothermie. Het raamwerk dient te helpen om geothermie potentie kaarten te lezen en te combineren met overige gegevens van een gebied. Daarnaast zal het ook helpen het om afwegingen te maken tussen verschillende soorten geothermie. Het doel van het raamwerk is dan ook om deelnemers aan het visievormingsproces goed te informeren over geothermie en het proces te bevorderen. Het raamwerk is een tool ter aanvulling op de vijfstappenbenadering voor het opstellen van energie-ruimtevisies.

1.3 Vraagstelling

In de voorgaande paragrafen is uitgelegd wat de probleemstelling achter dit onderzoek is en wat het uiteindelijke doel van dit onderzoek is. Dit onderzoek heeft als doel om regionale overheden te ondersteunen in het opstellen van energie-ruimtevisies door een raamwerk te introduceren voor de constructie van energie-ruimtevisies met verschillende soorten geothermie. In dit onderzoek wordt een raamwerk opgesteld, geanalyseerd en verder vormgegeven door ruimtelijk te ontwerpen. Dit wordt gedaan binnen een research by design proces dat is opgedeeld in drie fasen. Het proces bestaat uit een pre-design fase, een design fase en een post-design fase, conform de methodiek van Roggema (2017). In de pre-design fase wordt een eerste aanzet gedaan voor een raamwerk. Dit raamwerk wordt verder vormgegeven en aangepast op basis van bevindingen tijdens de design fase, waarin het raamwerk wordt toegepast voor het ontwerpen van energie-ruimtevisies. In de post-design fase van dit onderzoek wordt gereflecteerd op de resultaten.

In de pre-design fase wordt eerst een literatuurstudie uitgevoerd over geothermie op basis van de deelvragen van dit onderzoek en de begrippen en theorieën vanuit het theoretisch kader. Op basis van de literatuurstudie worden vervolgens acties opgesteld, om de literatuur uit dit onderzoek toe te passen bij het opstellen van energie-ruimtevisies. De literatuur over geothermie uit dit onderzoek en de gedefinieerde acties vormen dan gezamenlijk een raamwerk voor geothermie. In dit onderzoek wordt daarnaast ook beschreven hoe dit raamwerk in de praktijk kan worden ingezet voor het ontwerpen van energie-ruimtevisies. Dit wordt gedaan door een casestudie uit te voeren in de design fase. De casestudie bestaat uit het opstellen van energie-ruimtevisies voor de IJsseldelta regio. Naar aanleiding van bevindingen die zijn opgedaan tijdens de uitvoering van deze casestudie worden in de post-design fase ook enkele eerste bevindingen en conclusies gegeven over de effectiviteit en het nut van het raamwerk. Door de literatuurstudie, het opstellen van het raamwerk, het uitvoeren van de casestudie en de reflectie op het raamwerk wordt uiteindelijk antwoord gegeven op onderstaande hoofdvraag:

Hoe kunnen geothermiesystemen worden toegepast in energie-ruimtevisies?

Voor de literatuurstudie en het opstellen van het raamwerk voor geothermie worden eerst onderstaande deelvragen beantwoord:

Welke soorten geothermiesystemen zijn er in Nederland?

Wat zijn de ruimtelijke eigenschappen van de geothermiesystemen?

Wat zijn de exergetische eigenschappen van de geothermiesystemen?

Hoe kunnen geothermiesystemen worden verbonden met warmteconsumenten?

Welke andere ruimtelijke functies kunnen conflicteren met geothermiesystemen?

Is het mogelijk om de eigenschappen van de geothermiesystemen te duiden in een raamwerk?

Het raamwerk wordt toegepast in een casestudie. De casestudie bestaat uit een ruimtelijke en energetische analyse van een regio, met als case De IJsseldelta regio, en het opstellen van een energie-ruimtevisie voor deze case. De casestudie richt zich op de onderstaande deelvraag.

Kan dit raamwerk worden ingezet bij het opstellen van energie-ruimtevisies?

1.4 Leeswijzer

Deze thesis begint met een inleiding in het onderwerp van studie door een probleemstelling, doelstelling en vraagstelling te formuleren in hoofdstuk 1. Daarna volgt in hoofdstuk 2 een theoretisch kader, waarin de theorie waarop dit onderzoek gebaseerd is wordt uiteengezet. In hoofdstuk 3 wordt de opbouw van het onderzoek en de onderzoeksmethodiek beschreven. In hoofdstuk 4 wordt de theorie uit hoofdstuk 2 specifiek gemaakt voor geothermiesystemen op basis van literatuur over geothermie. De resultaten worden gebundeld en gemodificeerd in een raamwerk voor de toepassing van geothermiesystemen in energie-ruimtevisies. In hoofdstuk 5 wordt dit raamwerk toegepast in een casestudie met als resultaat twee energie-ruimtevisies. In hoofdstuk 6 wordt gereflecteerd op de resultaten van dit onderzoek en de effectiviteit van het raamwerk. Daarnaast wordt in hoofdstuk 7 gereflecteerd op het onderzoeksproces en de gebruikte methodieken en worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

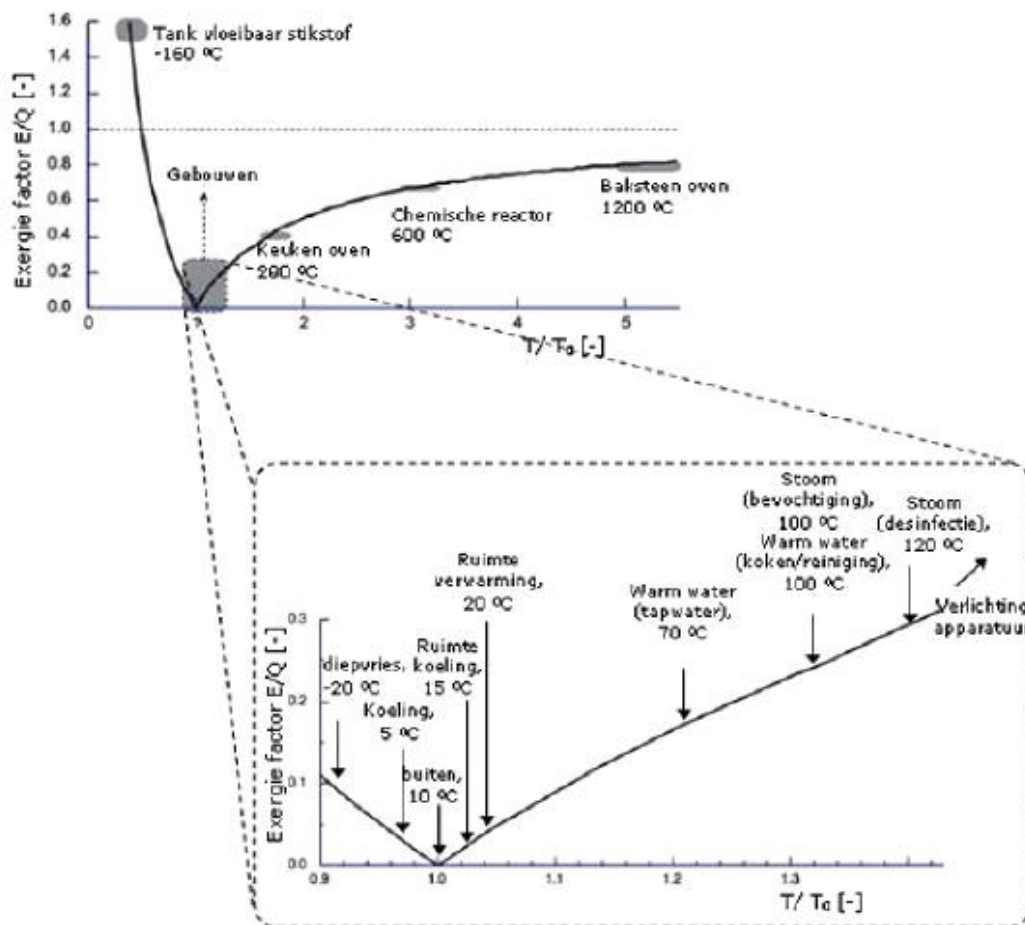
2. Theoretisch kader

In dit theoretisch kader worden enkele begrippen, theorieën en concepten beschreven, die het theoretisch fundament vormen van deze thesis. Allereerst wordt uitleg gegeven over het begrip exergie. Aan het in beeld brengen van duurzame energielandschappen in energie-ruimtevisies ligt het denken vanuit de exergieplanning namelijk ten grondslag. Exergieplanning kan worden gezien als ruimtelijke planning op basis van het exergieprincipe (Broersma et al., 2011). Met exergieplanning wordt bedoeld dat planologische middelen worden ingezet om inefficiënte energiestromen te verbeteren, duurzame lokale potenties te benutten en energienetwerken locatie specifiek te optimaliseren (Van Kann, 2015). Het begrip exergie is onlosmakelijk verbonden met het begrip ruimte. Bij het overbruggen van afstanden neemt de temperatuur alsook de exergie van warmte namelijk af (Gommans, 2010). Dit maakt dat bij warmtebronnen zoals geothermiesystemen het begrip ruimte ook van belang is. Geothermiesystemen zijn afhankelijk van een bepaalde locatie en hun verbindingen met warmteconsumenten om warmte uit te kunnen wisselen. Ook zijn de mogelijkheden om warmte te leveren aan warmteconsumenten afhankelijk van de aanwezigheid van een warmtenetwerk. Om warmtenetwerken op een efficiënte manier in te passen in regionale energiesystemen zijn ruimtelijke variabelen als afstanden, bebouwingsdichtheden en multifunctionaliteit belangrijk (Broersma et al., 2011). Voor de ontwikkeling van warmtenetwerken en geothermiesystemen is daarmee de ruimtelijke ordening van een regio van belang. Daarnaast is bij geothermiesystemen ook de ondergrondse ruimtelijke ordening belangrijk, omdat de ondergrond voor steeds meer en verschillende functies wordt gebruikt. Sommige functies in de ondergrond gaan goed samen doordat zij op verschillende dieptes plaatsvinden, maar anderen gaan moeizaam samen of sluiten elkaar uit doordat zij van dezelfde grondlaag gebruik maken (Oomes, 2012). Geothermiesystemen kunnen in verschillende grondlagen worden toegepast met een grote variatie aan dieptes. De potentie van geothermie verschilt per regio en is afhankelijk van de aanwezigheid, ligging en geologische eigenschappen van geschikte grondlagen (Wong et al., 2007).

De hiervoor genoemde begrippen worden verder toegelicht in onderstaand theoretisch kader. Daarnaast wordt in dit theoretisch kader toegelicht hoe met behulp van energie-ruimtevisies strategisch kan worden nagedacht over bovenstaande begrippen en duurzame energielandschappen kunnen worden vormgegeven. Dit theoretisch kader sluit af met een conceptueel model, waarin de samenhang tussen de verschillende begrippen inzichtelijk wordt gemaakt.

2.1 Exergie

Volgens de eerste hoofdwet van de thermodynamica gaat bij de overgang van energie naar een ander systeem nooit energie verloren. De energie verandert wel van vorm waardoor het niet meer voor hetzelfde doel kan worden gebruikt. Volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica gaat bij de overgang naar een ander systeem wel kwaliteit van de energie verloren. Deze kwaliteit van de energie wordt ook wel exergie genoemd. Exergie kan worden gedefinieerd als de maximale hoeveelheid arbeid die uit een medium (een vloeistof of gas) gewonnen kan worden, wanneer dit medium in evenwicht wordt gebracht met de omgeving (Gommans, 2010). Dit betekent in de praktijk dat bij de overgang van warmte naar een ander systeem, zoals elektrische of mechanische energie, veel exergie verloren gaat. Het verlies aan exergie wordt veroorzaakt door de productie van restwarmte die bij deze overgang vrijkomt. Deze restwarmte, ook wel afvalwarmte, heeft een lagere exergie. Warmte met een hogere temperatuur heeft een hogere exergiefactor en kan meer nuttige arbeid leveren met minder exergieverlies (Gommans, 2010). De exergiefactor van warmte en koude bij verschillende temperaturen is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 De exergiefactor van warmte en koude bij verschillende temperaturen (Van Kann, 2015)

Uit bovenstaande figuur kan worden opgemaakt dat bij een hogere temperatuur van de warmte, de exergiefactor en daarmee de kwaliteit van de energie toeneemt. De kwaliteit van energie kan ook worden uitgedrukt als de verhouding tussen de hoeveelheid exergie ten opzichte van de energie in een bepaald medium. Dit wordt ook wel de energiegraad genoemd. Elektriciteit wordt beschouwd als het medium met de hoogste kwaliteit van energie en een energiegraad van 1.0. Ook fossiele brandstoffen hebben een hoge kwaliteit van de energie en een hoge energiegraad. Gas heeft bijvoorbeeld een energiegraad van 0.913. Warmte heeft een veel lagere kwaliteit van de energie en een lagere energiegraad, naargelang de temperatuur afneemt (Stremke, 2010). Dit is weergegeven in figuur 2.

Energy carrier	Energy grade function	
Electricity	1.0	High-grade
Natural gas	0.913	
Steam (100° C)	0.1385	
Hot water (66°C)	0.00921	
Hot air (66°C)	0.00596	

Figuur 2 Waardes van de energiegraad voor verschillende vormen van energie (Stremke, 2010)

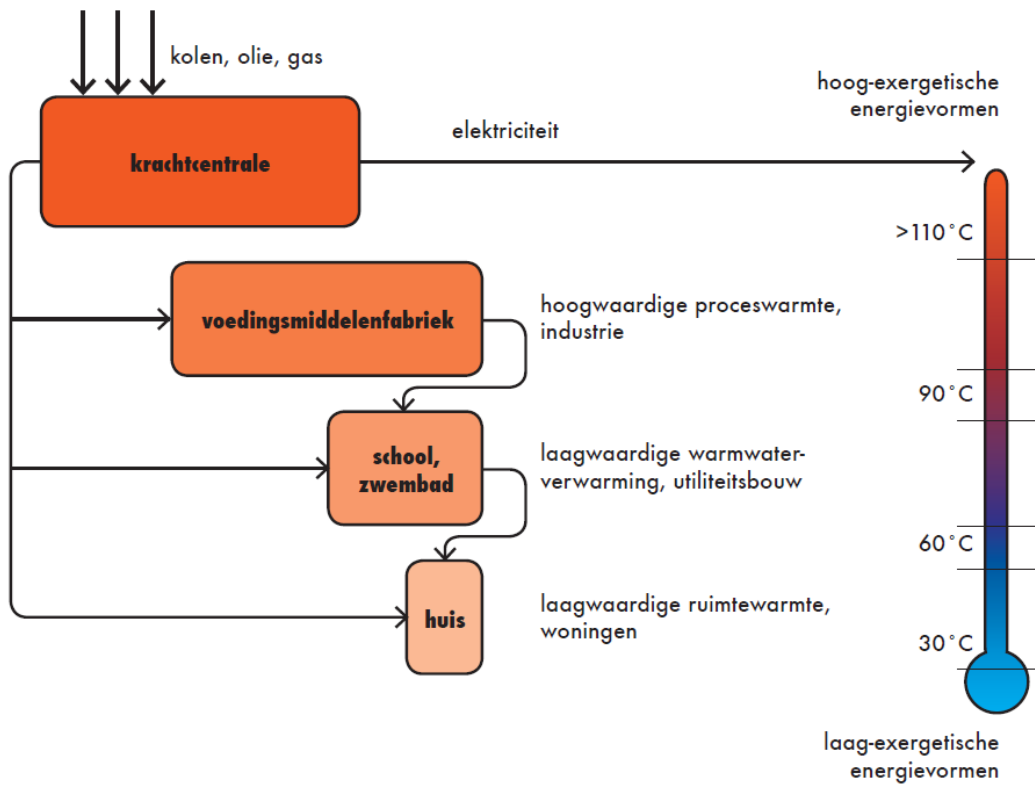
Uit figuur 1 en 2 kan worden afgeleid dat warmte een lage exergie heeft en een lage hoeveelheid exergie ten opzichte van de hoeveelheid energie. De energiegraad van warmte is dus niet hoog, maar er is wel veel energie in de vorm van warmte of eventuele restwarmte aanwezig (Gommans, 2010). Dit is energie met een lagere kwaliteit. Het ligt voor de hand om voor processen die een hoge exergie vereisen die vormen van energie te gebruiken die een hoge exergie hebben. Voor processen die een lage exergie vereisen kunnen energievormen worden toegepast die een lage exergie hebben.

Fossiele brandstoffen zoals gas hebben een hoge exergie en kunnen dus beter worden gebruikt voor processen die een hoge exergie nodig hebben, zoals de productie van elektriciteit of mechanische energie. Ook worden andere vormen van duurzame energie, zoals biomassa en zonne-energie, beschouwd als energievormen met een hoge exergie, omdat deze vormen van duurzame energie kunnen worden omgezet in elektrische energie en daarmee energie kunnen leveren aan processen die een hoge exergie vereisen (Stremke, 2010).

Ruimteverwarming daarentegen kan worden gezien als een proces dat veel energie met een lage exergie vereist. Hier kan een laagwaardige vorm van energie zoals warmte voor worden ingezet. In de praktijk wordt in Nederland echter gas ingezet voor ruimteverwarming, terwijl gas een energievorm is met een hoge exergie. Dit is vanuit het oogpunt van energiekwaliteit een enorm verlies aan potentieel, omdat een gasvlam van 1200-1500 °C veel beter kan worden gebruikt voor processen die een hoge exergie vereisen en niet om een ruimte tot 20 °C op te warmen (Broersma et al., 2011). In Nederland is er dan ook veel potentie om de verwarming middels warmtenetwerken en duurzame warmtebronnen te verduurzamen (Van Kann, 2015).

Er zijn ook andere verwarmingsprocessen denkbaar die warmte nodig hebben met een hogere temperatuur en dus een hogere exergie. Hiervoor kunnen warmtebronnen worden ingezet met een hogere temperatuur. Het kan zijn dat bij deze processen restwarmte vrijkomt met een lagere exergie die kan worden ingezet bij een proces dat een lagere exergie vereist. Hierdoor kan een bepaalde hoeveelheid energie met een hogere exergie een aantal keren worden hergebruikt in laag-exergetische processen. Dit wordt het cascaderen van energie ofwel warmte genoemd (Van Kann, 2015). Het principe van warmte cascadering is weergegeven in figuur 3.

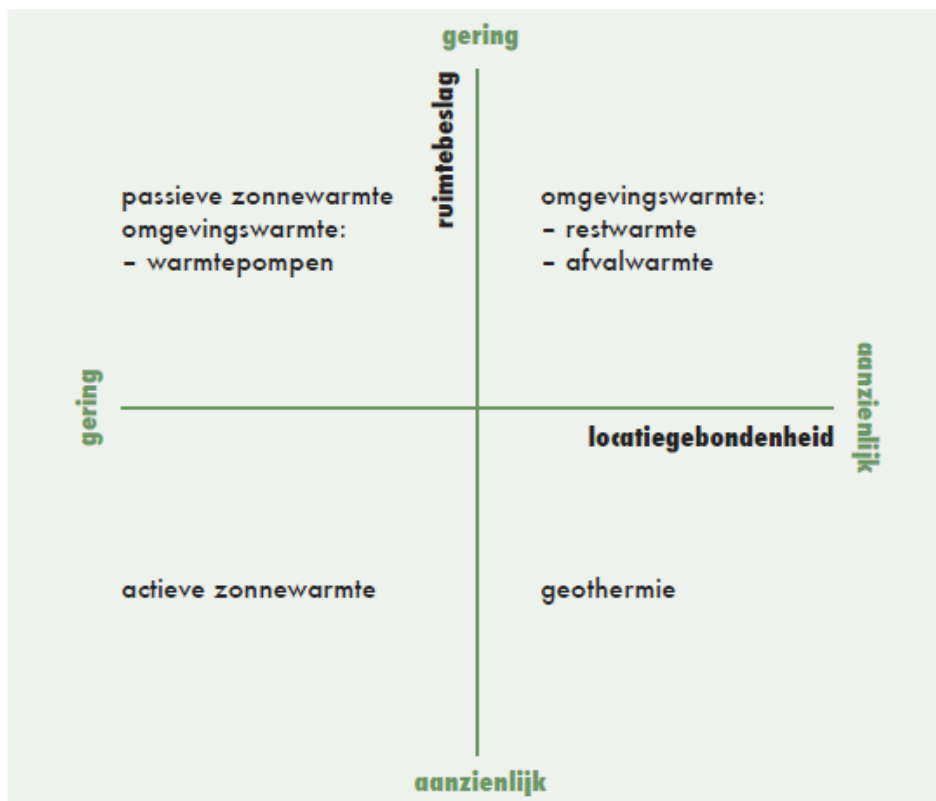
Bij de toepassing van warmte voor ruimteverwarming of andere processen is het van belang om rekening te houden met de transportafstanden. Bij het transport van warmte door pijpleidingen is er namelijk altijd sprake van energieverlies en een daling van de temperatuur en exergie. Warmte is ten opzichte van andere energiedragers meer gebonden aan een bepaalde ruimte. Zo kan het transport van laag-exergetische warmte over grote afstanden tot grote energieverliezen leiden in vergelijking met bijvoorbeeld het transport van elektriciteit. Warmte kan dus beter lokaal worden toegepast om de energieverliezen te beperken (Gommans, 2010).



Figuur 3 Het principe van warmte cascadering (Van Kann, 2015)

2.2 Ruimte

Van Kann (2015) benaderd energiewinning vanuit een ruimtelijk perspectief. Hij maakt hierbij gebruik van twee ruimtelijke variabelen: locatiegebondenheid en ruimtebeslag. De locatiegebondenheid zegt iets over het centrale of decentrale karakter van een energiebron. Dit is zowel afhankelijk van de mate waarin het energietransport lokaal moet plaatsvinden als de mate waarin de energiebron zelf is gebonden aan een specifieke locatie. Het ruimtebeslag zegt iets over de schaalgrootte en het ruimtegebruik van de energiebron, waarbij rekening wordt gehouden met de aanvoer van de brandstoffen, de verwerking tot energie en het energienetwerk. Van Kann (2015) stelt dat het ruimtebeslag van geothermiesystemen bovengronds klein is, maar ondergronds groot is vergeleken met andere vormen van duurzame energie. Geothermiesystemen hebben een hoge locatiegebondenheid, omdat warmte lokaal moet worden toegepast en geothermie afhankelijk is van een specifieke locatie met een geschikte ondergrond, zie figuur 4.

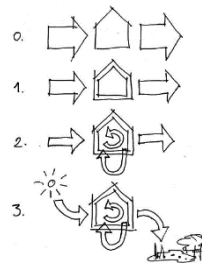


Figuur 4 Ruimtelijke eigenschappen van verschillende duurzame warmtebronnen (Van Kann, 2015)

2.3 Verbindingen

Om meer duurzame energie te kunnen produceren en energie te kunnen uitwisselen, is het belangrijk dat ruimtelijke functies met elkaar worden verbonden. Zo kunnen verschillende ruimtelijke functies in de gebouwde omgeving gebruik maken van elkaars reststromen en kunnen zij gezamenlijk worden verbonden met duurzame bronnen. Broersma et al. (2011) introduceren een Nieuwe Stappenstrategie (NSS) om de gebouwde omgeving te verduurzamen, als alternatief op de Trias Energetica. De Trias Energetica zet volgens Broersma et al. (2011) te snel in op het realiseren van duurzame projecten, waardoor er te weinig aandacht is voor het uitwisselen van reststromen om de energievraag te verminderen. De NSS gaat uit van onderstaande stappen:

1. Reduceer de vraag (door slim en bioklimatisch ontwerpen)
2. Hergebruik reststromen
3. Pas duurzame bronnen toe en zorg dat afval voedsel is



Figuur 5 De Nieuwe Stappenstrategie (Broersma et al., 2011)

Om de NSS toe te passen op de verduurzaming van de gebouwde omgeving, ontwikkelde de gemeente Rotterdam de REAP methode (Rotterdamse Energie Aanpak en Planning). Dobbelsteen et al. (2011) beschrijft de REAP methode als een aanpak die de NSS steeds op een groter schaalniveau toepast. Er wordt eerst op het laagste schaalniveau gekeken naar hoe de vraag naar warmte in gebouwen kan worden verminderd en hoe gebouwen reststromen (bijv. douchewater) kunnen hergebruiken en zelf duurzame energie kunnen opwekken. Daarna wordt op buurtniveau gekeken naar de warmte- en koude patronen om te kijken of warmte kan worden uitgewisseld (bijv. tussen een supermarkt en woningen, zie figuur 6), gecascadeerd of dat warmte kan worden opgeslagen. Wanneer de reststromen zijn benut kan worden gekeken naar het realiseren van duurzame energie projecten op buurtniveau (bijv. zonnecollectoren). Hierna wordt op wijkniveau gekeken naar de warmte- en koude patronen per buurt, om te kijken of uitwisseling, opslag of cascadering van warmte mogelijk is. Ook kan worden gedacht aan het toevoegen van nieuwe functies aan de wijk die het tekort aan warmte of koude invullen. Daarnaast kunnen op wijkniveau grotere en kapitaalintensievere duurzame energieprojecten (zoals geothermie) worden gerealiseerd dan op buurtniveau. Nadat de gebouwde omgeving op wijkniveau is verduurzaamd kan de NSS worden toegepast op een stad, streek of regio. Zo kan ook op stedelijk niveau de warmtevraag worden verminderd en kunnen wijken worden aangesloten op regionale of stedelijke warmtenetten. Ook kan duurzame energie op een stedelijk of regionaal schaalniveau centraal worden opgewekt (bijv. restwarmte uit centrales of diepe geothermiesystemen) en naar wijken worden getransporteerd middels stadsverwarming. Dobbelsteen et al. (2011) benadrukt wel dat de gebouwde omgeving beter eerst op gebouw-, buurt- en wijkniveau kan worden verduurzaamd alvorens gebouwen worden aangesloten op stadsverwarming. Wanneer gebouwen op stadsverwarming worden aangesloten verdwijnt namelijk de urgentie om op deze lagere schaalniveaus het energiegebruik te reduceren en reststromen te benutten.



Figuur 6 Mogelijkheden om warmte en koude uit te wisselen tussen functies (Broersma et al., 2011)

De REAP methode is dus een stapsgewijze aanpak die ernaar streeft dat energievraagstukken worden opgelost op het laagste schaalniveau (individuele gebouwen) en die indien nodig de hulp inschakelt van steeds hogere schaalniveaus (van buurt naar wijk naar stad en hoger). Dobbelsesteen et al. (2011) geeft wel aan dat duurzame energie projecten beter op een hoger schaalniveau dan individuele gebouwen kunnen worden gerealiseerd, omdat dit economischer is. Ook kunnen sommige kapitaalintensieve duurzame energieprojecten alleen op hogere schaalniveaus worden gerealiseerd. Zoals hiervoor besproken legt de REAP methode een grote nadruk op het belang van warmtenetwerken op meerdere schaalniveaus om reststromen uit te wisselen en duurzame warmte te transporteren. Van Kann (2015) beschrijft de vorming van warmtenetwerken in regio's als een proces van een klein naar een hoger schaalniveau dat een aantal tussenstadia kent. Door steeds meer functies met elkaar te verbinden en op te schalen kan een warmtenetwerk robuuster worden en uitgroeien tot een geïntegreerd warmtenetwerk. Voor geïntegreerde warmtenetwerken zijn onder andere een hoge verbondenheid, directheid en goede back-up voorzieningen van belang. De ontwikkeling van warmtenetwerken verschilt per regio en is afhankelijk van de betreffende gebouwde omgeving (Van Kann, 2015). In de volgende paragraaf wordt meer uitleg gegeven over de ontwikkeling van geïntegreerde warmtenetwerken.

2.4 Geïntegreerde warmtenetwerken

Van Kann (2015) introduceert een grafentheoretische analyse waarmee kan worden onderzocht hoe een regio energetisch functioneert en hoe een robuust regionaal warmtenetwerk kan worden ontwikkeld. Het ontwerp van een netwerk is afhankelijk van drie criteria: status, vorm en structuur. Het criteria status zegt iets over de fase waarin een netwerk zich bevindt en is afhankelijk van de complexiteit en verbondenheid. Van Kann (2015) deelt de ontwikkeling van netwerken op in drie fases: de opstartfase, de groeifase en de volwassenfase. De vorm zegt iets over wat voor relatie het netwerk met de gebouwde omgeving heeft en over de dekking. Het netwerk kan gericht zijn op een lokale dekking, een regionale dekking of een regionale toegankelijkheid. De structuur van het netwerk is een criterium voor de eigenschappen van het netwerk en is afhankelijk van de structurele verbondenheid en de directheid. Structurele verbondenheid heeft betrekking op de belangrijkheid van verbindingen en hoeveel alternatieve routes er zijn via knooppunten. Dit zegt iets over de volwassenheid en robuustheid van het netwerk. De directheid is afhankelijk van de mate waarin functies direct met elkaar verbonden zijn, zonder tussenliggende knooppunten.

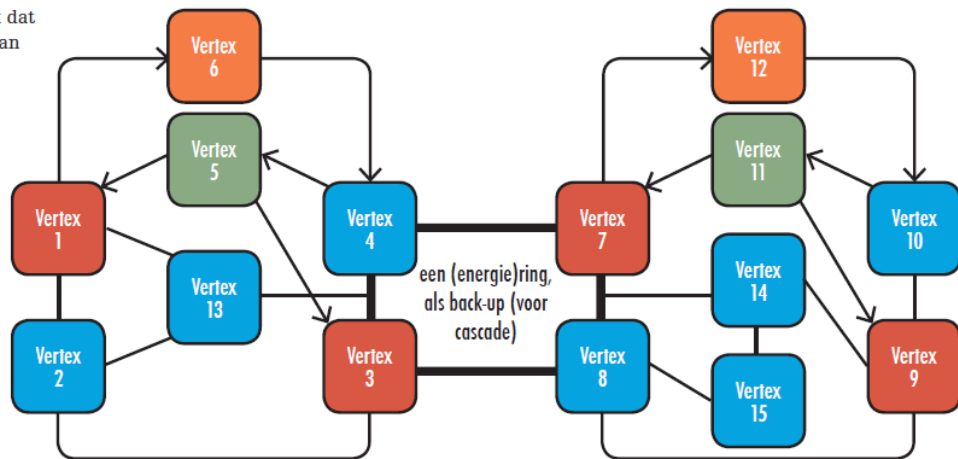
Voor de directheid en structurele verbondenheid van netwerken kan onderscheid worden gemaakt tussen drie types verbindingen: transitlijnen, tangentiële lijnen en cirkellijnen. Transitlijnen lopen direct van een centrum naar buitenwijken, tangentiële lijnen verbinden buitenwijken onderling en cirkellijnen vormen een ring om alles met elkaar te verbinden. Lokale netwerken hebben een hoge directheid en regionale netwerken hebben een hoge structurele verbondenheid. Daarnaast zijn er ook gecombineerde netwerken met beide kenmerken.

Dicht bebouwde gebieden vereisen een netwerk met een lokale dekking, een hoge directheid, korte (semi)-cirkellijnen en tangentiële lijnen en veel opname- en afgiftepunten. Regio's met verspreide clusters hebben een regionale netwerkform met een hoge structurele verbondenheid, lange diametrale en radiale lijnen en minder opname- en afgiftepunten. Regio's met een dicht bebouwde kern en daaromheen clusters zitten hier tussenin en hebben een mix aan lijntypes en vormen. Regionaal georiënteerde netwerken zijn vaak meer gericht op directheid dan structurele verbondenheid. Een geïntegreerd netwerk heeft echter zowel een hoge directheid (om warmteverlies te voorkomen tijdens transport) als een hoge structurele verbondenheid (om robuust te zijn, veel back-up te hebben).

Bij het ontwikkelen van warmtenetwerken zijn dus ruimtelijke variabelen zoals de bebouwingsdichtheid en de ruimtelijke structuur van belang. Daarnaast moet volgens de REAP methode eerst worden ingezet op kleinschalige verduurzaming en daarna worden toegewerkt naar hogere schaalniveaus (Dobbelsteen et al., 2011). Voor de verduurzaming van de warmtevoorziening in de bebouwde omgeving betekent dit dat er zowel rekening moet worden gehouden met schaalniveaus als de ruimtelijke variabelen.

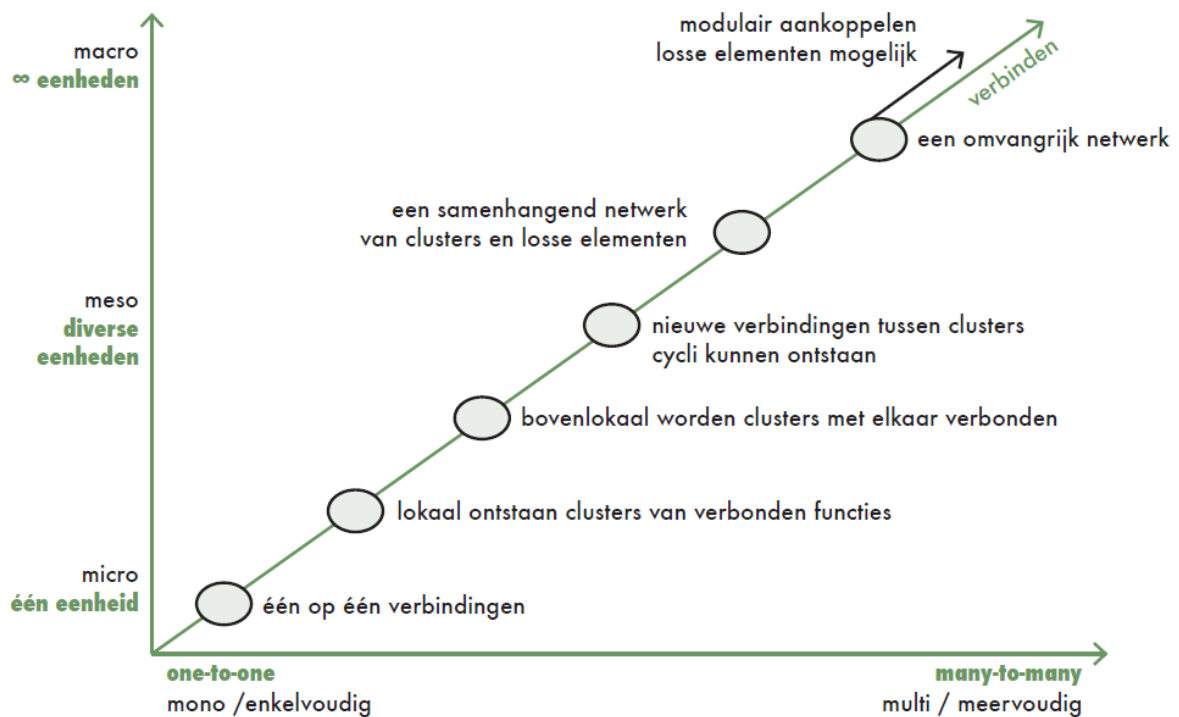
Voor de vorming van geïntegreerde warmtenetwerken in regio's betekent bovenstaande dat er allereerst een focus moet zijn op het verbinden van verschillende functies (warmteproducenten en warmteconsumenten) om de verbondenheid te vergroten. Met name functies die een contrasterende of aanvullende warmtevraag hebben moeten worden verbonden, omdat dan uitwisseling van warmte mogelijk is. Dit biedt ook mogelijkheden om warmte te cascaderen tussen verschillende warmteconsumenten, waardoor warmteconsumenten ook warmteproducenten kunnen zijn. Een warmtecluster of een warmtecascade is echter een afhankelijk en storingsgevoelig systeem. Het netwerk kan robuuster worden gemaakt door meerdere clusters met elkaar te verbinden met radiale lijnen. Door bijvoorbeeld een energiering aan te leggen worden clusters in een many-to-many relatie verbonden met elkaar. Hierdoor vormt zich een groter netwerk met de afzonderlijke clusters als subnetwerken. De energiering kan dan ook als back-up gaan dienen voor de subnetwerken (zie figuur 7). De clusters kunnen op hun beurt weer uitgroeien tot knooppunten en verbonden worden met clusters in een andere regio. De laatste stap is het vergroten van de structurele verbondenheid en robuustheid van het netwerk door tangentiële of ringleidingen aan te leggen tussen bestaande leidingen.

Een uitgebreid netwerk dat zelf als back-up kan gaan dienen



Figuur 7 Een geïntegreerd netwerk met een energiering voor back-upvoorziening (Van Kann, 2015)

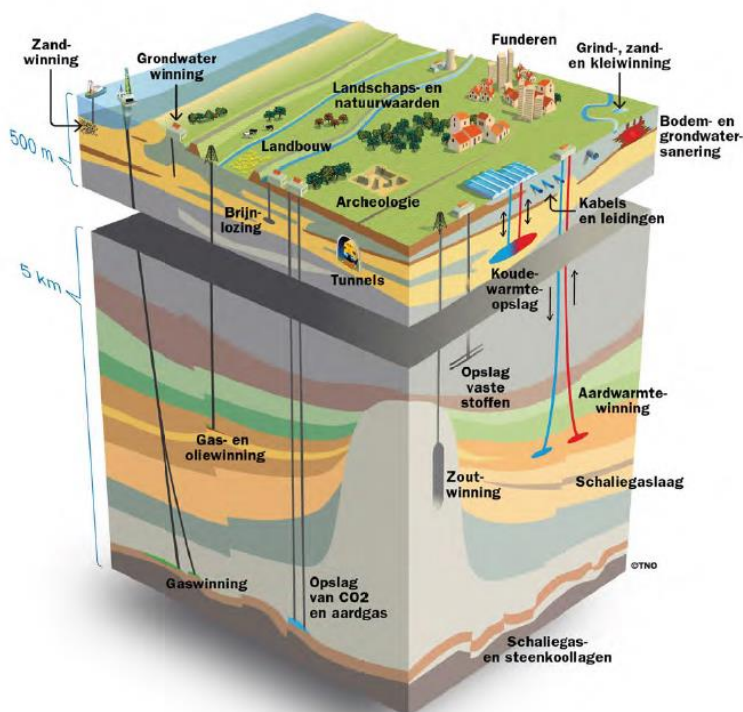
Over het algemeen worden geïntegreerde netwerken dus ontwikkeld door te beginnen met het schakelen van losse elementen en uiteindelijk op te schalen naar een robuust, samenhangend netwerk van verbonden clusters. Het uiteindelijke resultaat is dan een omvangrijk netwerk met een hoge structurele verbondenheid. Dit geïntegreerde netwerk vormt een robuuste basis waar modulair nieuwe elementen aan kunnen worden gekoppeld. Deze ontwikkeling naar een groter schaalniveau (micro naar macro) en een differentiatie van functies (mono naar multi) is weergegeven in onderstaand figuur.



2.5 Ruimtelijke ordening

Binnen de ruimtelijke ordening wordt ruimte toebedeeld aan functies op basis van onder andere de maatschappelijke behoefte, de beschikbaarheid van ruimte en de kwaliteit van de ruimte. De ondergrondse ruimte lijkt eindeloos, maar om een toename van functies in de ondergrond mogelijk te maken en tegelijkertijd de kwaliteit van de ondergrond te behouden is het nodig een visie te ontwikkelen op de ondergrond (I&W & EZ&K, 2018). Daarbij is het van belang dat de benodigde ondergrondse ruimte wordt verdeeld tussen functies en dat er rekening wordt gehouden met kwetsbare natuur- en grondwatergebieden waar boringen ongewenst of niet mogelijk zijn (I&W & EZ&K, 2018). De bruikbaarheid van de ondergrond voor verschillende functies kan globaal worden geordend op basis van diepte. De dieptegrenzen van een bepaalde functie zijn echter altijd een benadering en kunnen afwijken door regionale verschillen in geologie (Oomes, 2011).

Volgens Oomes (2011) kan de Nederlandse ondergrond globaal worden geordend in een toplaag (0-1,5m), contactlaag (1,5-50m), ondiepe ondergrond (50-250m), matig diepe ondergrond (250-1000m) en diepe ondergrond (dieper dan 1000m). De toplaag is van groot belang voor natuurlijke processen en wordt daarnaast gebruikt voor vele functies zoals voedselproductie. De contactlaag wordt van alle lagen het meest verstoord door allerlei functies en infrastructuur. Er bevinden zich onder andere transportleidingen, bouwwerken, tunnels en gesloten WKO systemen. Daarnaast wordt de contactlaag gebruikt voor de winning van grondstoffen zoals zand en de onttrekking en opslag van grondwater. Ook uit de ondiepe ondergrond wordt grondwater onttrokken. De ondiepe ondergrond wordt tevens gebruikt voor open WKO systemen. De matig diepe ondergrond wordt voor weinig functies gebruikt. In deze laag is in de vorige eeuw met name in Limburg steenkool gewonnen. Ook wordt de matig diepe ondergrond op sommige plekken gebruikt voor zout- en gaswinning en is er potentieel voor de opslag van radioactief afval. In de diepe ondergrond zijn de meeste functies te vinden met betrekking tot energiewinning. Uit de diepe ondergrond worden gas, olie en aardwarmte gewonnen en er vindt opslag van gas plaats. Daarnaast wordt de diepe ondergrond gebruikt voor zoutwinning en is er potentieel voor schaliegaswinning en CO₂ opslag. In figuur 8 wordt een schematische weergave gegeven van de verschillende functies in de Nederlandse ondergrond (I&W & EZ&K, 2018).

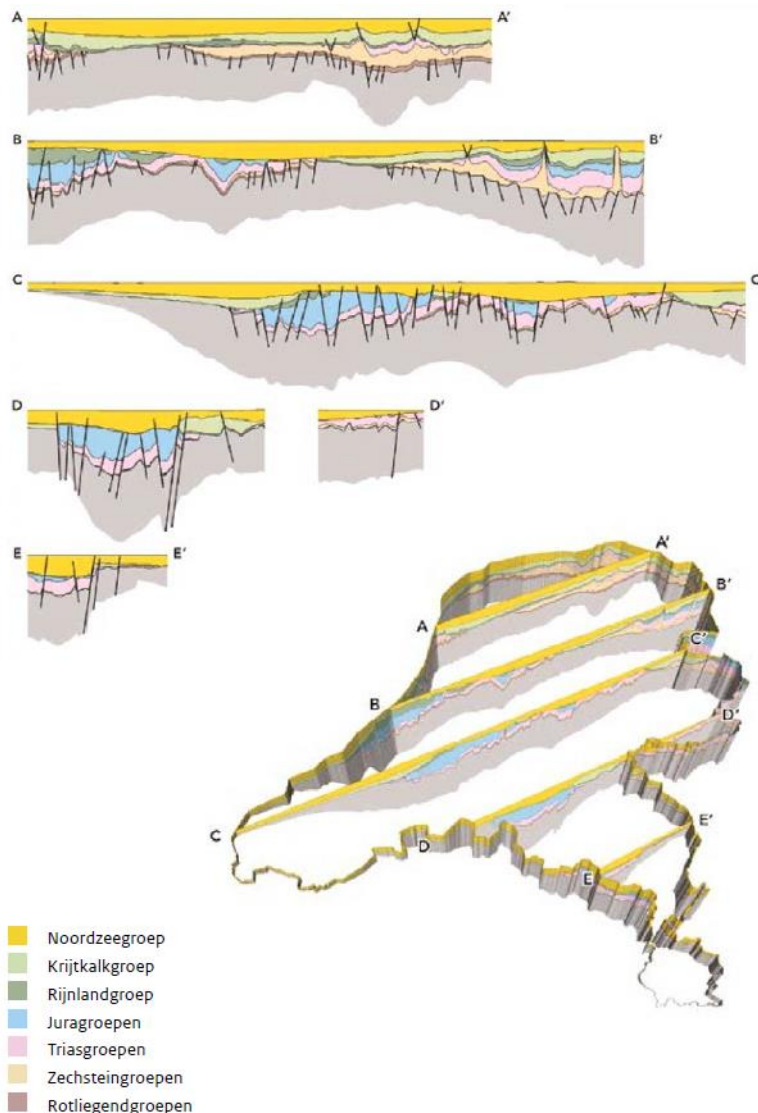


Figuur 8 schematische weergave van functies in de ondergrond naar diepte (I&W & EZ&K, 2018)

2.6 Ondergrondse potentie geothermie

In de vorige paragraaf is beschreven op welke diepte geothermiesystemen en andere ondergrondse functies in Nederland in de praktijk voorkomen en hoe de ondergrond kan worden geordend. In theorie is er in Nederland op verschillende dieptes en in verschillende grondlagen potentie voor geothermie. De diepte en potentie van geothermie verschilt per regio en is afhankelijk van de ligging van grondlagen en de geologische eigenschappen van deze grondlagen (Wong et al., 2007). In deze paragraaf wordt daarom eerst beschreven uit welke grondlagen de Nederlandse ondergrond in hoofdlijnen is opgebouwd.

De Nederlandse ondergrond is opgebouwd uit vele verschillende grondlagen met verschillende soorten gesteentes (klei, zand, zout, kalk etc.). De ondergrond is gevormd door meerdere geologische tijdperken van vele miljoenen jaren. Tijdens de verschillende geologische tijdperken was Nederland zowel onderdeel van de zee als land en waren er zowel periodes met een tropisch klimaat als ijstijden. Hierdoor verschillen de grondlagen onderling sterk in structuur en samenstelling. Zo vormden zich dikke grondlagen met klei en krijtkalk toen Nederland onder zee lag en ontstonden zoutafzettingen toen ondiepe zeeën gedurende warme periodes verdampten. Daarnaast hebben rivieren grote hoeveelheden zand en klei naar Nederland getransporteerd toen Nederland een delta was (I&W & EZ&K, 2018). In figuur 9 is een overzicht weergegeven van de groepen grondlagen die zich tijdens de verschillende geologische tijdperken hebben gevormd. Deze groepen zijn in de legenda geordend van jong naar oud, met de Noordzeegroep als meest recente groep en de Rotliegendegroep als oudste groep (bijna 300 miljoen jaar oud) (Doornenbal & Pagnier, 2004).



Figuur 9 Opbouw van de Nederlandse ondergrond (Oomes, 2012)

In figuur 9 wordt ook door middel van een aantal dwarsdoorsnedes een inzicht gegeven in hoe de ondergrond van Nederland eruit ziet. Hierbij valt op dat met name de diepere grondlagen een complex landschap vormen van heuvels en dalen. Dit komt doordat deze grondlagen gedurende miljoenen jaren van onder andere tektonische bewegingen zijn vervormd. Sommige grondlagen zijn op bepaalde plekken ten opzichte van elkaar verschoven, deze verspringingen worden breuken genoemd en zijn in figuur 9 te zien als zwarte verticale lijnen. Het reliëf van de diepere grondlagen is aan het maaiveld amper zichtbaar, doordat dit gedurende de meest recente geologische tijdperken is bedekt met lagen zand en klei (I&W & EZ&K, 2018).

Niet alle grondlagen in de Nederlandse ondergrond zijn geschikt voor geothermie. Een geschikte grondlaag moet ten eerste een aquifer zijn. Een aquifer is een watervoerende grondlaag die is ingesloten door grondlagen die geen water doorlaten (Braak et al., 2001). Aquifers die geschikt zijn voor geothermie moeten een dusdanige transmissiviteit hebben dat een productie van enkele duizenden kubieke meters water per dag kan worden gehaald. Transmissiviteit is een product van de dikte van de aquifer en de permeabiliteit van het gesteente. Dergelijke aquifers komen voornamelijk voor in Noord- en Zuid-Holland, Noord-Brabant en in Noord- en Oost-Nederland (Doornenbal & Pagnier, 2004). In Nederland bevinden zich alleen aquifers die geschikt zijn voor geothermische bronnen met een lage enthalpie. Er bevinden zich geen geothermische bronnen met een hoge enthalpie (>180°C), zoals geisers en stoom velden. (Wong et al., 2007). In tabel 1 zijn een aantal geschikte aquifers en de provincies waar ze voorkomen met bijbehorende reservoirparameters weergegeven in een tabel. De meeste geschikte aquifers bevinden zich in de groepen, van oud naar jong:

- Rotliggendgroepen
- Onder Triasgroep
- Rijnlandgroep
- Noordzeegroep

Aquifer	Diepte	Dikte (m)	Porositeit (%)	Perm. (mD)	Temp. (°C)	HIP (petajoule)
Rotliggendgroep zandsteenlagen						
Groningen, Friesland en Noord-Holland	2000-4500	10-200	11-25	30-600	max. >100	50
Onder Triasgroep zandsteenlagen						
Zuid-Holland en Noord-Brabant	2000-4000	25-300	Grote variatie	Grote variatie	max. >100	30
Oost- Drenthe en Groningen	2000-3500	Max. 80	Grote variatie	Grote variatie	Max. >100	3
Overige gebieden	300-5000	0-50	Grote variatie	Grote variatie	Max. >100	4
Rijnlandgroep zandsteenlagen						
Zuid-Holland	700-2500	Max. 250	15-30	Max. 3000	Max. 90	3
Zuidoost-Drenthe	800-1800	3-65	15-20	220-500	40-80	0,4
Noordwest-Friesland	1800-2100	10-200	15-22	1-30	70-80	
Noordzeegroep zanden						
Formatie van Breda (door heel Nederland)	<835	Grote variatie	30-35	50-200		
Brussel zand (door heel Nederland)	100-1150	0-135		Max. 600	15-45	

Tabel 1 Overzicht van potentiële aquifers voor geothermie in Nederland. Op basis van Wong et al. (2007) en Doornenbal & Pagnier (2004)

In tabel 1 is ook de HIP (Heat In Place) in Peta joules opgenomen om een indicatie te geven van de potentie van de verschillende aquifers. De HIP wordt berekend aan de hand van de gemiddelde dikte van een aquifer, de temperatuur, de warmtecapaciteit, de porositeit en de omvang van een aquifer (Wong et al., 2007).

Tabel 1 geeft een indicatie van de beschikbare aquifers voor geothermie in Nederland. De informatie over de reservoirparameters en de potentie van de aquifers functioneert enkel als een globaal overzicht en kan niet worden gebruikt voor het berekenen van geothermie potentie op lokaal niveau. De tabel is gebaseerd op tabellen uit Wong et al. (2007) en (Doornenbal & Pagnier, 2004). Ook de in de tabel genoemde provincies waar de aquifers voorkomen geven slechts een globaal overzicht. Ook buiten deze provincies is het voorkomen van geschikte aquifers mogelijk. Ondanks de vele boringen in de Nederlandse ondergrond zijn er namelijk nog gebieden die weinig onderzocht zijn. Dit komt doordat olie en gas boringen vaak in clusters voorkomen in gebieden met veel potentie. In de minder onderzochte gebieden zonder olie en gas winning kunnen zich echter ook aquifers bevinden die geschikt zijn voor geothermie (Braak et al., 2001).

2.7 Energie-ruimtevisies

In 2011 publiceerden Broersma et al. (2011) de uitkomsten van het SREX project. SREX staat voor Synergie tussen Regionale Planning en Exergie. Het SREX project introduceert een aanpak om energie en ruimte beter met elkaar te verbinden, met als doel om duurzame energielandschappen te ontwikkelen. Een belangrijk onderwerp hierbij is exergie. Exergie is in paragraaf 2.1 uitgelegd als de kwaliteit van energie. Broersma et al. (2011) geven aan dat het voor de verduurzaming van regio's belangrijk is dat er meer duurzame energie wordt geproduceerd en dat het exergieverlies in het energiesysteem wordt gereduceerd. Onder exergieverlies verstaan zij voornamelijk het niet nuttig omgaan met laagwaardige warmte. Door regio's te verduurzamen en het exergieverlies te reduceren, zal uiteindelijk het primaire energiegebruik uit fossiele brandstoffen afnemen en zullen duurzame energielandschappen ontstaan. De ontwikkeling van duurzame energielandschappen en de implementatie van duurzame energie in de ruimtelijke omgeving is een proces dat decennia zal duren. Dit ligt buiten het tijdsbestek van traditionele vormen van planning (Broersma et al., 2011). Het SREX onderzoek richt zich daarom op het verbeteren van het langetermijndenken in de regionale planning, door te werken aan lange-termijn-toekomst-visies. Broersma et al. (2011) introduceren energie-ruimtevisies als een tool om de effecten van trends en externe krachten op de lange termijn in kaart te brengen en toekomstige duurzame energielandschappen vorm te geven. Visies zijn een alternatief voor traditionele vorming van planning, omdat binnen visies meer aandacht is voor dynamiek en kritieke onzekerheden in vergelijking met traditionele blauwdrukplannen. Visies zijn niet bedoeld om de toekomst te voorspellen, maar om met behulp van voorstelbare toekomstbeelden verstandige en wel overwogen beslissingen te kunnen nemen. Visies kunnen planologen en beleidsmakers helpen om effectiever bij te dragen aan het debat over de duurzame ontwikkeling van regio's op de lange termijn (Van Kann, 2015). Daarnaast kunnen gemeenschappen deelnemen aan de vorming van lokale visies, waarbij de visies het openbare debat aanmoedigen en bevorderen (Broersma et al., 2011).

Met energie-ruimtevisies worden in deze thesis visies bedoeld die betrekking hebben op de duurzame ontwikkeling van regio's op de lange termijn. De visies integreren verwachte ontwikkelingen met verre toekomstbeelden en bewuste ruimtelijke interventies. Om grip te krijgen op ontwikkelingen in de verre toekomst, kunnen er meerdere visies worden opgesteld op basis van verschillende toekomstscenario's. Het SREX onderzoek maakt onderscheid tussen 4 verschillende visies op basis van 4 toekomstscenario's voor regio's: Mondiale markt, Veilige regio, Mondiale solidariteit en Zorgzame regio. Van Kann (2015) beschrijft deze scenario's als volgt: Het Mondiale markt scenario wordt gekenmerkt door kapitalisme, individualisme en materialisme, met weinig aandacht voor de leefomgeving. Er is een hoge mate van economische ontwikkeling en mondialisering. In het Veilige regio scenario is er sprake van protectionistische, zelfvoorzienende regio's met veel aandacht voor de leefomgeving en culturele identiteit. De bevolking krimpt en de mondialisering stopt. In het Mondiale solidariteit scenario zijn culturele identiteit, natuur, milieu en de sociale aspecten van het leven belangrijk. De bevolking krimpt, maar de economie groeit op een duurzame manier via institutionele sturing, met zowel top-down als bottom-up initiatieven. De Zorgzame regio is een scenario waarin duurzaamheid, milieu en sociale cohesie centraal staan, met een hoge betrokkenheid van de regio. De bevolking krimpt, er is weinig mondialisering en er is beperkte economische ontwikkeling.

Broersma et al. (2011) introduceren een vijfstappenbenadering om visies te ontwikkelen. Deze methode integreert verwachte ontwikkelingen in de nabije toekomst, verre toekomstbeelden door kritieke onzekerheden en bewuste veranderingen in één visievormingsproces. Het visievormingsproces wordt aangevuld met een uitgebreide analyse van de regio en een evaluatie van robuuste en mogelijke ruimtelijke interventies (Broersma et al., 2011). De vijfstappenbenadering is weergegeven in figuur 10. De energie-ruimtevisies worden opgesteld met een multidisciplinair projectteam, met bijvoorbeeld stedenbouwkundigen en planologen, maar ook energie-experts en andere stakeholders (Broersma et al., 2011). De vijfstappenbenadering volgens Broersma et al. (2011) wordt hieronder kort toegelicht.

1. Analyse van huidige condities

Eerst wordt uitgezocht hoe de regio op dit moment werkt in vergelijking met andere regio's en wat de historie is van de regio. Daarnaast wordt het energiesysteem geanalyseerd en worden potenties voor duurzame energie inzichtelijk gemaakt.

2. Nabije-toekomstontwikkelingen

In deze stap worden de verwachte trends en geplande of verwachte ontwikkelingen in de nabije toekomst inzichtelijk gemaakt. Hiervoor worden onder andere beleidsmakers geraadpleegd.

3. Mogelijke verre toekomstbeelden

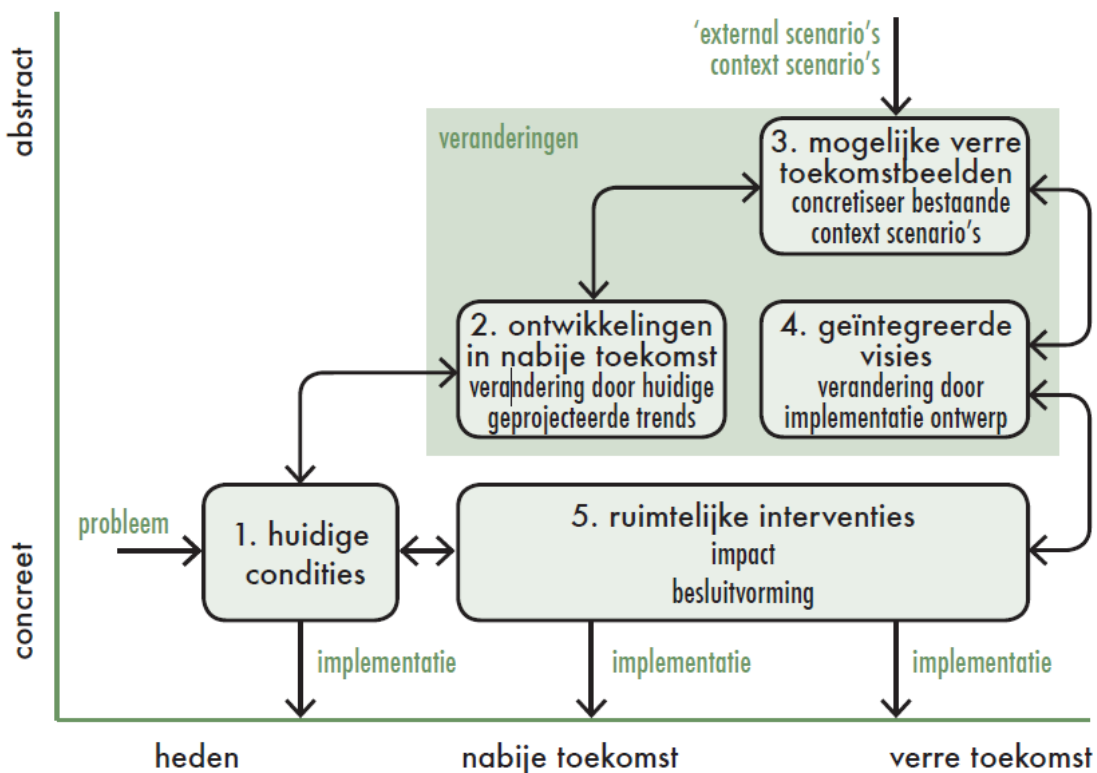
In deze stap worden op basis van 4 mogelijke toekomst scenario's (Mondiale markt, Veilige regio, Mondiale solidariteit en Zorgzame regio) verre toekomst geïllustreerd. Hierbij wordt inzichtelijk gemaakt wat voor lange termijn ontwikkelingen waar in de regio worden verwacht. Deze ontwikkelingen worden geïllustreerd met behulp van scenario basiskaarten.

4. Energie-ruimtevisies

In deze vierde stap worden op basis van de scenario basiskaarten per scenario visies opgesteld. De visies laten zien hoe "van een mogelijke toekomst een gewenste toekomst gemaakt kan worden" (Van Kann, 2015). Op de scenario basiskaarten worden mogelijke ruimtelijke interventies inzichtelijk gemaakt in een visie, die passen binnen het kader van elk scenario.

5. Identificeren van ruimtelijke interventies

In deze laatste stap wordt gekeken wat nu al kan en moet worden gedaan. Er wordt verder ingezoomd op de ruimtelijke interventies van elke visie met behulp van referentiebeelden en aanvullende data. Daarnaast worden de visies met elkaar vergeleken om vast te stellen welke ruimtelijke interventies vaak voorkomen. Ruimtelijke interventies die in meerdere visies voorkomen worden als robuust beschouwd en kunnen op korte termijn al inzet worden van beleid, omdat zij minder gevoelig zijn voor kritieke onzekerheden (Van Kann, 2015).

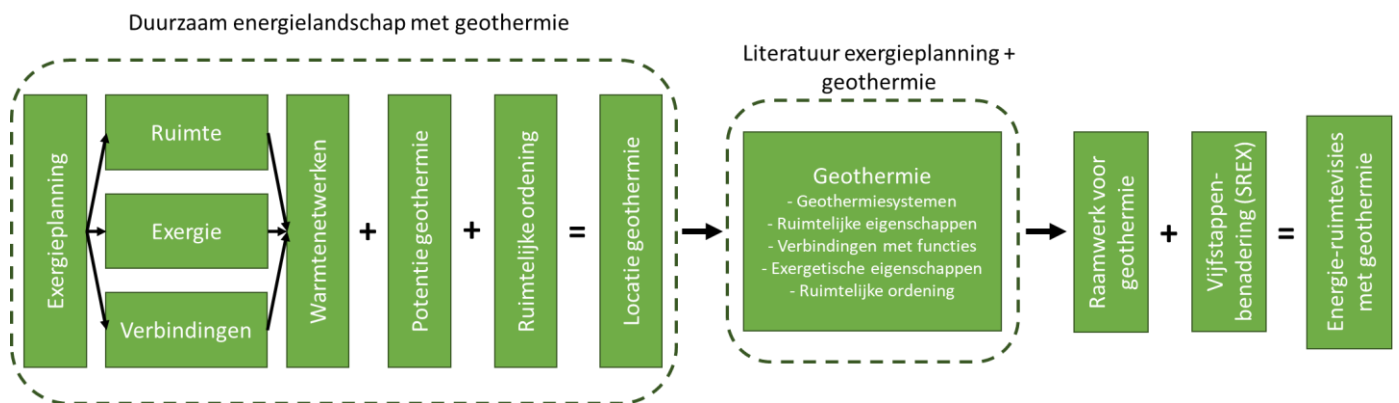


Figuur 10 Vijfstappenbenadering voor het opstellen van energie-ruimtevisies (Van Kann, 2015)

2.8 Conceptueel model

Bij het opstellen van energie-ruimtevisies wordt exergieplanning toegepast om duurzame energielandschappen vorm te geven. Dit betekent dat ruimtelijke planning wordt toegepast waarbij rekening wordt gehouden met de ruimtelijke eigenschappen van duurzame warmtebronnen, warmtelevering volgens het exergieprincipe en de manier waarop warmteconsumenten efficiënt worden verbonden met warmtebronnen. Al deze begrippen zijn van toepassing op het ontwerp van een efficiënt warmtenetwerk, wat weer van invloed is op de locatiekeuze voor een duurzame warmtebron zoals geothermie. De mogelijke locaties van geothermiesystemen zijn daarnaast afhankelijk van de ondergrondse potentie. Tevens is voor de locatiekeuze van geothermiesystemen de ruimtelijke ordening ook van belang. Geothermiesystemen zijn niet overal mogelijk, de ondergrondse ruimte kan beperkt zijn door de aanwezigheid van andere functies en in de regio kunnen gebieden voorkomen waar boren beperkt is toegestaan.

De in de vorige alinea genoemde begrippen die in dit theoretisch kader zijn behandeld zijn allen relevant voor het op te stellen raamwerk. Voor het raamwerk wordt in het vervolg van dit onderzoek literatuur verzameld over geothermiesystemen die betrekking heeft op de volgende begrippen uit het theoretisch kader: ruimte, exergie, verbindingen met warmteconsumenten, warmtenetwerken, ondergrondse potentie en (ondergrondse) ruimtelijke ordening. Door het raamwerk en de literatuur toe te passen in een ontwerpproces wordt duidelijk wat de samenhang is tussen deze begrippen en welke aspecten van belang zijn voor het ontwerpen van energie-ruimtevisies. De samenhang tussen de begrippen is weergegeven in het conceptueel model in figuur 11. Het doel van het raamwerk is om ter aanvulling op de vijfstappenbenadering energie-ruimtevisies te kunnen opstellen waarin duurzame energielandschappen met geothermie worden vormgegeven.

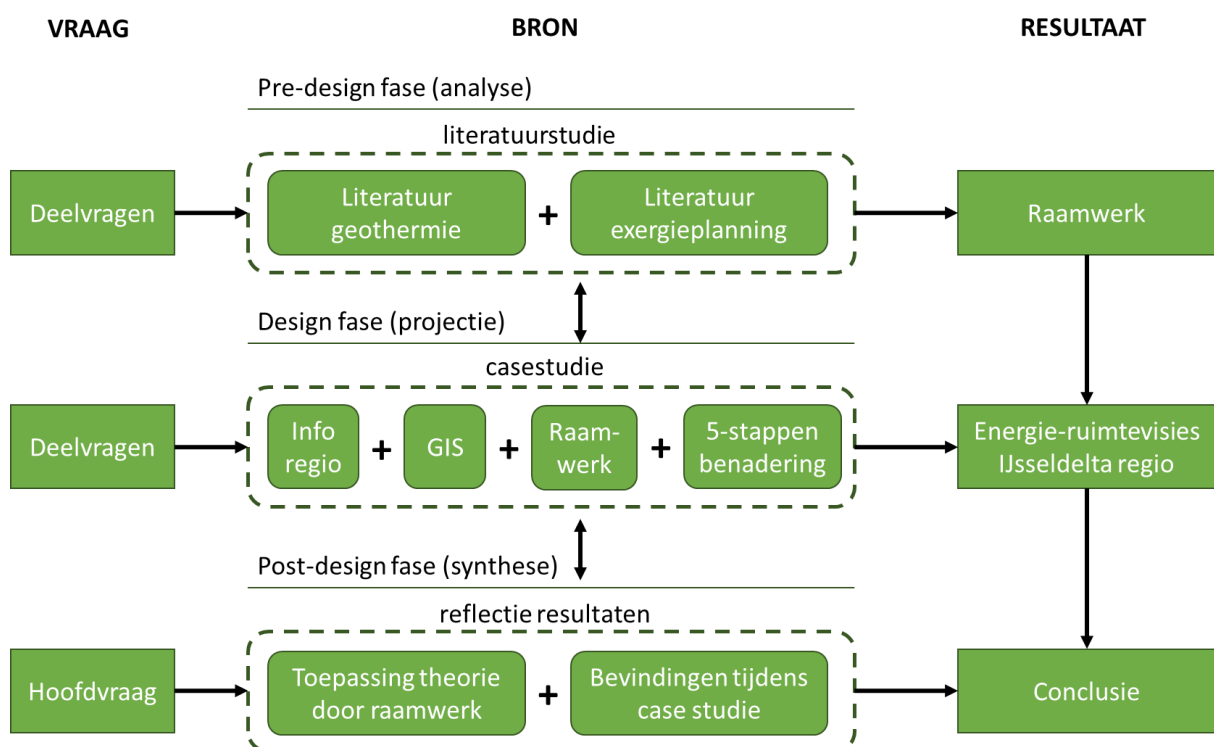


Figuur 11 Conceptueel model

3. Methodologie

In dit onderzoek wordt middels research by design gewerkt aan een raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies. Research by design is het uitvoeren van onderzoek door te ontwerpen. Bij research by design vormt het ontwerpproces een manier om nieuwe kennis te vergaren en methodieken te ontwikkelen (Hauberg, 2011). Een research by design proces is elk onderzoeksproces waarin het ontwerpen een grote rol speelt. Dergelijke processen maken deels gebruik van bestaande methodieken en huidige kennis, maar bieden ook de mogelijkheid om te schetsen en te experimenteren om zo hier iets nieuws aan toe te voegen (Hauberg, 2011).

Dit onderzoek is opgedeeld in drie fasen: een pre-design fase, een design fase en een post-design fase volgens de methodiek van Roggema (2017). De fasen volgen elkaar niet op in een lineair traject, maar zijn verweven met elkaar en bieden mogelijkheden tot feedback. Zo wordt in de pre-design fase gewerkt aan een raamwerk, dat in de design fase wordt toegepast in een casestudie. Het ontwerpproces binnen deze casestudie biedt echter weer inzichten in de werking en de inhoud van het raamwerk, die worden gebruikt om het raamwerk aan te passen en vorm te geven. De pre-design fase is dan ook gericht op het analyseren van het onderwerp van studie en het zoeken naar wat al bekend is en wat mogelijke oplossingen zijn. In deze fase wordt naar literatuur gezocht over geothermie die van belang is voor de toepassing van geothermiesystemen in energie-ruimtevisies. Er wordt een literatuurstudie uitgevoerd over de eigenschappen van geothermiesystemen met betrekking tot ruimte, exergie, verbindingen met warmteconsumenten en de plek binnen de ruimtelijke ordening. Daarna wordt geprobeerd om de bevindingen vanuit de literatuur samen te vatten in een raamwerk voor de toepassing van geothermiesystemen in energie-ruimtevisies. In de design fase wordt vervolgens onderzocht energie-ruimtevisies met geothermie eruit kunnen zien en wat er mogelijk is, wanneer het raamwerk hiervoor wordt toegepast. In de design fase wordt met behulp van een casestudie gewerkt aan een ruimtelijk ontwerp, in de vorm van energie-ruimtevisies. De case is de IJsseldelta regio. Het raamwerk wordt toegepast om de casestudie uit te voeren en de energie-ruimtevisies vorm te geven. Op deze manier wordt de werking van het raamwerk als het ware geprojecteerd in een ruimtelijk ontwerp. In de post-design fase wordt gereflecteerd op de resultaten van het onderzoek. Het raamwerk en de opgestelde energie-ruimtevisies vormen de synthese van het onderzoek. Op basis van de resultaten en bevindingen die zijn opgedaan tijdens de pre-design en design fase worden de uitkomsten van het onderzoek in een breder perspectief beschreven en wordt een conclusie gegeven. In onderstaand figuur zijn de drie fasen van dit onderzoek schematisch weergegeven.



Voor geografisch onderzoek kan grofweg een onderscheid worden gemaakt tussen twee manieren van data collectie en analyse: kwalitatief en kwantitatief. Bij een kwantitatieve aanpak wordt geprobeerd om met behulp van objectieve wetenschappelijke modellen en technieken grip te krijgen op geografische ontwikkelingen (Clifford et al., 2010). Een kwalitatieve aanpak benaderd geografische ontwikkelingen meer vanuit een humanistisch perspectief en gebruikt kwalitatieve onderzoeksmethodieken om de waarden, emoties en intenties van mensen te onderzoeken (Clifford et al., 2010). Voor dit onderzoek is met name een kwantitatieve aanpak toegepast. In de literatuurstudie is vooral gekeken naar de technische en praktische eigenschappen van geothermie. Ook in de casestudie is gefocust op geografische modellen op basis van objectieve data. Er is geen gebruik gemaakt van kwalitatieve methodieken zoals diepte interviews en focus groepen (Clifford et al., 2010). De gebruikte bronnen en methodes per deelvraag zijn weergegeven in Bijlage 3. Hieronder worden de fases van dit onderzoek verder toegelicht, met een overzicht van de deelvragen per fase.

Pre-design fase (analyse)

De pre-design fase is gericht op het beter begrijpen van het vraagstuk. De context van het vraagstuk wordt onderzocht en potentiële methodieken en oplossingen voor het ontwerpproces worden beschreven, nog voordat aan het ontwerpen wordt begonnen (Roggema, 2017). In deze fase wordt op basis van literatuur antwoord gegeven op enkele deelvragen van dit onderzoek. Zie figuur 12 voor een overzicht van de betreffende deelvragen. Op basis van de deelvragen en de literatuur over exergieplanning, geothermie en energie-ruimtevisies in hoofdstuk 2 wordt bepaald welke begrippen van belang zijn bij het zoeken naar literatuur over geothermiesystemen. Er wordt gezocht naar onderwerpen zoals temperatuur, thermisch vermogen, ondergronds ruimtebeslag, locatiegebondenheid en schaalgrootte. De literatuurstudie is daarmee gefocust op de exergetische en ruimtelijke eigenschappen van geothermiesystemen. Ook wordt in het kader van de ruimtelijke eigenschappen literatuur gezocht over welke plek geothermiesystemen hebben binnen de ruimtelijke ordening van de ondergrond. Op basis van de bevindingen die zijn opgedaan tijdens de literatuurstudie worden vervolgens een aantal acties gedefinieerd die helpen om de literatuur over geothermie toe te passen bij het ontwerpen van energie-ruimtevisies. De literatuurstudie en de gedefinieerde acties vormen gezamenlijk een raamwerk voor geothermie dat kan worden ingezet bij het ontwerpen van energie-ruimtevisies.

Deelvragen Fase 1: literatuurstudie

- Welke soorten geothermiesystemen zijn er in Nederland?
- Wat zijn de ruimtelijke eigenschappen van de geothermiesystemen?
- Wat zijn de exergetische eigenschappen van de geothermiesystemen?
- Hoe kunnen geothermiesystemen worden verbonden met warmteconsumenten?
- Welke andere ruimtelijke functies kunnen conflicteren met geothermiesystemen?
- Is het mogelijk om de eigenschappen van de geothermiesystemen te duiden in een raamwerk?

Figuur 12 Deelvragen pre-design fase

Er is gekozen voor een literatuurstudie omdat op deze manier bevindingen over het onderwerp geothermie konden worden opgedaan, die vervolgens konden worden gekoppeld aan de theorie uit het theoretisch kader. Volgens Clifford et al. (2010) kunnen met behulp van een literatuurstudie eigen bevindingen en ideeën worden gekoppeld aan de bredere literatuur over het onderwerp. Daarnaast helpt een literatuurstudie om te achterhalen welke zaken er nog ontbreken aan eigen bevindingen. Ook kunnen met behulp van een literatuurstudie eigen ideeën over het onderwerp worden verbreed en verfijnd en kan het eigen onderzoek binnen een context worden geplaatst (Clifford et al., 2010). De literatuurstudie is uitgevoerd met behulp van internet browsers zoals SmartCat, Google en Google Scholar. Clifford et al. (2010) raden daarnaast het gebruik van databases aan, omdat deze vaak meer informatie hebben over specifieke onderwerpen dan zoekmachines zoals Google en ook meer direct bruikbare, wetenschappelijke data hebben. Daarom zijn ook verscheidene databases geraadpleegd, waaronder NLOG.nl en data.overheid.nl.

Voor de literatuurstudie is een snowballing techniek toegepast. Er is eerst gezocht naar relevante literatuur over het onderwerp en daarna is gekeken welke referenties de auteur gebruikt. Deze referenties zijn opgezocht en daarna is weer gekeken of deze auteurs ook bruikbare referenties hebben. Daarnaast is op basis van de gevonden literatuur inzicht verschaft in relevante termen en onderwerpen en zijn op basis hiervan zoektermen opgesteld. In Bijlage 2 is een lijst opgenomen van gebruikte zoektermen. In Bijlage 3 is een overzicht gegeven van de belangrijkste toegepaste bronnen per deelvraag. Voor de literatuurstudie is eerst gekeken naar enkele relevante basis documenten met betrekking tot geothermie en duurzame energielandschappen. Voor algemene informatie over geothermie zijn de boeken van Wong et al. (2007) en Doornenbal & Pagnier (2004)

gebruikt. Voor informatie over duurzame energielandschappen is gebruik gemaakt van literatuur vanuit het SREX project, zoals Broersma et al. (2011), Stremke (2010) en Van Kann (2015). Op basis hiervan zijn zoektermen opgesteld en is vervolgonderzoek gedaan.

Met behulp van de boeken van Wong et al. (2007) en Doornenbal & Pagnier (2004) zijn in dit onderzoek drie verschillende geothermiesystemen in Nederland geclassificeerd. Hierna is per geothermiesysteem gezocht naar relevante literatuur. Voor WKO systemen is gebruik gemaakt van de rapporten van Maas (2013) en Bouwmeester (2013) en voor ondiepe geothermiesystemen bleken de rapporten van Hellebrand et al. (2012) en Beek et al. (2014) nuttig. Voor recente literatuur over diepe geothermiesystemen in Nederland is gebruik gemaakt van rapporten die in samenwerking met de huidige diepe geothermiesector en het Ministerie EZK zijn opgesteld binnen de Kennisagenda van Kas als Energiebron. Met name de rapporten van Schoof (2014) en Baisch et al. (2016) bleken relevant.

Op basis van de relevante literatuur is per geothermiesysteem beschreven wat voor aandachtspunten en kenmerken van belang zijn wanneer geothermiesystemen worden verbonden met warmteconsumenten. De relevante literatuur over de verschillende geothermiesystemen is ook gebruikt om de exergetische eigenschappen (aanvoertemperaturen en thermische vermogens) van de geothermiesystemen te beschrijven en aansluitende warmteconsumenten te zoeken. Voor de warmteconsumenten van diepe geothermiesystemen is vooral gekeken naar Lindal diagrammen in de rapporten van onder andere Dreesen & Laenen (2010) en Van Nguyen et al. (2015). Lindal diagrammen zijn een erkende methodiek om geothermie toepassingen inzichtelijk te maken.

Om een indicatie te geven van de ruimtelijke kenmerken is gezocht naar studies die het ondergrondse ruimtebeslag van geothermiesystemen berekenen en waarbij de eigenschappen van de geothermiesystemen overeenkomen met de geclassificeerde geothermiesystemen, qua thermisch vermogen, diepte en temperatuur. Voor aandachtspunten met betrekking tot de ruimtelijke ordening van de ondergrond is met name gebruik gemaakt van beleidsdocumenten via overheidswebsites, zoals de rapporten van Oomes (2012), De Taskforce WKO (2009) en het Ministerie van I&W & EZ&K (2018).

De belangrijkste bevindingen vanuit de literatuurstudie zijn samengevat en toegepast in een aantal acties. De literatuurstudie en de acties vormen gezamenlijk een raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies. De resultaten van de acties zijn potentiekaarten en energie-ruimtevisies. De acties zijn deels gebaseerd op de aanpak voor de kartering van energiepotenties volgens Van der Krogt (2011) en de methodiek achter de geothermie potentiekaarten in ThermoGis, volgens Kramers et al. (2012). ThermoGis is een openbaar web-based geografisch informatie systeem met gegevens over de ondergrond en de potentie van geothermie.

Design fase (projectie)

In de design fase wordt geprojecteerd hoe energie-ruimtevisies met geothermie eruit zien, wanneer deze worden vormgegeven volgens het raamwerk. Met behulp van het raamwerk worden energie-ruimtevisies geschetst en wordt iteratief gezocht naar oplossingen. In deze fase wordt de werking van het raamwerk geanalyseerd door middel van een casestudie, om de deelvraag in figuur 13 te kunnen beantwoorden. De casestudie bestond uit een analyse van de energiestromen, ruimtelijke ontwikkelingen en potentie voor geothermie in de IJsseldelta regio, volgens het in dit onderzoek opgestelde raamwerk en de vijfstappenbenadering. Op basis hiervan zijn twee energie-ruimtevisies voor de IJsseldelta regio in 2030 en 2040 ontworpen, voor het scenario Mondiale Solidariteit. Er is gekozen voor een casestudie met een enkele case, de IJsseldelta regio, omdat zo de werking van het raamwerk kon worden geanalyseerd binnen de context van een specifieke regio. Energie-ruimtevisies zijn regio specifiek, dus is de context van een regio altijd van belang. Casestudies kunnen als onderzoeksmethodiek worden toegepast om de contextuele condities van een case mee te nemen in het onderzoek, wanneer men denkt dat de context belangrijk is voor het onderwerp van studie (Yin, 2003). Daarnaast kan door de toepassing van het raamwerk binnen een casestudie, de werking van het raamwerk ook inzichtelijk worden gemaakt. Casestudies hebben namelijk niet enkel een exploratieve aard, maar kunnen ook een illustrerende functie hebben en beschrijvend en verklarend zijn (Yin, 2003).

Deelvragen Fase 2: casestudie

- Kan dit raamwerk worden ingezet bij het opstellen van energie-ruimtevisies?

Figuur 13 Deelvragen design fase

Ook bij casestudie onderzoek is de validiteit, betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van het onderzoek belangrijk. Met name de validiteit staat bij casestudie onderzoek vaak ter discussie, omdat niet duidelijk is of wel kan worden gegeneraliseerd op basis van een enkele case. Bij casestudies kunnen echter net als bij experimenten de theoretische proposities worden gegeneraliseerd, maar er kunnen geen uitspraken worden gedaan over de verwachte resultaten bij andere cases binnen een andere context (Yin, 2003). De betrouwbaarheid van de casestudie in dit onderzoek is gewaarborgd door gebruik te maken van de theorie uit de literatuurstudie en door betrouwbare bronnen toe te passen. De reproduceerbaarheid wordt gewaarborgd door in deze paragraaf uit te leggen hoe de casestudie is uitgevoerd en ook in de beschrijving van de resultaten van de casestudie in hoofdstuk 5 een stapsgewijze aanpak aan te houden. Daarnaast is voor de casestudie enkel gebruik gemaakt van openbare data, waardoor deze makkelijker te reproduceren is voor andere regio's.

Voor de casestudie is de IJsseldelta regio als case gekozen, omdat in dit gebied enkele overheden al bezig zijn met de ontwikkeling van geothermie. Er zijn al Opsporingsvergunningen voor aardwarmte aangevraagd (NLOG, 2018) en er zijn ook al WKO-systemen, warmtenetwerken en een diep geothermiesysteem actief in de regio. Dit betekent dat de geologie in de regio waarschijnlijk potentie heeft voor de toepassing van geothermiesystemen. Dit was een vereiste voor de casestudie, omdat de casestudie als doel had om uiteindelijk energie-ruimtevisies op te stellen, waarin geothermiesystemen een rol hadden. Hiervoor moet er ondergronds wel potentie zijn om geothermiesystemen te kunnen ontwikkelen.

De casestudie is uitgevoerd met behulp van een GIS (geografisch informatie systeem). De ruimtelijke kaarten, potentiekaarten en energie-ruimtevisies zijn opgesteld met behulp van GIS-software, waarmee gegevens over energiestromen, warmtevraag en geothermisch potentieel geografisch in kaart konden worden gebracht. Het resultaat van de casestudie is een beschrijving van de context van de regio, de ontwikkelingen in de nabije toekomst en verre toekomstbeelden in de vorm van energie-ruimtevisies, aangevuld met andere GIS kaarten. Het geografische informatie systeem is voornamelijk toegepast om de data te visualiseren. GIS is een geschikte tool voor visualisatie van data, wanneer deze data herhaaldelijk op verschillende manieren en in verschillende kaarten moet worden weergegeven (Clifford et al., 2010). Daarnaast kan met behulp van GIS gemakkelijk een grote hoeveelheid data worden verkend, doordat deze data via het internet rechtstreeks in de kaart kan worden geladen. GIS wordt dan ook veel toegepast voor gebiedsanalyses (Clifford et al., 2010).

Het doel van de casestudie is het aantonen of het raamwerk een effectieve tool is om basiskaarten, scenariokaarten en energie-ruimtevisies op te stellen. Binnen de casestudie zijn alleen scenariobasiskaarten en energie-ruimtevisies opgesteld voor het scenario Mondiale Solidariteit. Het doel van de casestudie was namelijk om inzichtelijk te maken of en hoe deze kaarten met behulp van het raamwerk kunnen worden opgesteld en niet om verschillen tussen diverse scenario's of potentiële ruimtelijke interventies in kaart te brengen. Deze acties behoren bij stap 5 van de vijfstappenbenadering. De casestudie beperkt zich daarmee tot stap 4 en is minder uitgebreid dan andere casestudies die wel alle stappen van de vijfstappenbenadering doorlopen, zoals de casestudies van de regio's Zuid-Limburg en Zuidoost-Drenthe uit het onderzoek van Van Kann (2015) en Broersma et al. (2011).

Voor de casestudie is een grote hoeveelheid aan data over de IJsseldelta regio verzameld en opgenomen in een geografisch informatie systeem. De casestudie is stapsgewijs uitgevoerd volgens de vijfstappenbenadering en de acties uit het raamwerk. Er is begonnen met het verzamelen van algemene informatie over de IJsseldelta regio met betrekking tot de bestuurlijke grenzen, het landschap, de ruimtelijke structuur en inwoneraantallen. Hiervoor is gebruik gemaakt van het rapport van Haartsen (2018) en de website van het CBS (CBS, 2018). Daarnaast is data verzameld over energiestromen en grote energieverbruikers in de regio via de website van het RVO (RVO, 2018a). Het ondergrondse ruimtegebruik, inclusief kwetsbare drinkwater- en natuurgebieden, is inzichtelijk gemaakt door data van NLOG (NLOG, 2018), het Kadaster (Kadaster, 2018) en het NGR (NGR, 2018).

De potentiëkaarten voor geothermiesystemen zijn weergegeven in GJ/ha/jaar of GJ/m²/jaar om deze te kunnen vergelijken met de warmtevraag in de regio (Kramers et al., 2012). De potentiëkaarten voor WKO systemen zijn verkregen via het NGR (NGR, 2018c). De potentiëkaarten voor ondiepe geothermie en diepe geothermie zijn aangevraagd via de website van ThermoGIS (TNO, 2018). Daarnaast is de geothermie potentie ook weergegeven in kaarten met de aanvoertemperatuur en het thermisch vermogen van potentiële geothermiesystemen, om ook een beeld te krijgen bij de mogelijke warmteconsumenten met een aansluitende temperatuurvraag en de technische potentie.

Data over de warmtenetwerken in de regio is verkregen via de website van het RVO (RVO, 2018a). De warmtevraag in de regio is inzichtelijk door eerst data te verzamelen over het gasverbruik per buurt, via de website van Energie in Beeld (Energie in beeld, 2018). Dit gasverbruik is vermenigvuldigd met 31,65 GJ/m³, de onderste verbrandingswaarde van aardgas (Heslinga & Harmelen, 2006), en gedeeld door het oppervlak om een indicatie te krijgen van de warmtevraag per vierkante meter per jaar. Hierbij is aangenomen dat de gasverbranding volledig wordt gebruikt voor de productie van warmte. De warmteconsumenten in de regio zijn inzichtelijk gemaakt door middel van kaarten over de ruimtelijke functies via ESRI (ESRI, 2018). De energielabels van de warmteconsumenten zijn verkregen via de website van Energielabelatlas (Waag Society, 2019).

Op basis van de bestemmingsplannen in de regio vanuit ESRI (ESRI, 2018) zijn de toekomstige ruimtelijke ontwikkelingen in de regio beschreven en weergegeven in de Basiskaart nabije toekomst. Op basis van kaarten met het bouwjaar (ESRI, 2018a) en de energielabels per woning en de theorie uit paragraaf 4.2 is bepaald of woningen nu of op korte termijn met LTV kunnen worden verwarmd en dit is ook weergegeven in de Basiskaart nabije toekomst.

Met behulp van de Basiskaart nabije toekomst is een scenario-basiskaart opgesteld, voor het scenario Mondiale Solidariteit. De verwachte ruimtelijke ontwikkelingen in deze scenario-basiskaart zijn gebaseerd op de theorie over het toekomstscenario Mondiale Solidariteit uit het onderzoek van Van Kann (2015). Beide energie-ruimtevisies zijn vervolgens opgesteld op basis van de scenario-basiskaart en het raamwerk. Hierbij is de theorie uit hoofdstuk 4 toegepast om te bepalen welke geothermiesystemen aansluiten bij welke warmteconsumenten. Ook is rekening gehouden met de ruimtelijke eigenschappen van de geothermiesystemen en de ondergrondse ruimtelijke ordening. De verduurzaming van de regio is vormgegeven op basis van de theorie uit paragraaf 2.3 over de NSS strategie en de REAP methodiek. Daarnaast is voor de ontwikkeling van het regionale warmtenetwerk de theorie over netwerkvorming in paragraaf 2.4 geraadpleegd.

Post-design fase (synthese)

In de post-design fase van dit onderzoek wordt gereflecteerd op de resultaten van dit onderzoek en hoe deze kunnen worden toegepast buiten dit onderzoek. De resultaten bestaan uit ruimtelijke ontwerpen, in de vorm van energie-ruimtevisies, en het raamwerk met de bijbehorende beschrijvingen, bevindingen en methodieken. In de post-design fase wordt een antwoord geformuleerd op de hoofdvraag van dit onderzoek. Er wordt beschreven welke aandachtspunten er zijn wanneer geothermiesystemen worden toegepast in energie-ruimtevisies en gereflecteerd op het raamwerk. Er worden eerste voorlopige conclusies en bevindingen beschreven over de inhoud, de werking en de effectiviteit van het raamwerk voor het toepassen van geothermiesystemen in energie-ruimtevisies. Dit wordt gedaan op basis van bevindingen die zijn opgedaan tijdens het opstellen van het raamwerk en tijdens de toepassing van het raamwerk in de casestudie. De antwoorden op de hoofdvraag en alle deelvragen worden beschreven in de conclusie van dit onderzoek.

Hoofdvraag Fase 3: reflectie resultaten

- Hoe kunnen geothermiesystemen worden toegepast in energie-ruimtevisies?

Figuur 14 Hoofdvraag post-design fase

4. Raamwerk voor geothermie

In dit hoofdstuk wordt gewerkt aan een raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies. Op basis van algemene literatuur over de Nederlandse ondergrond en over geothermie wordt eerst geprobeerd om drie verschillende geothermiesystemen te classificeren. Daarna worden de eigenschappen van deze geothermiesystemen beschreven die betrekking hebben op ruimte, exergie, verbindingen met warmteconsumenten, warmtenetwerken en de plek binnen de (ondergrondse) ruimtelijke ordening. Hierbij worden ook de verschillen tussen de drie geothermiesystemen inzichtelijk gemaakt.

4.1 Geothermiesystemen

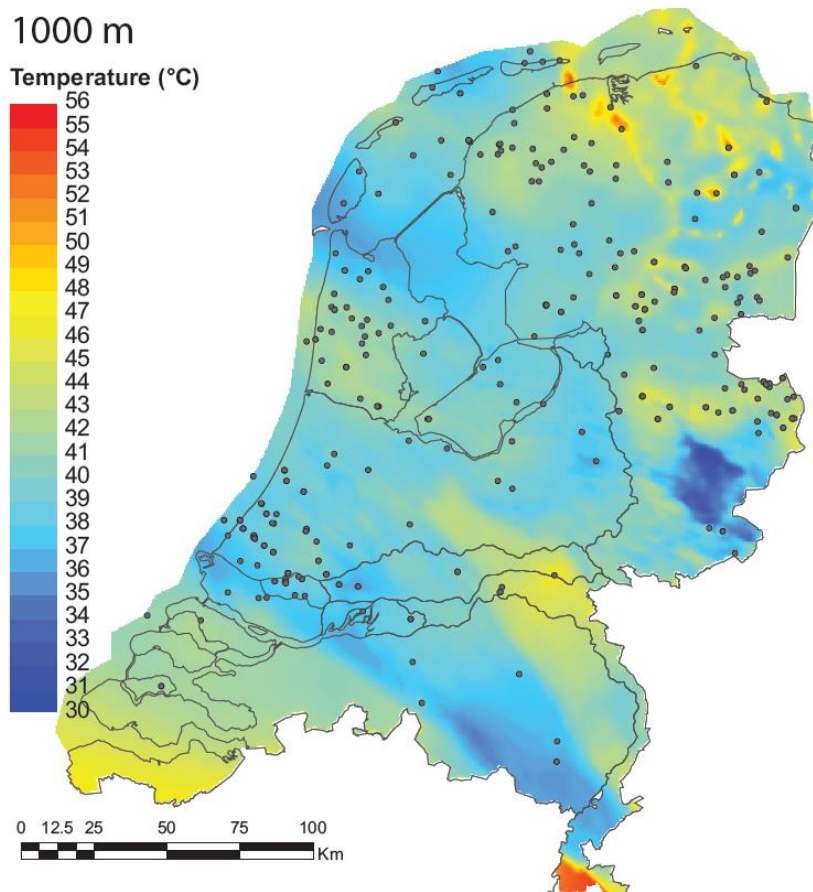
In Paragraaf 2.6 is al een algemene beschrijving gegeven van de ondergrond van Nederland. Hierbij is een korte introductie gegeven over de verschillende aardlagen welke kunnen worden gebruikt voor geothermie. In deze paragraaf wordt onderscheid gemaakt tussen drie verschillende soorten geothermie op basis van de benutte aardlagen, de bovengrondse toepassingen en de winningstechnieken.

Voor een classificatie van de verschillende types geothermie die in Nederland kunnen worden toegepast is het allereerst belangrijk om te definiëren wat precies wordt verstaan onder geothermie. Dit onderzoek richt zich op geothermiesystemen die gebruik maken van aquifers waaruit op een economische manier water kan worden geproduceerd. Dit betekent dat deze aquifers van nature dusdanig permeabel zijn dat op een economisch rendabele manier water kan worden omhoog gepompt en teruggepompt in dezelfde aquifer. Het geothermiesysteem is daardoor in balans, er gaat evenveel water uit de aquifer als dat er weer in gaat. Dit soort geothermiesystemen worden hydrothermische systemen genoemd. Hydrothermische systemen zijn het meest relevant voor de toepassing van geothermie in Nederland (Baisch et al., 2016). Naast hydrothermische systemen bestaan er ook petrothermische systemen. Bij petrothermische systemen heeft het gesteente van nature niet voldoende permeabiliteit om water te kunnen produceren. Het gesteente moet daarom worden gestimuleerd om de permeabiliteit en daarmee de hydraulische conductiviteit te vergroten. Bij het stimuleren van het gesteente kan geïnduceerde seismiciteit optreden. Dit soort geothermiesystemen wordt ook wel EGS (Enhanced Geothermal Systems) genoemd (Baisch et al., 2016). Petrothermische ofwel EGS systemen worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

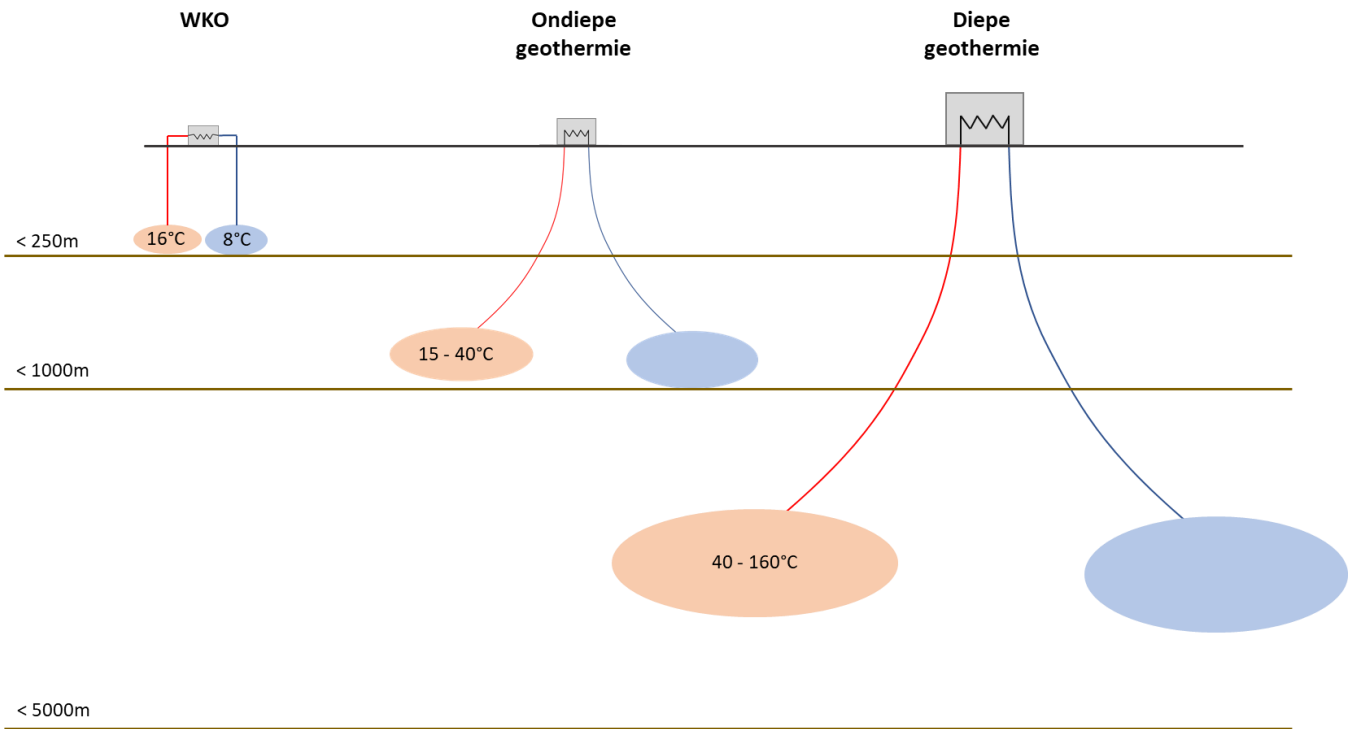
Op basis van de opbouw van de Nederlandse ondergrond en de verschillende manieren waarop deze ondergrond wordt gebruikt voor geothermie kan over het algemeen onderscheid worden gemaakt tussen drie types geothermie: warmte-koudeopslag (WKO), ondiepe geothermie en diepe geothermie. Het type geothermie is afhankelijk van de diepte. De diepte is een geschikte variabele om de drie soorten geothermie te onderscheiden, omdat diepte altijd is gerelateerd aan temperatuur. Elk type geothermie heeft daarmee zijn eigen temperatuurinterval met bijbehorende bovengrondse toepassingen. De temperatuurgradiënt in Nederland is vrij constant. De temperatuur in de ondergrond neemt met ongeveer 3°C per 100m diepte toe. Aan het maaiveld heeft de bodem een temperatuur van ongeveer 10°C (Wong et al., 2007). Er zijn wel enkele regio's in Nederland waar de ondergrond warmer of kouder is dan deze temperatuurgradiënt. Figuur 15 geeft een inzicht in de bodemtemperatuur in Nederland op 1000m diepte. Hier is goed te zien dat de bodemtemperatuur in grote delen van Nederland echter hetzelfde is en niet sterk afwijkt. Hierdoor kan in Nederland onderscheid worden gemaakt tussen verschillende soorten geothermie op basis van de diepte van de aquifer en de daarbij horende bodemtemperatuur.

De meest ondiepe soort geothermie is WKO. In dit onderzoek wordt voor de diepte van WKO systemen een diepte van 50 tot 250m aangehouden. Ondiepe geothermie bevindt zich in dit onderzoek op een diepte tussen 250 en 1000m onder maaiveld. Onder diepe geothermie worden alle geothermiebronnen gerekend die zich nog dieper bevinden dan 1000m onder maaiveld. Deze classificatie van geothermiesystemen is schematisch weergegeven in figuur 16.

Deze classificatie van geothermiesystemen naargelang de diepte is gebaseerd op de classificatie van de ondergrond volgens Oomes (2012). Daarnaast is rekening gehouden met de minimale en maximale dieptes van de meest geschikte aquifers voor geothermie, zoals te zien is in tabel 1. De grens van 1000m diepte voor ondiepe geothermie is gekozen omdat dit bij benadering de maximale diepte is waarin geschikte aquifers uit de Noordzeegroep in Nederland voorkomen. De aquifers uit de Rotliegendegroep, Triasgroep en Rijnlandgroep bevinden zich veelal dieper dan 1000 meter.



Figuur 15 Temperatuurverdeling in de Nederlandse ondergrond op 1000m diepte. De zwarte punten zijn putten met temperatuurmetingen (Bonté et al., 2012)

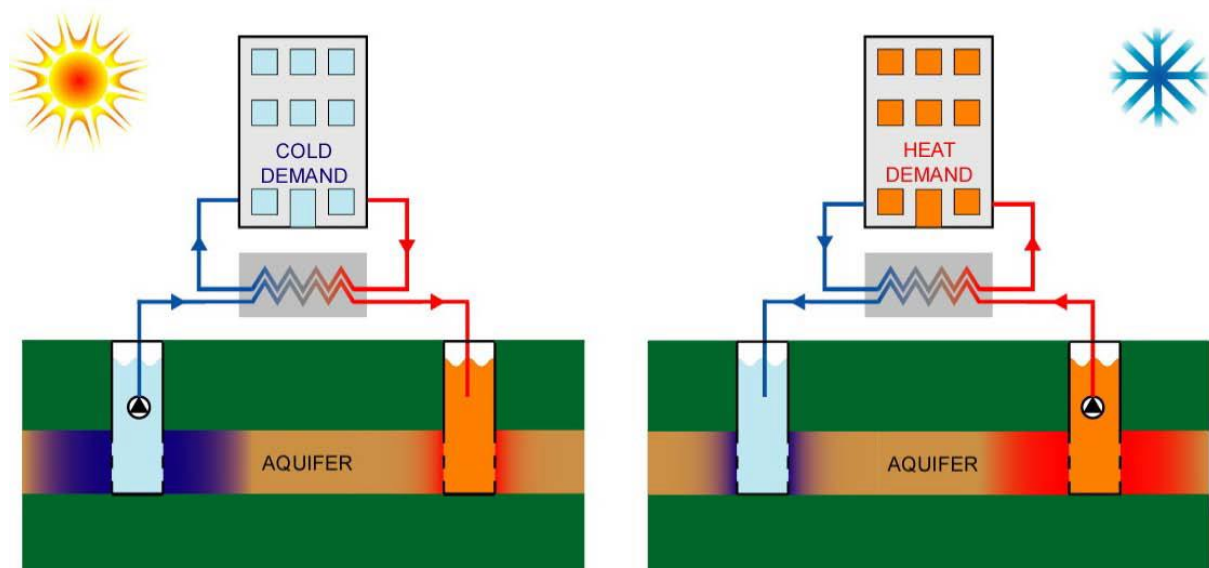


Figuur 16 Schematische weergave van de drie geothermiesystemen

Op de volgende pagina's worden de drie geothermiesystemen verder toegelicht om de verschillen tussen de geothermiesystemen verder te duiden. Hierbij wordt aandacht besteed aan de winningstechniek, de diepte en de potentiële aquifers die geschikt zijn voor het type geothermie.

4.1.1 WKO

Er is een belangrijk verschil tussen warmte- en koudeopslag (WKO) en andere vormen van geothermie. Geothermie maakt gebruik van de warmte uit de diepe ondergrond, WKO maakt alleen gebruik van de isolerende werking van de ondergrond. WKO systemen gebruiken de ondergrond voor seizoensopslag van warmte en koude (Broersma et al., 2011). WKO bronnen komen in Nederland voor tot een diepte van ongeveer 200m (Oomes, 2012). In dit onderzoek wordt voor WKO een diepte van 50 tot 250m aangehouden. Net als ondiepe- en diepe geothermie, maakt ook WKO gebruik van aquifers die zijn ingesloten door andere grondlagen die geen water doorlaten, zoals kleilagen. Vanwege hun ondiepe ligging zijn bij WKO systemen de aquifers watervoerende zandlagen, terwijl bij diepere vormen van geothermie de aquifers meer zandgesteentes zijn (Broersma et al., 2011). In Nederland maken WKO systemen gebruik van aquifers uit de Noordzeegroep tot een diepte van 200m, zoals de formatie van Oosterhout. Het water in de aquifers heeft op deze diepte een temperatuur van ongeveer 12°C (Maas, 2013).



Figuur 17 Schematische weergave van een WKO systeem (Broersma et al., 2011)

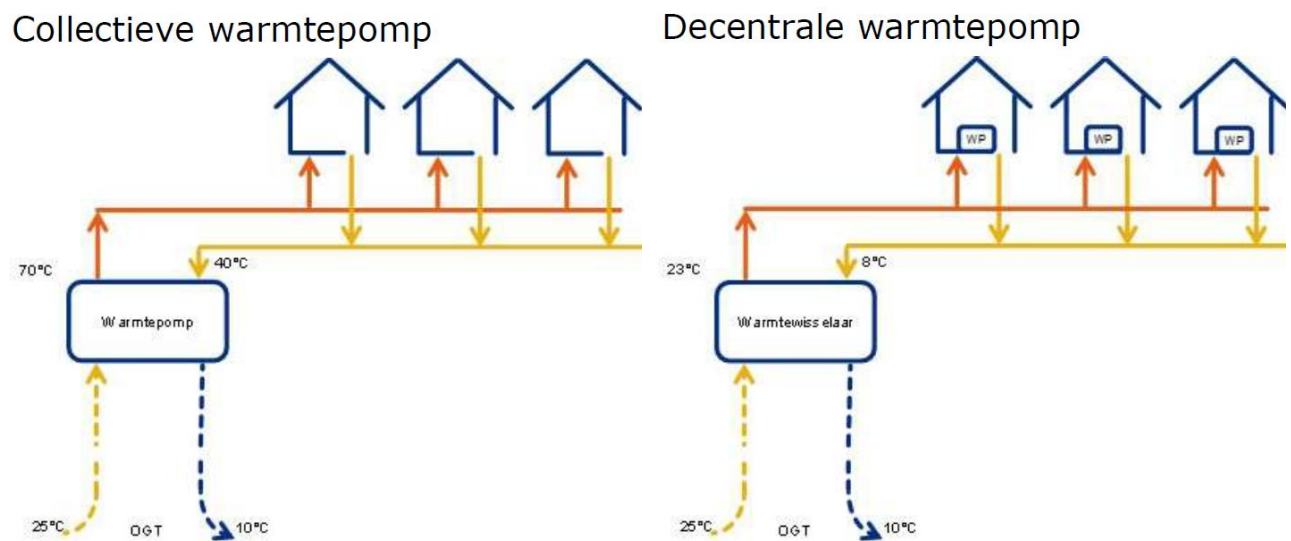
WKO systemen werken met twee bronnen en een warmtepomp. De koude bron wordt in de zomer gebruikt om gebouwen te koelen. Na het koelen is het water opgewarmd en wordt het met een temperatuur van ongeveer 16-20°C op een andere plaats in de aquifer teruggepompt via de warme bron, die zich op ongeveer 100 meter afstand van de koude bron bevindt (Bouwmeester, 2013). Het water mag wettelijk maximaal met een temperatuur van 25°C worden teruggepompt in de warme bron (De Taskforce WKO, 2009). In de winter heeft het water in de warme bron nog een temperatuur van ongeveer 16°C. Dit water wordt in de winter uit de warme bron omhoog gepompt en via een warmtepomp wordt de warmte aan het water onttrokken voor de verwarming van gebouwen. De warmtepomp koelt het water af tot een temperatuur van ongeveer 6°C, waarna het water via de koude bron weer wordt teruggepompt in de aquifer. Het water in de koude bron heeft in de zomer nog een temperatuur van ongeveer 8°C, waardoor het weer kan worden gebruikt om gebouwen te koelen (Maas, 2013). Er zijn in Nederland inmiddels ongeveer 1000 WKO systemen gerealiseerd. De thermische vermogens van WKO systemen kunnen sterk variëren, gemiddeld ongeveer 150 kW (Bouwmeester, 2013).

De hierboven beschreven WKO systemen worden ook wel open WKO systemen genoemd. Naast open WKO systemen bestaan er ook gesloten WKO systemen, die eveneens de bodem gebruiken voor de opslag van warmte en koude. Bij deze gesloten systemen wordt er echter een warmtegeleidende vloeistof (bijvoorbeeld glycol) door buizen in de bodem rondgepompt in plaats van het water uit de aquifer rond te pompen. Gesloten systemen kunnen zowel met horizontale als verticale buizenstelsel in de bodem worden aangebracht, op een diepte tussen de 20 en 150m. In Nederland zijn ongeveer 22.600 gesloten systemen gerealiseerd. De vermogens van de gesloten systemen variëren tussen de 4 en 10kW (Broersma et al., 2011). In Nederland wordt een voorkeur gegeven aan open WKO systemen, omdat gesloten systemen kunnen gaan lekken en de ondergrond meer verstoren vanwege het grote aantal benodigde boringen (Broersma et al., 2011). Buiten Nederland worden wel vooral gesloten WKO systemen toegepast, met name in Zweden en Oostenrijk. Met behulp van regels aan de locatie en kwaliteit van boringen en de gebruikte vloeistof wordt hier de grondwaterkwaliteit gewaarborgd (De Taskforce WKO, 2009). In dit onderzoek wordt verder alleen aandacht besteed aan open WKO systemen.

In plaats van WKO systemen kunnen er ook zogenaamde lagetemperatuur opslagsystemen (LTO) en middelhogetemperatuur opslagsystemen (MTO) worden toegepast in de ondiepe ondergrond. LTO en MTO systemen werken alleen voor de opslag en levering van warmte en leveren geen koude. Beide systemen maken net als WKO gebruik van aquifers uit de Noordzeegroep, zoals de formatie van Oosterhout. LTO systemen werken met temperaturen tussen de 8 en 25°C en MTO systemen met iets hogere opslagtemperaturen tussen de 25 en 50°C. LTO en MTO systemen hebben een vergelijkbaar vermogen als WKO systemen (Beek et al., 2014). LTO en MTO warmteopslagsystemen worden in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten.

4.1.2 Ondiepe geothermie

Ondiepe geothermiebronnen halen warmte uit ondiepe aquifers, op een diepte tussen de 250 en 1000m. Voor ondiepe geothermieprojecten in Nederland kunnen de aquifers uit de Noordzeegroep als meest potentiële aquifers worden gezien. Deze aquifers bevinden zich op een diepte tot ongeveer 1000m en ze zijn in grote delen van het land aanwezig in de ondergrond (Wong et al., 2007). Naast de in tabel genoemde Formatie van Breda en het Brussel zand, zijn er ook andere ondiepe aquifers uit de Noordzeegroep mogelijk geschikt voor ondiepe geothermie. Hellebrand et al. (2012) noemen in hun onderzoek naar ondiepe geothermie 8 aquifers, waarvan er 4 over grote delen van Nederland mogelijk geschikt zijn voor ondiepe geothermie. Dit zijn naast het Brussel zand en de formatie van Breda de formatie van Oosterhout en de formatie van Maassluis. Het water in deze aquifers heeft op een diepte tussen de 250 en 1000m een temperatuur van ongeveer 15 tot 40°C (Hellebrand et al., 2012).



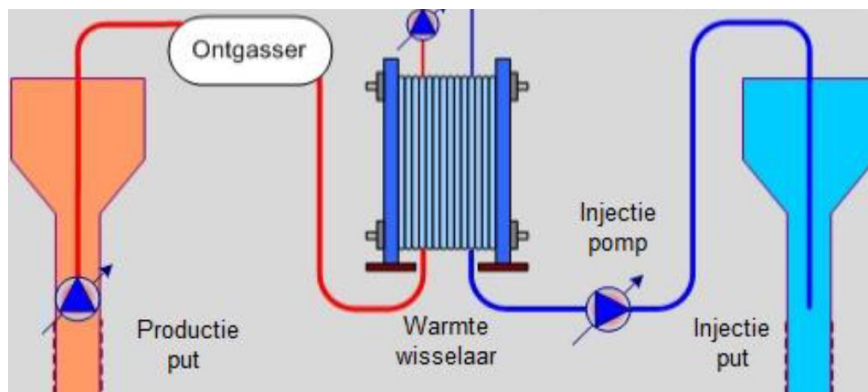
Figuur 18 Schematisch overzicht van een ondiep geothermiesysteem (Willemsen, 2017)

Ondiepe geothermiesystemen werken met twee putten en eventueel een warmtepomp. De twee putten samen worden ook wel een doublet genoemd. Met de productieput wordt warm bronwater uit de aquifer omhoog gepompt. Bovengronds wordt de warmte overgedragen aan een warmtenet voor lage temperatuur verwarming. Eventueel kan de warmte met behulp van een warmtepomp worden opgewaardeerd naar hogere temperaturen. Het afgekoelde bronwater wordt via een retourput teruggepompt in de aquifer (Hellebrand et al., 2012). Deze retourput bevindt zich ondergronds op een paar honderd meter afstand van de productieput om interferentie te voorkomen (Hellebrand et al., 2012). Hellebrand et al. (2012) stellen dat er in Nederland al veel ervaring is opgedaan met WKO systemen en diepe geothermie, maar dat er nog bijna geen ervaring is met ondiepe geothermie. In Nederland zijn wel enkele ondiepe geothermieputten geboord voor balneologische toepassingen in kuuroorden (Wong et al., 2007). Daarnaast is er één ondiep geothermiedoublet gerealiseerd in Zevenbergen (NLOG, 2018). Een ondiep geothermie doublet kan een thermisch vermogen leveren van ongeveer 1MW, zonder warmtepomp. De energiebesparing bij ondiepe geothermie is vergelijkbaar met WKO, maar door de hogere temperatuur kunnen hogere vermogens worden geleverd en kan de warmtepomp efficiënter werken (Hellebrand et al., 2012).

De aquifers uit de Noordzeegroep op een diepte van 250 tot 1000m kunnen naast ondiepe geothermie ook worden gebruikt voor hogetemperatuuropslag (HTO). HTO systemen werken voor de opslag en levering van warmte, bijvoorbeeld restwarmte uit de industrie. HTO systemen werken met opslagtemperaturen tussen de 60 en 90°C en hebben een vermogen van ongeveer 5 MW. Er zijn een aantal HTO systemen gerealiseerd in Nederland (Beek et al., 2014). HTO warmteopslagsystemen worden in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten.

4.1.3 Diepe geothermie

Diepe geothermiesystemen onttrekken warmte aan aquifers die zich dieper dan 1000m in de ondergrond bevinden. Potentiële aquifers bevinden zich met name in de Rotliegendegroepen, de Onder Triasgroep en de Rijnlandgroep. Zoals te zien in tabel 1 kunnen deze aquifers zich in grote delen van Nederland in de diepe ondergrond bevinden. In totaal is er in Nederland ongeveer 90.000 PJ aan potentiële energie aanwezig in deze diepe aquifers. Het deel van deze energie dat praktisch met diepe geothermiesystemen gewonnen kan worden is echter zeer afhankelijk van locatie specifieke reservoir eigenschappen (Wong et al., 2007). Er zijn inmiddels ook twee diepe geothermiesystemen in Limburg gerealiseerd die permeabele zones en breuken in de Kolenkalkgroep gebruiken als aquifer (VITO, 2012). De grondlagen uit de Kolenkalkgroep zijn nog ouder dan de Rotliegendegroep en zijn onderdeel van de grijze onderlaag van de doorsnedes in figuur 9. Bij diepe geothermie is de temperatuur van het bronwater uit de aquifers sterk afhankelijk van de diepte waarop de aquifer zich bevindt. Zoals te zien in figuur 9 varieert de diepteligging van de aquifers sterk per regio en daarnaast zijn er regio's met een warmere ondergrond, zoals is weergegeven in figuur 15. Bij benadering kan het bronwater bij diepe geothermie een temperatuur hebben tussen de 40 en 160°C. Hierbij is uitgegaan van een temperatuurgradiënt van 3°C per 100m diepte en een temperatuur aan het maaiveld van 10°C (Wong et al., 2007). De diepte van de aquifers wordt op basis van tabel 1 geschat op 1000 tot 5000m diepte.



Figuur 19 Schematische weergave diep geothermiesysteem (Gonzalez, 2012)

Diepe geothermiesystemen werken net als ondiepe geothermiesystemen met twee putten, ook wel een doublet genoemd. Met de productieput wordt warm bronwater uit de aquifer omhoog gepompt. Afhankelijk van de aquifer, kan in dit warme bronwater ook een kleine hoeveelheid gas en/of olie opgelost zijn. In bijna alle in Nederland geboorde diepe geothermieputten is naast water ook gas aangetroffen en in een enkel geval ook olie (Kas als Energiebron, 2014a). Voordat de warmte aan het bronwater kan worden onttrokken, wordt het gas of de olie uit het water gehaald middels een ontgasser. De gasbijvangst kan worden verbrand in een gasketel of in een WKK. Nadat bovengronds de warmte is overgedragen aan een warmtenet, wordt het afgekoelde bronwater teruggepompt in de aquifer met een retourput. De retourput bevindt zich ondergronds op ongeveer 1000 tot 2000m afstand van de productieput (Schoof, 2014). Het warme water in het warmtenet kan worden gebruikt voor verwarming of eventueel naar hogere temperaturen worden opgewaardeerd met een warmtepomp. Dit is afhankelijk van de temperatuur van het bronwater en de warmtegebruiker (Broersma et al., 2011).

In Nederland zijn inmiddels 15 diepe geothermiesystemen gerealiseerd die allemaal warmte leveren aan de glastuinbouw en in een enkel geval ook aan gebouwen (I&W & EZ&K, 2018). In Europa zijn diepe geothermiesystemen aanwezig in o.a. België, Frankrijk, Duitsland, Oostenrijk en Hongarije. De meeste geothermieputten hebben aquifers met een hoge temperatuur boven de 70°C, een goede permeabiliteit (>300 mD) en een dikte van meer dan 30 meter (Wong et al., 2007). Diepe geothermiesystemen in Nederland kunnen een vermogen hebben van ongeveer 10 tot 20MW (Lako et al., 2013).

Naast open diepe geothermieputten bestaan er ook gesloten diepe geothermieputten. Deze gesloten putten worden ook wel Deep Borehole Heat Exchangers (DBHE) genoemd, omdat zij fungeren als bodemwarmtewisselaar. DBHEs bestaan uit een diepe geothermieput die onderin is afgesloten en is voorzien van een extra productiebuis die in de put hangt. Koud water loopt langs de wand van de geothermieput, wordt op en stroomt via de productiebuis omhoog. Er zijn een aantal DBHEs in Duitsland en Zwitserland. Het vermogen ligt meestal tussen de 300 en 500kW (Wong et al., 2007). In Nederland kunnen uit gebruik geraakte gasputten mogelijk worden hergebruikt als DBHE (Visser et al., 2015). In dit onderzoek wordt verder geen aandacht besteed aan DBHEs.

4.2 Exergie

In paragraaf 2.1 is al behandeld dat warmte t.o.v. andere vormen van (duurzame) energie een lage exergie heeft, maar dat de exergiefactor afhangt van de temperatuur. Een hogere temperatuur betekent ook een hogere exergiefactor. De verschillende vormen van geothermie werken met verschillende temperaturen en dus verschillende exergiefactoren. Diepe geothermiesystemen hebben een hoger temperatuurinterval en leveren daarmee warmte met een hogere exergie dan WKO en ondiepe geothermiesystemen. Daarnaast heeft de gasbijkvangst in diepe geothermiesystemen een hogere exergie, die voor hoog-exergetische processen kan worden gebruikt. De productietemperatuur van geothermiesystemen kan worden verhoogd met behulp van warmtepompen. Hierbij moet worden vermeld dat warmtepompen ook elektrische energie, met een hoge exergie, nodig hebben. De verhouding tussen de benodigde elektrische energie en de geproduceerde warmte kan worden uitgedrukt in de COP (coëfficiënt of performance). Geothermiesystemen zonder warmtepomp hebben minder elektrische energie nodig en hebben dus een hogere COP. Dit is ook weergegeven in tabel 2.

Hieronder worden voor de drie verschillende vormen van geothermie enkele voorbeelden genoemd van processen die door het betreffende geothermiesysteem van warmte kunnen worden voorzien. Dit is afhankelijk van het temperatuur interval van de warmte uit het geothermiesysteem.

4.2.1 WKO

Zoals weergegeven in paragraaf 4.1 werken WKO systemen met lagere temperaturen dan andere vormen van geothermie, vanwege hun functie en ondiepe ligging. In dit onderzoek wordt voor WKO systemen een temperatuurinterval aangehouden van minimaal 8°C voor koeling en maximaal 25°C voor verwarming. In de praktijk werken de meeste WKO systemen op temperaturen onder de 25°C, maar in dit onderzoek wordt van het wettelijke maximum van 25°C uitgegaan.

Voor de verwarming van de gebouwde omgeving wordt onderscheid gemaakt tussen LTV (lage temperatuur verwarming) en HTV (hoge temperatuur verwarming). De meeste traditionele woningen hebben HTV, waarbij het verwarmingssysteem een maximale aanvoertemperatuur heeft van 90°C. LTV is meer van toepassing op nieuwbouwwoningen, deze woningen worden met een aanvoertemperatuur tussen de 40°C en 55°C verwarmd. Er bestaan daarnaast ook warmtenetwerken met een aanvoertemperatuur onder de 40°C, waarbij de warmte voor gebruik moet worden opgewaardeerd door bijvoorbeeld een warmtepomp.

Warmtenetwerken met dergelijke temperaturen worden ook wel bronnetten genoemd (Vliet et al., 2016). Ongeacht het type verwarming hebben woningen altijd een warmwater voorziening met een aanvoer van 58°C nodig voor warm tapwater (o.a. kraanwater, douchen). Warm tapwater heeft een minimale temperatuur van 58°C om legionella besmetting te voorkomen (Valk et al., 2018).

WKO kan warmte leveren aan de utiliteitsbouw (kantoren, scholen, ziekenhuizen). In de meeste gevallen brengt een warmtepomp het warme water uit de WKO hiervoor naar een gewenste temperatuur van 50-60°C. Het warme water kan dan worden ingezet voor LTV met een temperatuur van 50-40°C of lager.

Nieuwbouwpanden kunnen voor LTV ontworpen zijn. Voor bestaande utiliteitsgebouwen is mogelijk renovatie nodig om de gebouwen beter te isoleren en te verwarmen met bijvoorbeeld vloerverwarming of convectoren (RVO, 2018). Utiliteitsgebouwen zijn bij uitstek geschikt voor WKO systemen, omdat zij naast warmte ook een koude vraag hebben. WKO systemen kunnen zowel voorzien in de vraag naar laagwaardige warmte als koude (Hellebrand et al., 2012).

Bij nieuwbouwwoningen die na 2000 gebouwd zijn kunnen WKO bronnen met een warmtepomp worden ingezet voor LTV. Voor nieuwbouwwoningen die gebouwd zijn na 2000 kan verondersteld worden dat zij met een temperatuur interval van 50-40°C kunnen worden verwarmd. Ten opzichte van de traditionele woningen hebben deze nieuwbouwwoningen namelijk een sterk verbeterde gebouwschil (Harmsen et al., 2009). Ook worden zij veelal verwarmd met vloer- en wandverwarming in plaats van centrale verwarming (Broersma et al., 2011).

Woningen die gebouwd zijn voor 2000, kunnen vaak alleen met HTV worden verwarmd. Dit is o.a. afhankelijk van het bouwjaar, het energielabel, het warmteafgifte systeem en de mate van isolatie. Er bestaan ook hoge temperatuur warmtepompen die tot 70-80°C kunnen leveren, waardoor ook deze gebouwen met een WKO bron kunnen worden verwarmd en warm tapwater kan worden geleverd. De hogere temperatuur gaat wel ten koste van het energierendement van de warmtepomp (RVO, 2018).

Woningen die gebouwd zijn voor 2000 kunnen ook worden verwarmd met LTV, maar dit vereist wel een grootschalige ingreep aan de gebouwschil om de woning beter te isoleren. Wanneer dit niet gebeurt kunnen de energiekosten onevenredig hoog oplopen en kan het wooncomfort afnemen door tocht en te traag opwarmen (Valk et al., 2018). Woningen die gebouwd zijn vóór 1975 werden nagenoeg niet geïsoleerd. Na 1975 werden nieuwbouwwoningen steeds vaker standaard voorzien van isolatie. Woningen die na 1990 zijn gebouwd, zijn standaard voorzien van isolatie en hebben vaak energielabel D of groener (Demir, 2013). Vliet et al. (2016) maken onderscheid tussen drie niveaus van isolatie. Een woning met een laag isolatieniveau heeft geen dak-, vloer- of gevelisolatie, wel dubbel glas en energielabel E. Een woning met een middelgrote isolatie heeft wel vloer-, dak- en gevelisolatie en energielabel B. Een hoge isolatiegraad gaat gepaard met na-isolatie van dak, vloer en gevel en correspondeert met energielabel A+. Volgens Vliet et al. (2016) is een hoge isolatiegraad een vereiste om woningen te kunnen verwarmen met LTV in plaats van HTV. LTV heeft namelijk een lagere warmte-afgiftecapaciteit dan HTV, daarom is een beperking van het warmteverlies in woningen noodzakelijk. Daarnaast moeten er andere warmteafgifte-systemen worden toegepast, zoals radiators met ventilatoren, LT-radiators en vloerverwarming (Vliet et al., 2016).

4.2.2 Ondiepe geothermie

Zoals beschreven in paragraaf 4.1 hebben ondiepe geothermiesystemen een productie temperatuur van ongeveer 15 tot 35°C.

Het warme water bij ondiepe geothermiesystemen kan worden gebruikt voor de verwarming van tuinbouwkassen. De temperatuur van het water in het warmtenet kan door middel van een warmtepomp worden opgewaardeerd naar 45°C om een kas te verwarmen. Indien een kas is voorzien van energiebesparende maatregelen volgens Het Nieuwe Telen kan een kas ook worden verwarmd met een temperatuur van 35°C (Hellebrand et al., 2012). Naast glastuinbouw kan het warme water op een temperatuur van 12 tot 35°C ook worden ingezet voor aquacultuur (Van Nguyen et al., 2015).

Ook bij ondiepe geothermie kunnen warmtepompen worden ingezet om de temperatuur van het water op te waarden naar bijvoorbeeld 50-40°C voor lage temperatuurverwarming van utiliteitsgebouwen en nieuwbouwwoningen. Daarnaast kunnen ook hoge temperatuur warmtepompen met een lager energierendement worden ingezet voor HTV op een temperatuur van 70-80°C. Over het algemeen zullen ondiepe geothermiesystemen een hoger energierendement hebben dan WKO systemen. Dit komt doordat de aanvoertemperatuur bij ondiepe geothermie hoger is, waardoor de warmtepomp een hogere COP kan hebben (Hellebrand et al., 2012).

Warm water uit ondiepe geothermieputten kan ook worden gebruikt voor het verwarmen van zwembaden vanaf een temperatuur van ongeveer 30°C (Dreesen & Laenen, 2010) of voor balneologische toepassingen (Wong et al., 2007).

4.2.3 Diepe Geothermie

In paragraaf 4.1 is te zien dat de productietemperatuur bij diepe geothermie een grote variatie kent en wordt beschreven waarom dit zo is. In dit onderzoek wordt een temperatuur interval van 40 tot 160°C aangehouden.

Diepe geothermiesystemen kunnen, afhankelijk van de diepte van de aquifer, een dusdanig hoge temperatuur leveren dat de productie van elektriciteit mogelijk is. Vanaf ongeveer 75°C wordt het mogelijk om elektriciteit te produceren met binary cycles en vanaf ongeveer 140°C kan dit met conventionele stoomturbines (GNS, 2018). Daarnaast kan de gasbijvangst vanuit het diepe geothermiesysteem worden verbrand in een warmtekrachtkoppeling (WKK) voor de productie van elektriciteit en warmte (Schoof, 2014).

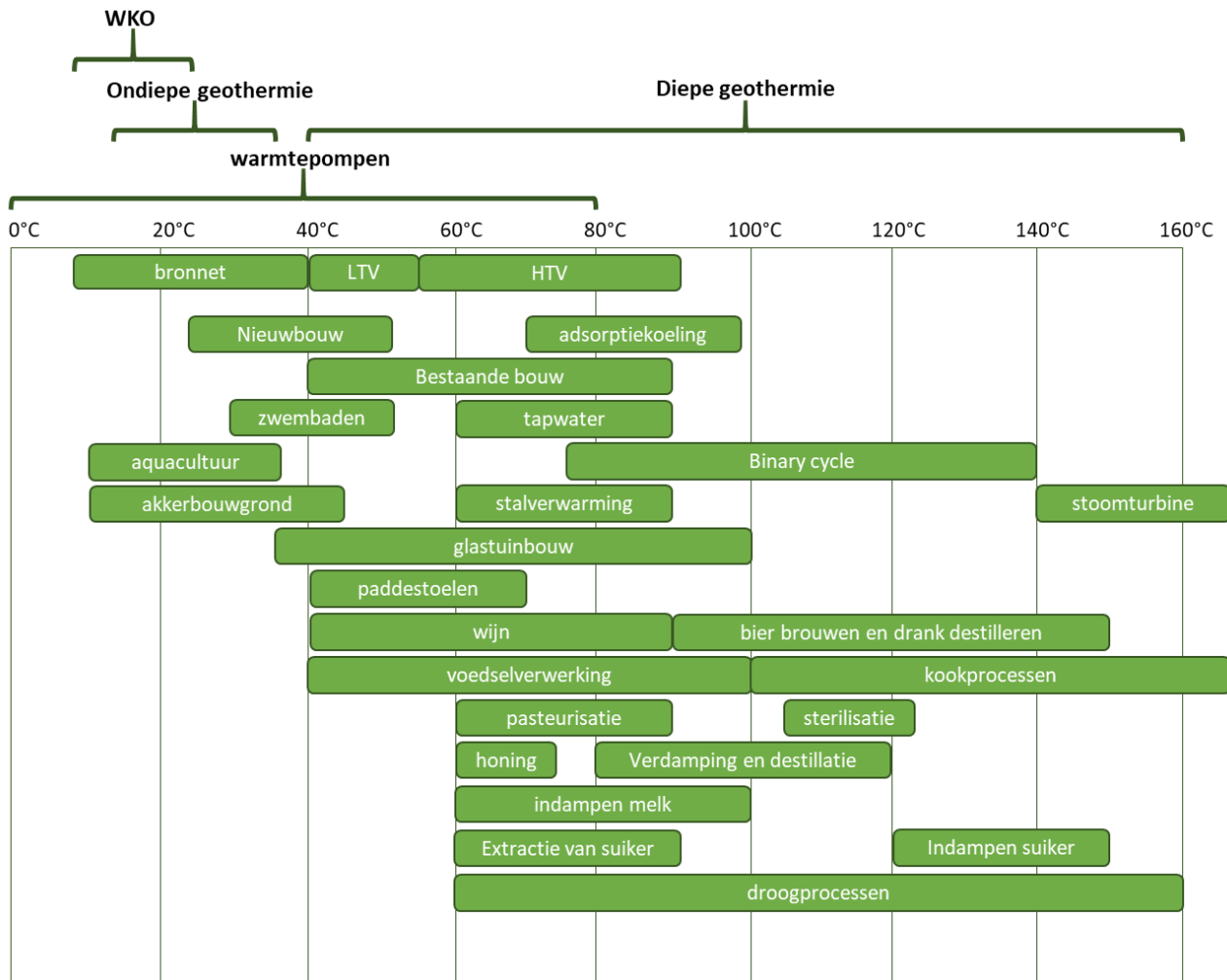
Diepe geothermie kan warmte leveren aan bestaande woningbouw en utiliteitsbouw, gebouwd voor 2000. Zoals reeds beschreven in subparagraaf 4.2.1, wordt de bestaande woningvoorraad in Nederland traditioneel met een afgifte temperatuur van 90-70°C verwarmd (HTV). Door een betere gebouwschil, betere isolatie en dubbel glas worden tegenwoordig veel bestaande woningen met lagere temperaturen verwarmd (LTV). Een groot deel van de bestaande woningbouw heeft echter nog steeds een afgiftemtemperatuur van 90-70°C of 70-50°C nodig (Harmsen, 2009). Voor de bestaande woningbouw wordt daarom een temperatuur interval van 50-90°C aangehouden. De bestaande woningbouw wordt veelal nog verwarmd met een centrale verwarming (Broersma et al., 2011). Ook voor de bestaande utiliteitsbouw wordt een temperatuurinterval van 50-90°C aangehouden.

Naast verwarming van gebouwen kan warmte uit diepe geothermiesystemen ook gebruikt worden voor de levering van warm tapwater. Warm tapwater heeft een minimale temperatuur van 58°C om legionella besmetting te voorkomen (Valk et al., 2018). Ook kan warm water vanaf een temperatuur van ongeveer 70°C ingezet worden voor het koelen van gebouwen in de zomer middels adsorptiekoeling (Dreesen & Laenen, 2010).

Aangezien potentiële locaties voor diepe geothermiesystemen meer locatie afhankelijk zijn dan WKO en ondiepe geothermiesystemen, is de kans groot dat veel geschikte locaties zich niet in bebouwd gebied bevinden, maar in landelijk gebied. Hier wordt verder op in gegaan in paragraaf 4.3. Ook in het landelijk gebied zijn echter veel landbouw processen te vinden die grote hoeveelheden warmte vereisen. Zo kan worden gedacht aan de verwarming van stallen voor varkens, kippen of andere veeteelt. Stalverwarming is mogelijk vanaf een temperatuur van ongeveer 60°C (Dreesen & Laenen, 2010). Van Nguyen et al. (2015) noemen een aantal landbouwprocessen die door diepe geothermie van warmte kunnen worden voorzien, waaronder het verwarmen van kassen in de glastuinbouw (40-100°C), de kweek van paddenstoelen (40-70°C), het maken van wijn uit fruit (40-90°C), het smelten van wax voor honing 60-70°C en het verwarmen van akkerbouw grond voor bijvoorbeeld de teelt van asperges (10-45°C). Daarnaast vereist ook de verwerking van voedsel grote hoeveelheden warmte op een temperatuur van 40 tot 100°C.

Naast landbouwprocessen zijn er ook veel industriële processen denkbaar die warmte nodig hebben. Van Nguyen et al. (2015) noemen onder andere processen voor pasteurisatie (60-90°C), verdamping en destillatie (80-120°C). Warmte met temperaturen boven de 100°C is geschikt voor kookprocessen. Voor sterilisatie zijn hogere temperaturen vereist (105-120°C). Voorbeelden van industriële processen zijn: de pasteurisatie in melkfabrieken (60-90°C), het indampen van melk in melkfabrieken (60-100°C), het condenseren van wei (resterende vloeistof bij kaasbereiding) (65-90°C), de extractie van suikerbieten in suikerfabrieken (60-90°C), het indampen van suiker in suikerfabrieken (120-150°C), het brouwen van bier en het destilleren van drank (90-150°C). Daarnaast zijn er veel droogprocessen denkbaar, bijvoorbeeld het drogen van vlees in de vleesindustrie (100-120°C), het drogen van fruit en groentes (60-95°C), graan en vis (80-100°C) of hogere temperaturen voor droogprocessen in de houtindustrie (140-160°C).

Alle warmteconsumenten en processen die in de voorgaande subparagrafen zijn besproken, zijn samengevat in het overzicht in figuur 20. In dit overzicht wordt weergegeven wat de aanvoertemperaturen zijn van de drie soorten geothermie inclusief het temperatuurbereik van warmtepompen en welke processen en warmteconsumenten hierbij aansluiten.



Figuur 20 Overzicht met temperatuurintervallen van geothermiesystemen en processen

4.3 Ruimte

Voor de energietransitie is ruimte en met name de regionale schaal van belang. Dit is enerzijds omdat duurzame vormen van energie, zoals geothermie, meer gebonden zijn aan specifieke locaties dan fossiele energie. Anderzijds ligt er vanuit het exergieprincipe een focus op het efficiënt en effectief omgaan met warmte, door producenten en consumenten van warmte te verbinden middels warmtenetwerken. Dit duidt op een wisselwerking tussen energie en de ruimtelijke functionele structuur op een regionale schaal (Van Kann, 2015). Daarnaast hebben duurzame energievormen zoals warmte over het algemeen een lagere energiedichtheid dan fossiele energie, waardoor er beperkingen zijn aan de schaalgrootte waarop transport kan plaatsvinden (Stremke, 2010).

In deze paragraaf wordt verder ingegaan op de ruimtelijke eigenschappen van geothermiesystemen. Zoals beschreven in Paragraaf 2.2 zijn hierbij twee variabelen van belang: het ruimtebeslag van de systemen en de locatiegebondenheid (Van Kann, 2015). Het ruimtebeslag kan zowel de schaalgrootte van het systeem zijn als het oppervlak dat wordt beïnvloed of wordt opgeëist. Bij geothermiesystemen kan dit zowel een oppervlak in de bovengrond betreffen als in de ondergrond. De locatiegebondenheid heeft betrekking op het centrale of juist decentrale karakter van het geothermiesysteem. Een centraal systeem is gebonden aan één specifieke plek en is met behulp van een netwerk verbonden met consumenten. Een decentraal systeem is minder afhankelijk van een specifieke plek en kan lokaal worden toegepast, dicht bij de consument (Van Kann, 2015).

4.3.1 Ruimtebeslag

De installatie die voor geothermiesystemen benodigd is vereist bovengronds weinig ruimte (Van Kann, 2015). Bij geothermiesystemen is er met name sprake van een ondergronds ruimtebeslag en een benodigd bovengronds oppervlak voor de aanleg van een warmtenet.

WKO systemen hebben bovengronds weinig ruimte nodig en kunnen in de gebouwde omgeving worden toegepast. Ondiepe en diepe geothermiesystemen hebben wel een groter terrein nodig voor de opstelling van de boorinstallatie en een gebouw met installaties. Daarnaast is er bij diepe geothermiesystemen en mogelijk ondiepe geothermiesystemen sprake van een veiligheidscontour rondom de geothermieputten, door de mogelijke aanwezigheid van gas en de kans op een blow-out. Meestal valt de veiligheidscontour binnen de hekwerken van het terrein (Schoof, 2014). In ieder geval moet er voldoende afstand worden gehouden tot de gebouwen waar mensen wonen en werken. Het terrein voor diepe geothermiesystemen neemt ongeveer 30 bij 40 meter in beslag (Van den Bosch et al., 2013).

De schaalgrootte van het warmtenet verschilt per geothermiesysteem. Het is afhankelijk van het warmteaanbod, de warmtevraag en de hoeveelheid warmte consumenten. Zo kan een diep geothermiesysteem rechtstreeks warmte leveren aan één grote fabriek en kan een WKO systeem meerdere huizen en gebouwen van warmte en koude voorzien. Over het algemeen moet er bij de toepassing van diepe geothermiesystemen in de bebouwde omgeving echter rekening mee worden gehouden dat grote warmtenetten nodig zijn. Dit komt doordat diepe geothermiesystemen een groter warmteaanbod hebben en daardoor een groter aantal warmte consumenten nodig hebben dan ondiepe geothermie of WKO. Diepe geothermiesystemen kunnen warmte leveren aan een grote wijk (ca. 2000 woningen), ondiepe geothermiesystemen zijn geschikt voor een kleine wijk (ca. 500 woningen) en WKO systemen leveren warmte en koude op straatniveau (ca. 100 woningen) (Willemsen, 2017). Daarnaast heeft warmte uit diepe geothermiesystemen ook een grotere energie-inhoud door de hogere temperatuur. Energiedragers met een grotere energie-inhoud kunnen efficiënter over grotere afstanden worden getransporteerd (Van Kann, 2015).

Met betrekking tot het ondergrondse ruimtebeslag van de drie geothermiesystemen zijn in tabel 2 enkele eigenschappen globaal samengevat om een indicatie te krijgen van het energie rendement (COP), de warmteproductie (vermogen) en het beïnvloedingsgebied (oppervlak) in de ondergrond. De genoemde waarden zijn globale aannames en kunnen niet voor een locatie specifieke situatie worden overgenomen. In werkelijkheid verschilt zowel de COP als het vermogen en het oppervlak sterk per geothermiesysteem en is het afhankelijk van de specifieke geologische situatie. In tabel 2 is te zien dat het absolute ruimtegebruik naargelang de diepte toeneemt. Het ruimtegebruik van de verschillende geothermiesystemen is relatief gezien echter vergelijkbaar. Diepe geothermiesystemen hebben een groter oppervlak nodig, maar leveren ook grotere vermogens. Dit heeft er onder andere mee te maken dat bij diepe geothermiesystemen de afstand tussen

beide putten groter is. Daarnaast zijn bij WKO systemen de aquifers watervoerende zandlagen vanwege hun ondiepe ligging, terwijl bij diepere vormen van geothermie de aquifers meer zandgesteentes zijn (Broersma et al., 2011). Bij WKO systemen is het beïnvloedingsgebied afhankelijk van het oppervlak dat thermisch en hydraulisch wordt beïnvloed door de stroming van het bronwater in de aquifer (Bot & Zwamborn, 2013). Hierbij moet worden opgemerkt dat de aquifer wordt gebruikt voor opslag van warmte en koude en dat er netto geen warmte aan de aquifer wordt onttrokken. Bij diepe geothermiesystemen is het beïnvloedingsgebied afhankelijk van het verloop van temperatuur en druk in de ondergrond. Het bronwater rondom de retourput zal in temperatuur dalen door het terugpompen van afgekoeld water. Daarnaast zal rondom de retourput de druk in de ondergrond toenemen, door het terugpompen van bronwater, en zal rondom de productieput de druk afnemen, omdat er water wordt onttrokken. Over het algemeen is het oppervlak waar drukverschillen zullen optreden groter dan het oppervlak waar de temperatuur van het bronwater zal veranderen (Mijnlieff & Van Wees, 2009). De orde grootte van dit beïnvloedingsgebied is weergegeven in tabel 2.

Type	COP	Vermogen (thermisch)	Oppervlak
WKO	40 (en 4 voor de warmtepomp) ¹	Gem. 150 kW ³	1-5 ha ⁴
Ondiep	COP warmtepomp iets hoger dan WKO ¹	Gem. 1 MW ¹	Gem. 31 ha ¹
Diep	20 ²	5-20MW ²	200 ha ⁵

Tabel 2 een indicatie van het energie rendement (COP), de warmteproductie (vermogen) en het beïnvloedingsgebied (oppervlak) in de ondergrond voor de drie geothermiesystemen. Referenties: 1: (Hellebrand et al., 2012), 2: (Lako et al., 2013), 3: (Bouwmeester, 2013), 4: (Bot & Zwamborn, 2013a), 5: (Mijnlieff & Van Wees, 2009)

4.3.2 Locatiegebondenheid

De locatiegebondenheid heeft betrekking op het centrale of juist decentrale karakter van het geothermiesysteem. Een centraal systeem is gebonden aan één specifieke plek en is met behulp van een netwerk verbonden met consumenten. Een decentraal systeem is minder afhankelijk van een specifieke plek en kan lokaal worden toegepast, dichterbij de consument.

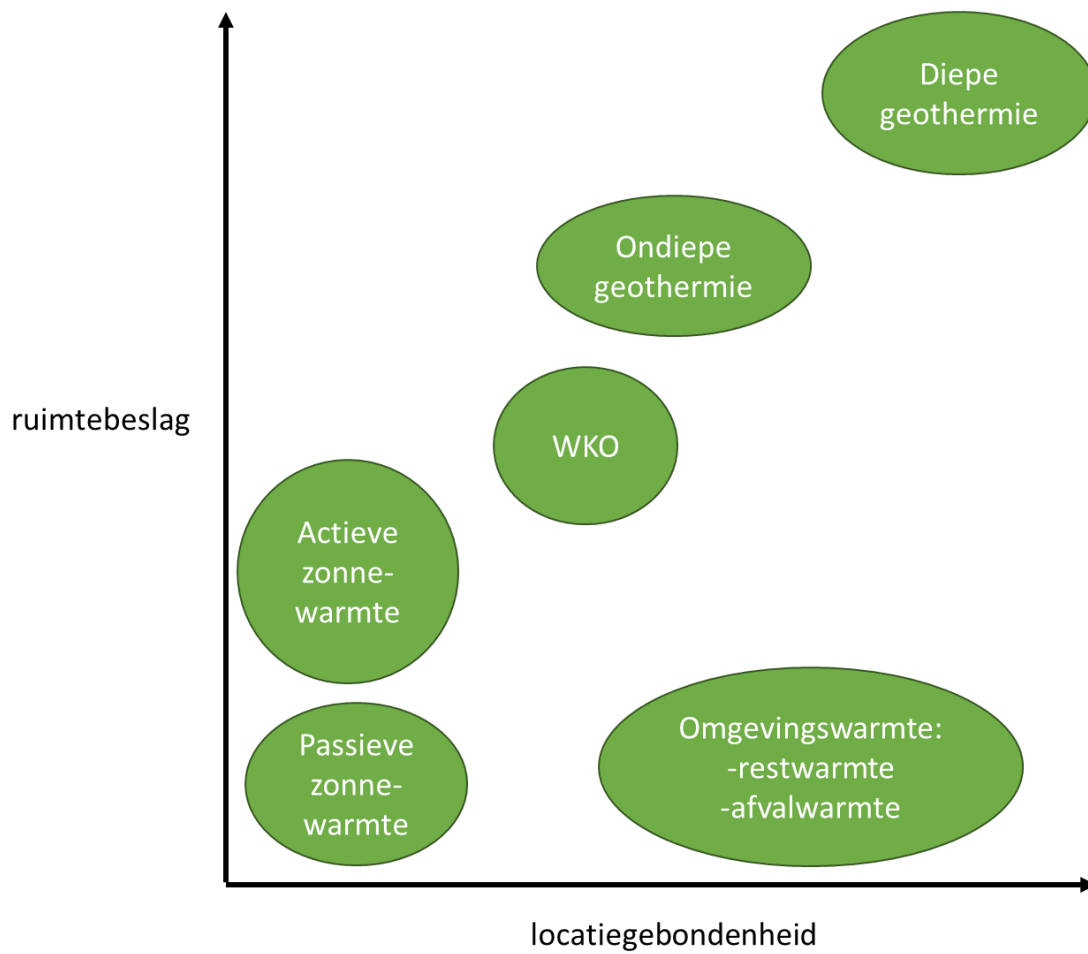
Geothermiesystemen zijn, in vergelijking met andere duurzame energiebronnen, systemen met een hoge locatiegebondenheid (Van Kann, 2015). Zowel WKO, ondiepe geothermie en diepe geothermie zijn over het algemeen centrale systemen die gebonden zijn aan één specifieke plek met een geschikte aquifer. Toch zitten er wel degelijk verschillen in de locatiegebondenheid van de verschillende geothermiesystemen. Zo zijn WKO en ondiepe geothermiesystemen in mindere mate locatie gebonden dan diepe geothermie, omdat zij gebruik maken van andere grondlagen. WKO en ondiepe geothermiesystemen maken namelijk gebruik van aquifers uit de Noordzeegroep, welke in grote delen van het land aanwezig zijn. Indien men WKO of ondiepe geothermiesystemen wil realiseren is het daarmee waarschijnlijker dat men een geschikte locatie nabij de warmte consument vindt.

Hellebrand et al. (2012) hebben kaarten opgesteld van enkele aquifers die zowel kunnen worden gebruikt door WKO als ondiepe geothermiesystemen. Hierop is te zien dat de aquifers vrijwel in heel Nederland in de ondergrond aanwezig zijn, maar dat de diepte verschilt. De aquifers hebben niet overal een geschikte diepte voor de toepassing van ondiepe geothermie. Ondiepe geothermiesystemen hebben mede daardoor een iets hogere locatiegebondenheid dan WKO systemen. Daarnaast neemt naargelang de diepte over het algemeen de porositeit en permeabiliteit van de ondergrond af. Hierdoor is de geschiktheid van diepere aquifers meer afhankelijk van locatie specifieke geologische eigenschappen (Wong et al., 2007). Dit is vooral van toepassing op diepe geothermiesystemen. Diepe geothermiesystemen zijn daarmee zeer locatie gebonden, aangezien de potentiële aquifers ook niet overal in de ondergrond aanwezig zijn. Dit kan per regio verschillen. Bij diepe geothermiesystemen is er dus een grotere kans dat er geen geschikte locaties in de regio zijn of op een grote afstand van de warmteconsument.

In tabel 1 is een grof beeld geschetst van de regio's waar de potentiële aquifers voor diepe geothermie zich in Nederland bevinden. Vanwege het grote diepte interval van diepe geothermie is er wel veel variatie in geschikte grondlagen. Het kan voorkomen dat grondlagen die niet geschikt lijken mogelijk in een lokale specifieke situatie wel geschikt zijn voor diepe geothermie. Zo zijn er twee diepe geothermiesystemen in Limburg gerealiseerd die permeabele zones en breuken in de Kolenkalkgroep gebruiken als aquifer (VITO, 2012).

De hierboven genoemde bevindingen over het ruimtebeslag en de locatiegebondenheid van de drie verschillende geothermiesystemen zijn schematisch weergegeven in figuur 21. Hierbij moet worden vermeld dat dit het fysieke ruimtebeslag en de geologische locatiegebondenheid betreft. Het ruimtebeslag kan ook vanuit een ander perspectief worden benaderd, bijvoorbeeld de mate waarin het geothermiesysteem ondergrondse ruimte opeist waar ook door andere functies aanspraak op kan worden gemaakt, zoals gaswinning, waterwinning en zoutwinning. Sommige aquifers worden al gebruikt voor veel andere activiteiten. Geothermiesystemen met aquifers die voor weinig andere functies worden gebruikt zullen minder ruimtelijke conflicten ondervinden. Hier wordt verder op ingegaan in Paragraaf 4.5.

Daarnaast is te zien in figuur 21 dat diepe geothermiesystemen een hoge geologische locatiegebondenheid hebben. Daarbij komt kijken dat diepe geothermiesystemen ook een groter warmteaanbod hebben dus in de nabijheid van grote warmteconsumenten moeten zitten. Daarmee zijn diepe geothermiesystemen afhankelijk van zowel een locatie met een geschikte geologie als een goede match met voldoende grote warmteconsumenten in de nabijheid van de locatie. De warmte uit diepe geothermiesystemen heeft vanwege de hogere temperatuur echter wel een grotere energie-inhoud, waardoor transport over grotere afstanden mogelijk is. Energiedragers met een grotere energie-inhoud kunnen namelijk efficiënter over grotere afstanden worden getransporteerd (Van Kann, 2015).



Figuur 21 Schematisch overzicht van de locatiegebondenheid en het ruimtebeslag van geothermiesystemen in vergelijking met andere duurzame warmtebronnen. Gebaseerd op bevindingen vanuit dit onderzoek en het onderzoek van Van Kann (2015).

4.4 Verbindingen

In de vorige paragraaf is aandacht besteed aan het ruimtegebruik en de locatiegebondenheid van geothermiesystemen. In deze paragraaf wordt uitleg gegeven over de aandachtspunten die van belang zijn wanneer geothermiesystemen worden verbonden met andere ruimtelijke functies en warmteconsumenten. Hierbij spelen zaken als afhankelijkheid en leveringszekerheid een rol. De mogelijkheden en beperkingen zijn afhankelijk van de schaalgrootte van het warmtenetwerk en met wat voor relatie het geothermiesysteem is verbonden met de warmteconsumenten.

Geothermie is in de ondergrond opgeslagen energie die direct kan worden ingezet wanneer er een energievraag is. Dit is een belangrijk voordeel ten opzichte van andere vormen van duurzame energie, zoals zon en wind, die ofwel gelijk moeten worden ingezet of met hoge verliezen kunnen worden opgeslagen. Daardoor kan geothermie concurreren met andere vormen van opgeslagen energie, zoals gas en biomassa (Gommans, 2010). Er zitten echter wel beperkingen aan de inzetbaarheid van geothermie. Het warmteaanbod vanuit één geothermiesysteem zal namelijk niet altijd perfect overeenkomen met de warmtevraag van één warmteconsument. Een one-to-one relatie, waarbij de warmteconsument volledig afhankelijk is van één warmtebron, is dan niet mogelijk. Bij verschillen tussen vraag en aanbod zijn namelijk conversietechnieken en opslagsystemen benodigd en hiervoor moeten afstanden worden overbrugd. Daardoor is het opschalen naar meerdere warmteconsumenten al gauw noodzakelijk. Dit heet ook wel een one-to-many relatie. Bij meerdere warmteconsumenten en warmtebronnen is er sprake van een many-to-many relatie (Van Kann, 2015).

Zoals behandeld in subparagraaf 4.2.1 is WKO vooral geschikt voor laagtemperatuur woning- en utiliteitsbouw, met zowel een warmte als een koude vraag (Hellebrand et al., 2012). Bij deze warmteconsumenten komt de warmte- en koudevraag goed overeen met het aanbod vanuit WKO systemen. Daarnaast kan de warmtepomp worden ingezet om te voorzien in pieken in de warmtevraag. WKO kan daarmee zowel een one-to-one relatie hebben met één warmteconsument als een one-to-many relatie met deze warmteconsumenten. Er is geen grote variatie aan warmteconsumenten die precies overeenkomen met het warmte- en koudeaanbod vanuit WKO, maar degene die er zijn hebben wel het gehele jaar een energievraag. Dit is anders bij ondiepe en diepe geothermiesystemen. Hier komt het aanbod aan warmte al gauw niet overeen met de vraag.

In de winter is er bij veel warmteconsumenten een piekvraag naar warmte en in de zomer een veel lagere warmtevraag. Er moeten dan andere opslag en conversietechnieken worden ingezet om een warmtevraag te creëren in de zomer. Denk bijvoorbeeld aan het omzetten van warmte in koude middels adsorptiekoeling. Ook moeten er in de winter andere warmtebronnen worden ingezet voor piekvermogens. Een voorbeeld hiervan is de warmtelevering aan de woningbouw en de utiliteitsbouw. Deze warmteconsumenten hebben een hoge warmtevraag met zeer hoge pieken in de winter en een lage warmtevraag in de zomer. Met name de pieken zijn een probleem voor geothermie. Geothermiesystemen kunnen slechts een bepaald maximaal vermogen aan warmte leveren, omdat er niet plotseling nog meer bronwater omhoog kan worden gepompt wanneer er een piek is in de warmtevraag. Daarom zijn er meerdere warmtebronnen nodig die extra warmte leveren tijdens piekuren of die dienen als back-up, zoals gasketels. Daarnaast kan er warmte in de zomer worden opgeslagen in HTO systemen, om in de winter in te zetten tijdens piekuren (Wesselink et al., 2018). Daarom zijn diepere geothermiesystemen met name geschikt voor het leveren van een bepaalde basislast aan warmte voor meerdere warmteconsumenten, met een one-to-many relatie met een piekvoorziening. Of een many-to-many relatie met meerdere warmteconsumenten en warmtebronnen, waarbij andere warmtebronnen de piekvermogens invullen, bijvoorbeeld gasketels of biomassaketels.

Een andere belangrijke beperking van met name diepe geothermie en in mindere mate ondiepe geothermie, is de leveringszekerheid. Geothermie putten kunnen uitvallen of onderhoud nodig hebben, wat veel tijd kan kosten. Dit is met name van toepassing op diepe geothermiesystemen, omdat op een grotere diepte er veel stoffen zoals zouten, zware metalen, CO₂ en andere gassen in het bronwater opgelost kunnen zijn. Deze stoffen kunnen ervoor zorgen dat putten roesten of verstopt raken. Ook kan de ondergrondse pomp uitvallen. Bij dergelijke werkzaamheden aan putten moet er een speciale boorinstallatie komen om de put te herstellen. Dit kan al gauw enkele weken duren. In het ergste geval moet er een nieuwe put worden geboord, wat minstens 6 maanden kost (Schoof, 2014).

Daarom is vooral bij diepe geothermiesystemen een goede back-up voorziening belangrijk. De back-up voorziening kan zowel een duurzame als een fossiele warmtebron zijn. Bij een one-to-one relatie zal de warmteconsument dus een goede back-up voorziening moeten hebben. Glastuinbouwbedrijven en industriële warmteconsumenten kunnen bijvoorbeeld hun bestaande warmtevoorziening met gasketels behouden als back-up. In een one-to-many relatie of many-to-many relatie is het belangrijk dat er een andere warmtebron als back-up kan dienen. Diepe geothermiesystemen die op hoge temperaturen werken kunnen in een dergelijke relatie mogelijk in cascade warmte leveren. Eerst aan warmteconsumenten met een hoge aanvoertemperatuur en daarna warmteconsumenten met lagere aanvoertemperaturen.

4.5 Ruimtelijke ordening

In paragraaf 4.3 is reeds aandacht besteed aan de ruimtelijke eigenschappen van geothermiesystemen. In deze paragraaf wordt verder ingegaan op de aandachtspunten voor geothermiesystemen met betrekking tot de ruimtelijke ordening. Hierbij is het van belang dat de locatie van geothermiesystemen goed wordt afgewogen tegen andere ruimtelijke functies en dat ruimtelijke conflicten worden tegengegaan.

Zoals al eerder genoemd in Hoofdstuk 4.3 zal geothermie bovengronds weinig conflicten veroorzaken door het beperkte bovengrondse ruimtegebruik. Bij ondiepe en diepe geothermie moet er wel rekening worden gehouden met het benodigde oppervlak voor het boorterrein en de installaties, met bijbehorende veiligheidscontouren. Daarnaast is het belangrijk om te beseffen dat warmtelevering met geothermie wel bestaande energie en materiaalstromen kan verstoren. Zo zal warmtelevering door middel van geothermie in veel gevallen als alternatief worden ingezet voor aardgas. Dit betekent dat bestaande gasleidingen en installaties mogelijk buiten gebruik raken. Daarnaast wordt aardgas bij glastuinbouwbedrijven bijvoorbeeld ook ingezet voor de levering van elektriciteit en CO₂ voor plantengroei. De elektriciteit en CO₂ zal in dat geval uit andere bronnen moeten worden gehaald.

Aangezien het ondergrondse ruimtegebruik bij geothermie aanzienlijk groter is dan het bovengrondse ruimtegebruik, is er met name sprake van conflicten met andere functies in de ondergrond. Hieronder worden er een aantal per geothermiesysteem toegelicht. De mogelijke conflicten met andere ondergrondse functies zijn sterk afhankelijk van de grondlagen die worden gebruikt en het aantal andere functies dat van deze grondlagen gebruik maakt. Door de verschillen in dieptes zijn hierbij sterke verschillen zichtbaar tussen de geothermiesystemen.

4.5.1 WKO

De afgelopen decennia zijn er veel WKO systemen in Nederland bijgekomen. Inmiddels zijn er ruim 1000 open WKO systemen aangelegd. Daarnaast bevinden zich in Nederland land ook ongeveer 22.600 gesloten WKO systemen. Met name in de stedelijke gebieden kunnen de grondlagen waar WKO systemen gebruik van maken daardoor al best vol zijn (Broersma et al., 2011). Zoals te zien in tabel 2 hebben WKO systemen een beperkt ondergronds ruimtegebruik. WKO systemen hebben echter al gauw een beïnvloedingsgebied van enkele tientallen meters, tot buiten de perceelsgrenzen van de gebruiker. Bij onvoldoende ruimtelijke ordening van WKO systemen kan daardoor interferentie met nabijgelegen systemen optreden (De Taskforce WKO, 2009). Daarnaast moet bij de aanleg van WKO systemen rekening worden gehouden met een aantal andere functies die van dezelfde grondlagen gebruik maken. Zo worden de aquifers op deze diepte ook gebruikt voor grondwater winning, opslag van regenwater en de lozing van brijn. De meeste vormen van gebruik in deze grondlagen zijn slecht te combineren, dus moet er voldoende afstand worden gehouden (Oomes, 2012).

Bij WKO systemen is de warme bron begrensd tot 25°C. Onder de 30°C wordt het bronwater namelijk vrijwel niet aangetast door biologische of chemische processen. WKO systemen pompen het water uit de productieput echter wel terug in een retourput op een andere locatie. Hierdoor zouden verontreinigingen in het bronwater zich kunnen verspreiden (I&W & EZ&K, 2018). Daarnaast zijn er gebieden waar verschillende aquifers met zoet en zout water onder elkaar liggen. Het is ongewenst dat via putten interferentie tussen deze grondlagen ontstaat met betrekking tot de scheiding van zoet en zout grondwater (Van der Krogt, 2011). In waterwingebieden, grondwaterbeschermingsgebieden en boringvrije zones is het boren voor andere functies dan drinkwaterwinning niet toegestaan. Naast waterwingebieden zijn er ook nationale grondwater reserves en aanvullende strategische voorraden grondwater, met zoet grondwater van zeer hoge kwaliteit. In deze gebieden zijn andere functies dan grondwaterwinning ongewenst maar niet uitgesloten (I&W & EZ&K, 2018).

4.5.2 Ondiepe Geothermie

De aquifers van ondiepe geothermiesystemen worden nauwelijks door andere functies gebruikt. Op sommige plaatsen worden de aquifers op deze diepte gebruikt voor gaswinning, vanaf een diepte van 600m. Daarnaast wordt er op deze diepte op sommige plaatsen steenkool geproduceerd en zout gewonnen uit zoutkoepels. Ook wordt er gedacht aan de opslag van radioactief afval (Oomes, 2012). Over het algemeen zijn de aquifers voor ondiepe geothermiesystemen echter ongerept. Dit kan ook worden beschouwd als een belangrijk voordeel van ondiepe geothermiesystemen. Er is ondergronds op deze diepte veel ruimte.

Ook voor ondiepe geothermiesystemen geldt dat boren in waterwingebieden, grondwaterbeschermingsgebieden en boringvrije zones niet is toegestaan. Boren in gebieden met Nationale Grondwater Reserves of Aanvullende Strategische Voorraden is echter niet op voorhand uitgesloten. De begrenzing van Aanvullende Strategische Voorraden en het beschermingsregime worden door de Provincie vastgelegd in provinciale verordeningen en hierbij wordt rekening gehouden met potentiële gebieden voor geothermie. Voor Nationale Grondwater Reserves overlegt het Rijk met provincies, gemeenten en andere belanghebbenden op welke manier de reserves worden begrensd en welke ontwikkelingsmogelijkheden er zijn voor de toepassing van geothermie in deze aquifers (I&W & EZ&K, 2018).

4.5.3 Diepe geothermie

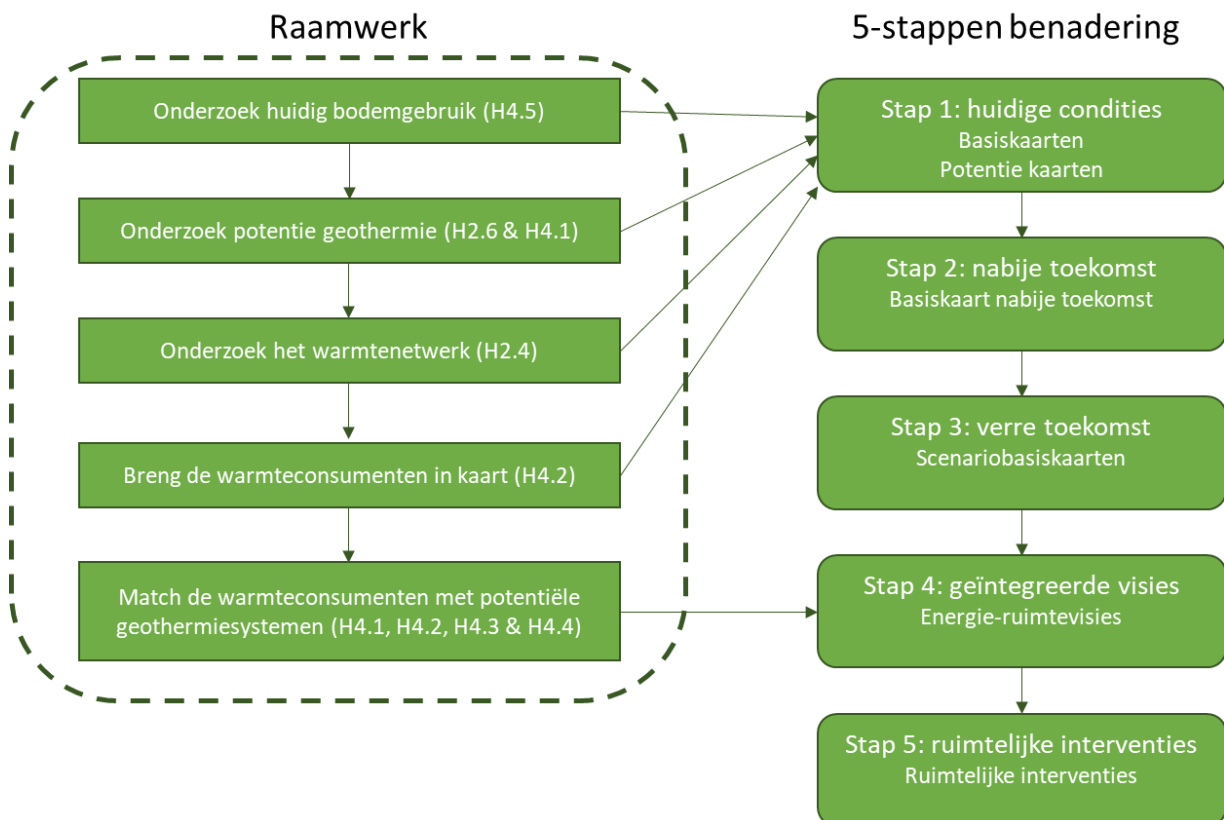
Voor diepere geothermiesystemen zal ruimtegebruik er steeds meer toe doen. Er zijn nu al meer dan 3000 diepe putten in Nederland en meer dan 50% van het landoppervlak is al een concessiegebied voor o.a. de winning van gas, zout, olie en aardwarmte. En nog steeds komen er aanvragen bij (Herber, 2011). Gezien het toenemende gebruik van de diepe ondergrond en de diversiteit in functies is het wenselijk om ook de diepe ondergrond ruimtelijk te ordenen en te bepalen welke functies prioriteit hebben (Herber, 2011). De aquifers die worden gebruikt door diepe geothermiesystemen worden onder andere ook gebruikt voor gaswinning, gasopslag en oliewinning. Daarnaast wordt er op deze diepte ook zout gewonnen uit zoutkoepels en zijn er plannen voor de opslag van CO₂ (Oomes, 2012).

Aquifers voor diepe geothermie bevinden zich ver onder aquifers voor drinkwaterwinning. In waterwingebieden, grondwaterbeschermingsgebieden en boringvrije zones zijn echter ook boringen voor diepe geothermie uitgesloten. Er is namelijk een risico dat putten in waterwingebieden het drinkwater aantasten, doordat de putten gaan lekken of doordat er via de putten interferentie bestaat tussen ondiepe aquifers. Het is wel mogelijk om een diepe aquifer aan te boren vanaf een boorlocatie buiten het waterwingebied. Hierdoor is in veel gevallen diepe geothermie onder waterwingebieden alsnog mogelijk (I&W & EZ&K, 2018). Boren in gebieden met Nationale Grondwater Reserves of Aanvullende Strategische Voorraden is niet op voorhand uitgesloten, maar hiervoor gelden dezelfde voorwaarden als bij ondiepe geothermiesystemen. Aangezien bij diepe geothermiesystemen warmte over een langere afstand kan worden getransporteerd, kan het voorkomen dat potentiële aquifers zich onder natuurgebieden bevinden. Het wel of niet mogen boren in natuurgebieden hangt af van specifieke wet- en regelgeving en moet per gebied worden beoordeeld. Boren onder de Waddeneilanden is op voorhand uitgesloten (I&W & EZ&K, 2018).

4.6 Raamwerk

In de voorgaande paragrafen zijn middels een literatuurstudie de eigenschappen van drie verschillende geothermiesystemen beschreven vanuit een ruimtelijk, exergetisch en functioneel perspectief. Vanuit de literatuur is informatie verzameld die kan worden toegepast bij het opstellen van energie-ruimtevisies met geothermiesystemen. Daarnaast biedt de informatie over de eigenschappen van de geothermiesystemen handvaten en criteria waar op moet worden gelet wanneer potentiële locaties voor geothermiesystemen in kaart worden gebracht. In deze paragraaf worden een aantal acties verder toegelicht waar bij het opstellen van energie-ruimtevisies rekening mee moet worden gehouden. Deze acties geven aan in welke volgorde en hoe de literatuur uit dit onderzoek kan worden ingezet bij het opstellen van energie-ruimtevisies.

De acties worden verderop in deze paragraaf verder toegelicht. De acties vormen samen met de literatuur uit hoofdstuk 4 en de figuren 16, 20 en 21 een raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies. In Bijlage 1 is tevens een beknopt overzicht gegeven van de eigenschappen van de verschillende geothermiesystemen. In figuur 22 is achter elke actie weergegeven uit welk hoofdstuk binnen dit onderzoek aanvullende informatie kan worden gehaald. Ook is weergegeven op welke stappen binnen de vijfstappenbenadering de acties van toepassing zijn en wat de resultaten zijn in de vorm van kaarten.



Figuur 22 Overzicht raamwerk voor de toepassing van geothermie in energie-ruimtevisies

Onderzoek huidig bodemgebruik

Maak eerst inzichtelijk hoe de diepe ondergrond in de regio op dit moment wordt gebruikt. Zijn er bijvoorbeeld waterputten, gasputten en zoutputten in het gebied. Breng ook in kaart wat voor geothermiesystemen er al zijn in het gebied. Maak daarnaast inzichtelijk of er in de regio gebieden zijn waar sommige geothermiesystemen niet kunnen worden toegepast, zoals waterwingebieden (I&W & EZ&K, 2018). Zie paragraaf 4.5 voor meer informatie over bodemfuncties die kunnen conflicteren met geothermiesystemen. Op deze manier kan inzichtelijk worden gemaakt of geothermiesystemen wel mogelijk zijn in het gebied.

Onderzoek potentie geothermie

Onderzoek de potentiële aquifers die in de ondergrond van het gebied voorkomen en de eigenschappen van deze aquifers. Zie voor meer informatie over potentiële aquifers paragraaf 2.6 en 4.1. Breng de aquifers los van elkaar in beeld, zodat onderscheid kan worden gemaakt in diepte, temperatuur en potentiële warmte. Hierdoor kan ook worden bepaald wat voor soort geothermiesysteem de aquifer kan benutten. Om een beeld te krijgen van de winbare warmte uit een aquifer, kan de energiepotentie op kaarten worden weergegeven als het aantal Joules aan warmte dat kan worden gewonnen per vierkante meter (Van der Krogt, 2011). Daarnaast kunnen er kaarten worden opgesteld van de potentiële winbare warmte. De potentiële winbare warmte, ook wel potential recoverable heat (PRH), is de warmte die theoretisch kan worden gewonnen, zonder rekening te houden met technische of economische beperkingen en reservoir eigenschappen (Kramers et al., 2012). De PRH is gemiddeld ongeveer een derde van de winbare warmte die aanwezig is in de aquifer. Aangezien geothermiesystemen ongeveer een levensduur hebben van dertig jaar, is de jaarlijkse hoeveelheid winbare warmte een dertigste van de PRH (Kramers et al., 2012). Deze jaarlijkse hoeveelheid winbare warmte kan worden vergeleken met de jaarlijkse warmtevraag van warmteconsumenten in de regio.

De PRH houdt geen rekening met permeabiliteit en transmissiviteit, waardoor de werkelijke hoeveelheid winbare warmte in de praktijk mogelijk lager zal uitvallen. Het haalbare debiet uit de aquifer kan echter mogelijk worden versterkt door het gesteente te fracken (Kramers et al., 2012). Daarnaast zijn er talloze technieken denkbaar om het debiet van putten te vergroten. Ook kunnen putten op een andere manier worden geboord, bijvoorbeeld horizontaal in de aquifer, waardoor een hoger debiet kan worden behaald (Nitters et al., 2016). Ook hier zitten echter beperkingen aan. Daarom is het ook van belang om een indicatie te geven van de technische en economische potentie van geothermie in de regio. Eventueel kan ook verdiepend onderzoek worden uitgevoerd naar het warmteaanbod vanuit potentiële geothermiesystemen. De eigenschappen van potentiële geothermiesystemen kunnen bijvoorbeeld nauwkeuriger in kaart worden gebracht door programma's als DoubletCalc.

Onderzoek het warmtenetwerk

Onderzoek in wat voor fase de ontwikkeling van het warmtenetwerk in de regio is en bepaal hoe geothermiesystemen hierin geïmplementeerd kunnen worden. Analyseer de status, de vorm en de structuur van het warmtenetwerk in de regio. Wanneer er nog geen warmtenetwerk in de regio is of slechts een enkele buurt een warmtenet heeft ligt het voor de hand om te starten met het ontwikkelen van warmtenetwerken op een laag schaalniveau (buurt) en deze uit te breiden tot een hoger schaalniveau (wijk, stad, regio). Dit proces is verder omschreven in paragraaf 2.4. Stel op basis van de eigenschappen van de regio een strategie op voor de implementatie van warmtenetwerken en geothermiesystemen in de regio. Bij een warmtenetwerk op een laag schaalniveau kunnen bijvoorbeeld WKO systemen en ondiepe geothermiesystemen worden ingezet als duurzame warmtebronnen. Diepe geothermiesystemen kunnen beter later in het proces worden aangesloten om warmtenetwerken op een hoger schaalniveau te voorzien in de basislast. Diepe geothermiesystemen hebben meer afzet nodig en kunnen vanwege de leveringszekerheid beter worden ingezet in een many-to-many relatie om voldoende andere warmtebronnen als back-up- en piek voorziening voorhanden te hebben. Wanneer er sprake is van een geïntegreerd warmtenetwerk op een regionale schaal, is het ook mogelijk om warmtenetwerken door perifere gebieden te leiden. Hierdoor kunnen mogelijk ook potentiële diepe geothermiesystemen in perifere gebieden aan het warmtenetwerk worden gekoppeld.

Breng de warmteconsumenten in kaart

Breng in kaart wat voor warmteconsumenten er in het gebied zijn. Maak eerst inzichtelijk wat voor gebouwen en functies er zijn. Let hierbij vooral op de functies en gebouwen die potentiële warmteconsumenten vormen voor geothermiesystemen. Raadpleeg paragraaf 4.2 voor meer informatie over functies, gebouwen en processen die potentiële warmteconsumenten vormen voor geothermiesystemen. Nadat de warmteconsumenten in kaart zijn gebracht kan ook verder onderzoek worden uitgevoerd naar de gevraagde vermogens en temperaturen van de warmteconsumenten en het patroon van hun warmtevraag. Op basis van de energie labels en het bouwjaar van gebouwen kunnen uitspraken worden gedaan over de mogelijke aanvoertemperatuur voor de verwarming van deze gebouwen (HTV of LTV). Ook kan de warmtevraag worden weergegeven op een kaart in GJ/m² per jaar, zodat de jaarlijkse warmtevraag goed kan worden vergeleken met de jaarlijkse PRH vanuit geothermiesystemen (Kramers et al., 2012). De warmtevraag vanuit de warmteconsumenten kan nauwkeuriger worden vastgesteld door te rekenen met kengetallen of data vanuit energiebedrijven en nutsbedrijven.

Match de warmteconsumenten met potentiële geothermiesystemen

Bepaal wat voor geothermiesystemen aansluiten bij de warmtevraag vanuit de warmteconsumenten. Houd hierbij rekening met de aanvoer temperaturen, vermogens en het patroon van de warmtevraag. Ga op zoek naar locaties waar het warmteaanbod van potentiële geothermiesystemen overeenkomt met de warmtevraag vanuit warmteconsumenten. Raadpleeg hiervoor paragraaf 4.2 en 4.4. Focus in eerste instantie op potentiële geothermiesystemen in gebieden met een hoge PRH en voldoende warmtevraag vanuit warmteconsumenten. In deze gebieden kan namelijk een geothermie-systeem met hetzelfde ondergrondse ruimtegebruik meer warmte opleveren dan in gebieden waar de PRH lager is. Houd er ook rekening mee dat er ondergronds voldoende ruimte tussen de geothermiesystemen zit zodat zij elkaar niet hydraulisch of thermisch beïnvloeden. Zie voor meer informatie over het ruimtebeslag van geothermiesystemen paragraaf 4.3 en voor meer informatie over de eigenschappen van de geothermiesystemen paragraaf 4.1.

In de gebouwde omgeving is het van belang om te controleren of gebouwen ook een koudevraag hebben. Deze gebouwen kunnen mogelijk beter door een WKO systeem van zowel warmte als koude worden voorzien. Ondiepe geothermiesystemen leveren alleen warmte, maar wel op een hogere temperatuur dan WKO-systemen. Voor diepe geothermiesystemen kan in eerste instantie het beste worden gezocht naar warmteconsumenten met een grote, geconcentreerde warmtevraag, zoals de glastuinbouw of industrie. Op deze manier kunnen de transportafstanden voor het warmtenetwerk beperkt worden. Daarnaast hebben dergelijke warmteconsumenten mogelijk al een grote gasketel die als back-up voorziening kan worden ingezet.

5. Casestudie

In deze casestudie wordt een energie-ruimtevisie opgesteld voor de IJsseldelta regio volgens de vijfstappenbenadering van Broersma et al. (2011) en het raamwerk voor geothermie uit dit onderzoek. Binnen deze casestudie worden een basiskaart, scenariobasiskaart en twee energie-ruimtevisies voor 2030 en 2040 opgesteld voor het scenario mondiale solidariteit. Uitgangspunt hierbij is dat binnen dit scenario de geothermische potentie in de regio zo optimaal mogelijk wordt benut. In het mondiale solidariteit scenario wordt grootschalig ingezet op de productie van duurzame energie en het afvangen van CO₂ (Van Kann, 2015). Daarnaast wordt veel aandacht besteed aan het verduurzamen en isoleren van woningen en het verwarmen van de gebouwde omgeving met warmtepompen en warmtenetwerken. Warmteproducenten worden verbonden met warmteconsumenten. In het Mondiale solidariteit scenario is zoetwater van groot belang, waardoor boren in grondwaterbeschermingsgebieden is verboden. Hierdoor zijn nieuwe geothermieputten in deze gebieden niet mogelijk.

Verder worden in het mondiale solidariteit scenario nieuwe verbindingen zoveel mogelijk langs bestaande infrastructuur aangebracht. De gebouwde omgeving groeit amper en ook de ruimtevraag voor industrie en landbouw neemt af. Hierdoor komt er meer ruimte vrij voor natuur en energiegewassen. Er worden wel meer agrarische producten geproduceerd in tuinbouwkassen (Van Kann, 2015). In het mondiale solidariteit scenario zijn culturele identiteit en traditionele waarden belangrijk. Er is een duurzame economische ontwikkeling en in de samenleving is veel aandacht voor het milieu en de sociale aspecten van het leven. Er ontstaan zowel top-down als bottom-up initiatieven, de welvaart wordt verdeeld en er is een vrije uitwisseling van kennis en technologie. Een ander kenmerk is een sterke, generieke aandacht voor de leefomgeving (Van Kann, 2015).

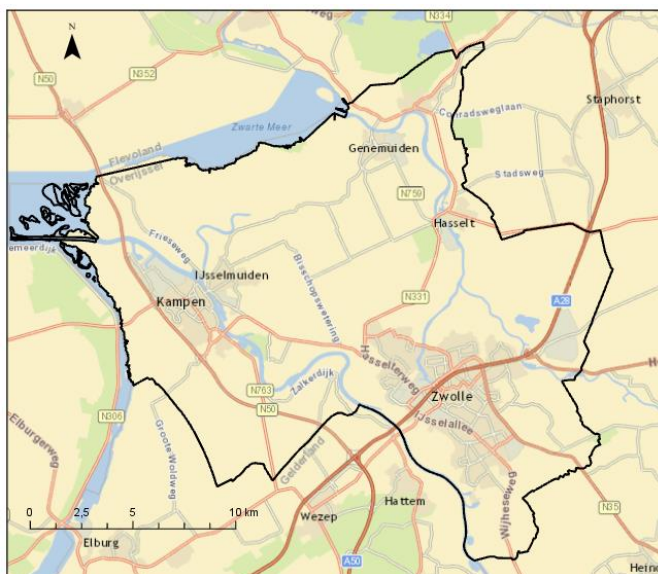
In de volgende paragrafen worden de acties vanuit het raamwerk voor geothermie en de stappen volgens de vijfstappenbenadering toegepast op de IJsseldelta regio. Zie figuur 22 voor een overzicht van deze acties en stappen. Uiteindelijk worden de bevindingen weergegeven in een scenariobasiskaart van de IJsseldelta regio voor het scenario Mondiale solidariteit en twee energie-ruimtevisies voor 2030 en 2040.

5.1 Analyse van huidige condities

De IJsseldelta regio wordt gekenmerkt door de stroming van de rivier de IJssel en is omringd door een aantal meren en rivieren, waaronder het Zwarte Water, het Ketelmeer en het Zwarte Meer (Haartsen, 2018). In deze casestudie is ervoor gekozen om het studiegebied te definiëren op basis van een aantal administratieve grenzen. Wanneer het studiegebied overlapt met administratieve grenzen kan dit namelijk tijd en middelen besparen bij het opstellen van energie-ruimtevisies (Van Kann, 2015). De IJsseldelta regio bevat de gemeentes Kampen, Zwolle en Zwartewaterland, zie figuur 23. Deze gemeenten liggen alle in de Provincie Overijssel. De IJsseldelta regio heeft een oppervlakte van 36.901 hectare (CBS, 2018) en een inwoneraantal van 201.105 (CBS, 2018a). De grootste bevolkingsconcentraties bevinden zich in de steden Kampen en Zwolle. De gemeente Kampen heeft 52.885 inwoners, de gemeente Zwartewaterland 22.388 en de gemeente Zwolle 125.832 (CBS, 2018a).

De stad Kampen heeft zich de laatste decennia sterk uitgebreid in zuidelijke en westelijke richting. Daarnaast is ook het dorp IJsselmuiden sterk gegroeid. De stad Zwolle heeft zich nog sterker uitgebreid en strekt zich met de nieuwe wijk Stadshagen uit tot de polder Mastenbroek (Haartsen, 2018). De IJsseldelta regio is een typisch rivierenlandschap met veel dorpen langs de rivieren. Aan de noordkant van de IJssel liggen met name oude dorpen met onregelmatige blokvormige verkaveling. De polder Mastenbroek bestaat wel uit grote blokvormige percelen. De zuidkant van de IJssel wordt gekenmerkt door langgerekte dorpen met strookvormige percelen. Hier zijn ook regelmatige strookvormige percelen te vinden die voor veenontginning zijn gebruikt (Haartsen, 2018). Over het algemeen wordt het gebied gekenmerkt door twee stedelijke kernen, Kampen en Zwolle, en voornamelijk woonkernen langs rivieren en meren. Naast de steden Kampen en Zwolle zijn er drie grote woonkernen, namelijk IJsselmuiden, Genemuiden en Hasselt.

In de regio zijn sporen van de eerste generatie energielandschappen zichtbaar. Het gebied de Koekoek was vroeger een grote plas, welke ontstond door de turfwinning in dit gebied (Haartsen, 2018). Het gebied de Koekoek wordt tegenwoordig gebruikt voor glastuinbouw. Ook zijn er in het gebied sporen aanwezig van de tweede generatie energielandschappen. In het gebied zijn enkele putten geboord voor exploratie en aardgaswinning, welke inmiddels geabandonneerd zijn (NLOG, 2018). In de regio was vroeger ook een gascentrale in gebruik, de IJsselcentrale, maar deze is in onbruik geraakt en in 2018 gesloopt (Stijkel, 2018). Daarnaast zijn er twee diepe geothermieputten geboord voor het verwarmen van het glastuinbouwgebied de Koekoekspolder. In dit glastuinbouwgebied worden zowel diepe geothermieputten als WKK's ingezet voor de verwarming van de kassen. De benodigde CO₂ wordt geproduceerd door het verbranden van aardgas in WKK's en door extern CO₂ aan te voeren (Vorage, 2012). In de IJsseldelta regio zijn een aantal grote fabrieken gevestigd die veel energie gebruiken en CO₂ uitstoten. In Kampen bevindt zich een melkfabriek van Lympf. In Zwolle bevinden zich fabrieken van Scania, Abbott Laboratories en Wärtsilä Netherlands (RVO, 2018a).



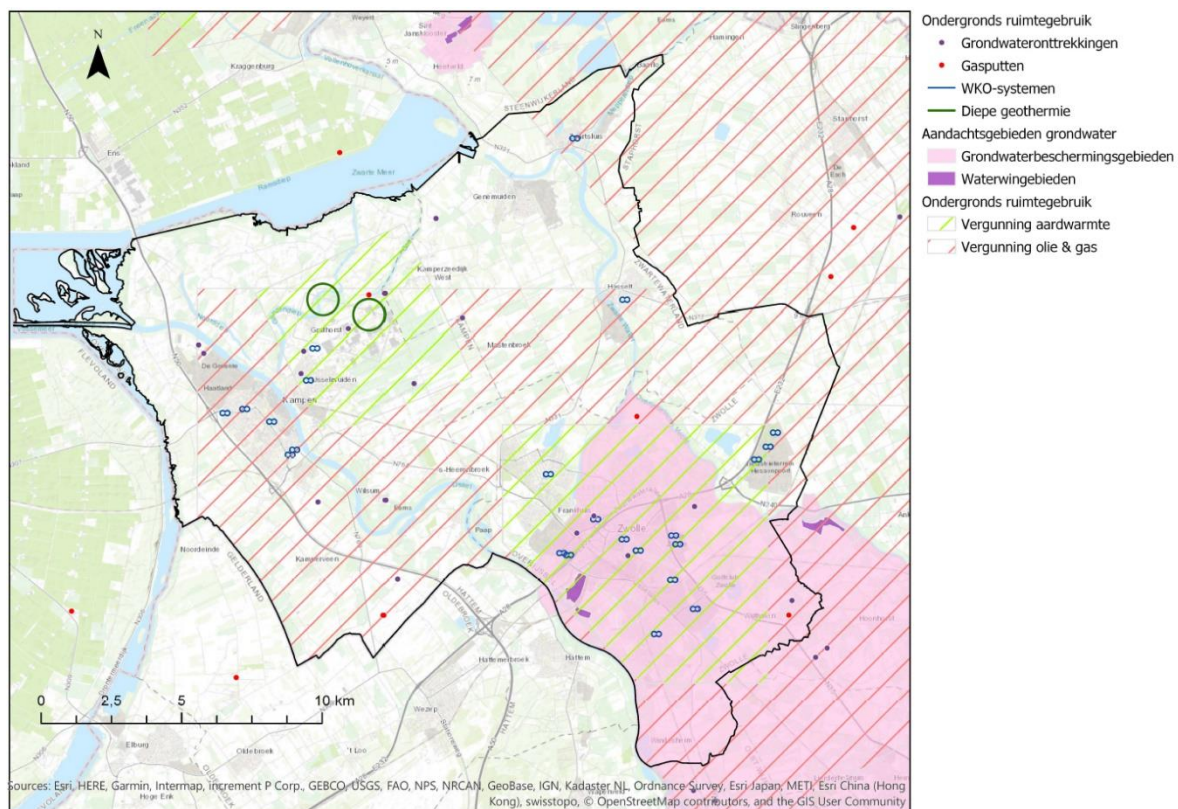
Figuur 23 Overzicht van IJsseldelta regio

Bovenstaande informatie over de IJsseldelta regio is verzameld volgens stap 1 van de vijfstappenbenadering. Hieronder wordt verder ingegaan op de regio volgens de eerste vier acties van het raamwerk voor geothermie uit dit onderzoek. Voor meer informatie zie figuur 22.

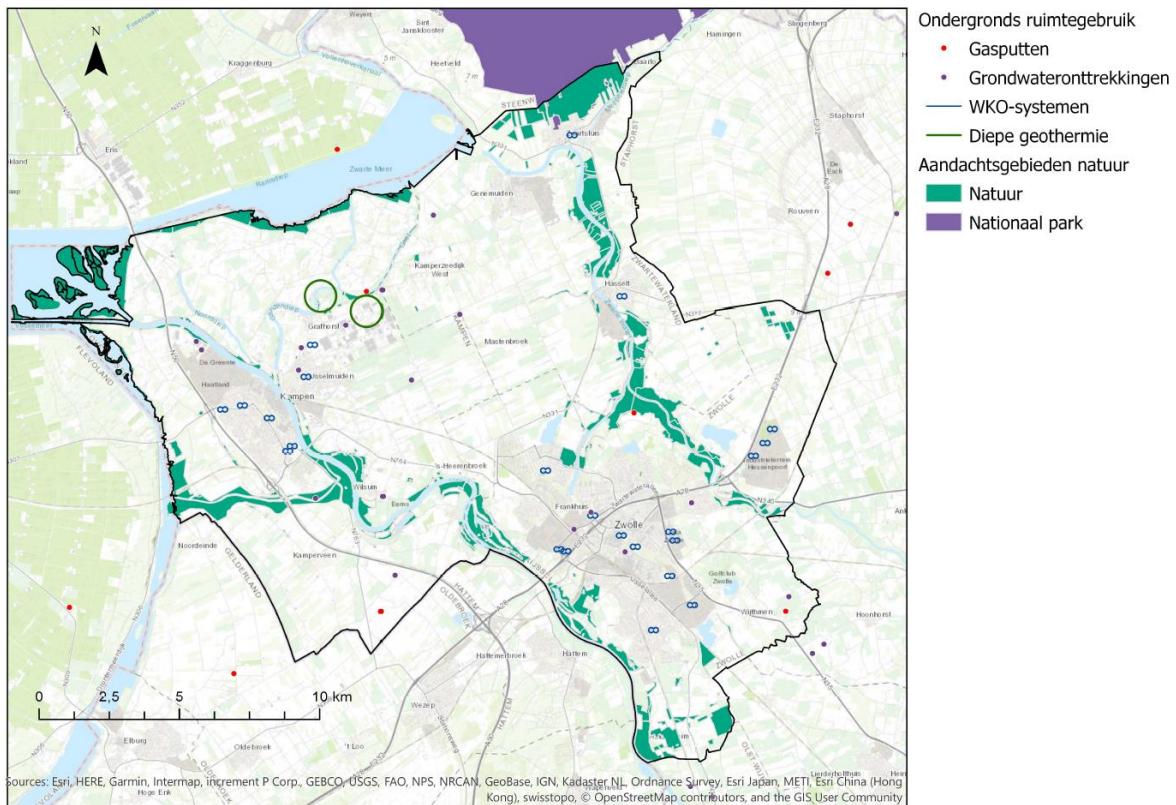
5.1.1 Onderzoek huidig bodemgebruik

In figuur 24 is het ondergrondse ruimtegebruik van de IJsseldelta regio weergegeven, met de huidige geothermieputten, gasputten en open WKO-systemen in het gebied. De cirkels geven een indicatieve inschatting van het ondergrondse ruimtegebruik van de putten volgens tabel 2. Voor WKO-systemen is een ondergronds ruimtebeslag van 5 hectare aangehouden en voor diepe geothermieputten een ruimtebeslag van 200 hectare. De gasputten hebben geen ondergronds ruimtebeslag, omdat alle weergegeven gasputten enkel zijn geboord en getest, maar nooit in productie zijn geweest (NLOG, 2018). Er bevinden zich geen gasvelden in de regio (NLOG, 2018a). In figuur 24 is wel te zien dat er vergunningen voor aardwarmte en gaswinning in de regio zijn afgegeven (NLOG, 2018b).

In figuur 24 zijn ook putten weergegeven die worden gebruikt voor de onttrekking van grondwater (NGR, 2018a). Er bevinden zich reeds 23 open WKO-systemen (NGR, 2018) en 1 diepe geothermieput in de regio (NLOG, 2018). Het diepe geothermieput bevindt zich in de Koekoekspolder en levert warmte met een temperatuur van 67°C aan kassen in dit glastuinbouwgebied (Vorage, 2012). Er bevinden zich WKO-systemen in Kampen, Zwolle, Zwartsluis, IJsselmuiden en Hasselt. De meeste WKO-systemen leveren warmte en koude aan de utiliteitsbouw. Op het bedrijventerrein Hessenpoort leveren enkele WKO-systemen ook warmte en koude aan bedrijven (NGR, 2018).



Figuur 24 Basiskaart Ondergronds ruimtegebruik IJsseldelta regio



Figuur 25 Basiskaart met natuur in de IJsseldelta regio

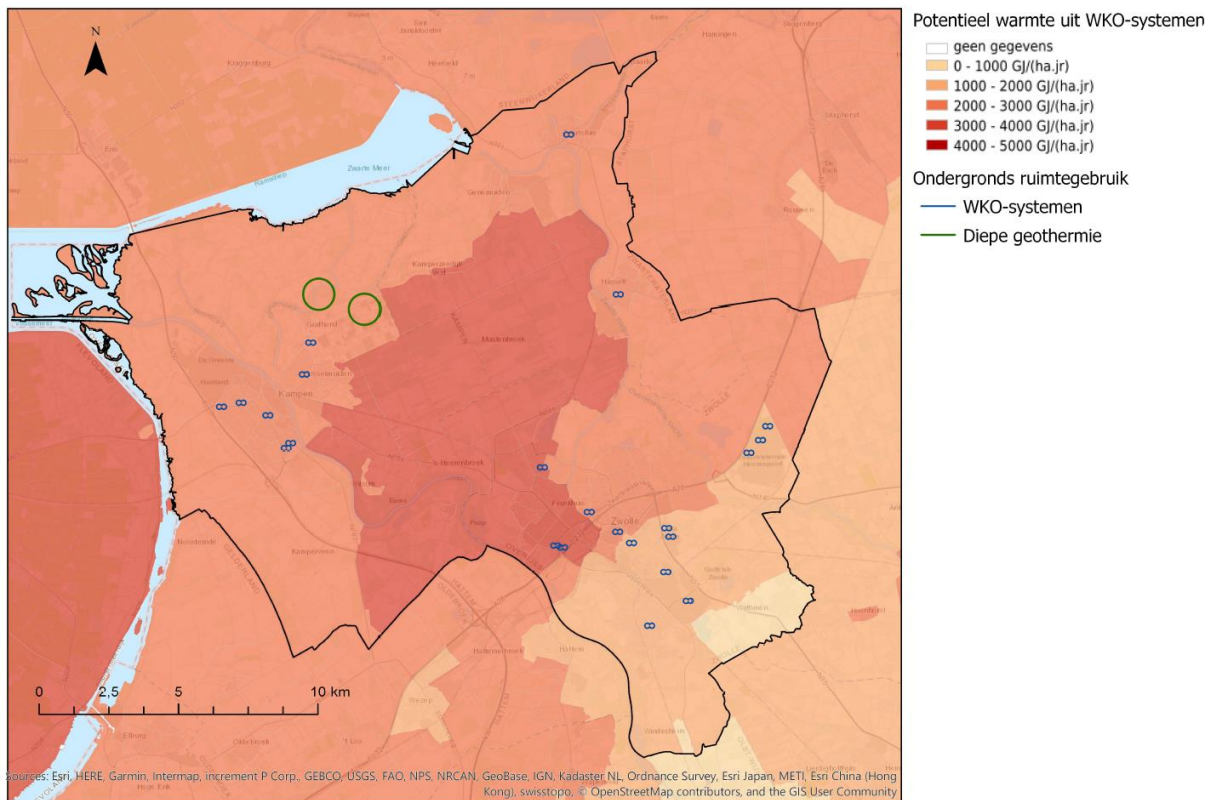
In het zuidoosten van de regio, in de gemeente Zwolle, bevinden zich waterwingebieden en boringvrije zones, waar niet mag worden geboord naar WKO-systemen, ondiepe geothermie of diepe geothermie (NGR, 2018b). De boringvrije zone onder de gemeente Zwolle is een grondwaterbeschermingsgebied. Opvallend genoeg zijn er in dit gebied reeds verschillende grondwaterputten en WKO-systemen actief.

Nast boringvrije zones voor grondwater zijn er ook natuurgebieden waar geothermie boringen niet altijd mogelijk zijn, zie figuur 25. Er zijn met name langs de rivieren enkele kleine natuurgebieden (Kadaster, 2018), maar geen grote nationale parken. Alleen Zwartsluis grenst aan het nationale park Weerribben-Wieden (NGR, 2018b). Aquifers onder grondwater- of natuur beschermingsgebieden kunnen door ondiepe- en diepe geothermiesystemen mogelijk wel worden aangeboord, door een boorlocatie buiten het gebied te plaatsen en schuin te boren (I&W & EZ&K, 2018).

5.1.2 Onderzoek potentie geothermie

In de IJsseldelta regio bevinden zich een aantal aquifers die mogelijk interessant zijn voor geothermie. Potentiële aquifers voor diepe geothermie bevinden zich in de Triasgroep- en Rotliegendegroep zandsteenlagen. Potentiële aquifers voor ondiepe geothermie bevinden zich in de Noordzeegroep zanden. Met name het Brussel zand, de Vessem member en de Heers member zijn interessant voor ondiepe geothermie in de regio. De potentiële aquifers voor WKO-systemen bevinden zich ook in de Noordzeegroep zanden, maar dan op een diepte tot 250m.

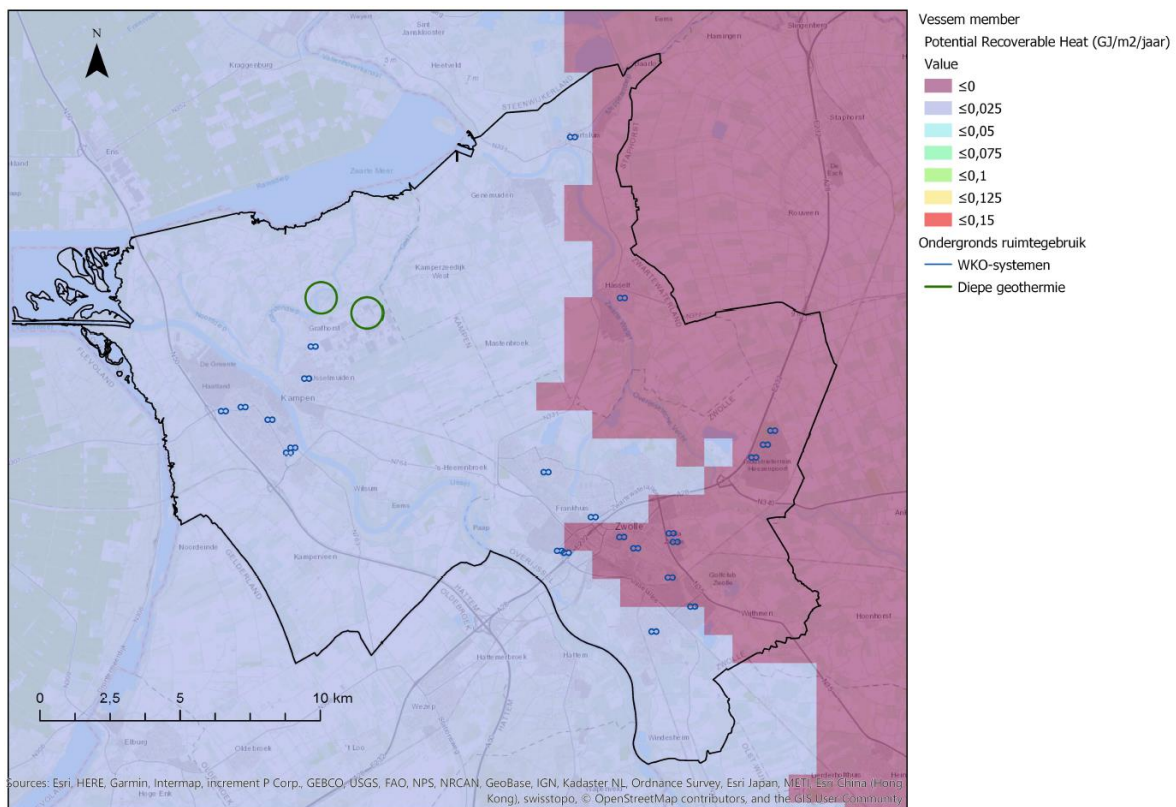
De potentiële capaciteit van warmteopslag in aquifers voor WKO-systemen is weergegeven in figuur 26 in GJ/ha/jaar (NGR, 2018c). De potentie is het hoogst tussen de Gemeente Zwolle en Kampen in, in de Mastenbroek polder. Hier kan tussen de 0,3 en 0,4 GJ/m²/jaar aan warmte worden geproduceerd. In de Gemeente Zwolle en Kampen is de potentie echter ook goed met tussen de 0,2 en 0,3 GJ/m²/jaar. In het zuidoosten van de Gemeente Zwolle neemt de potentie af.



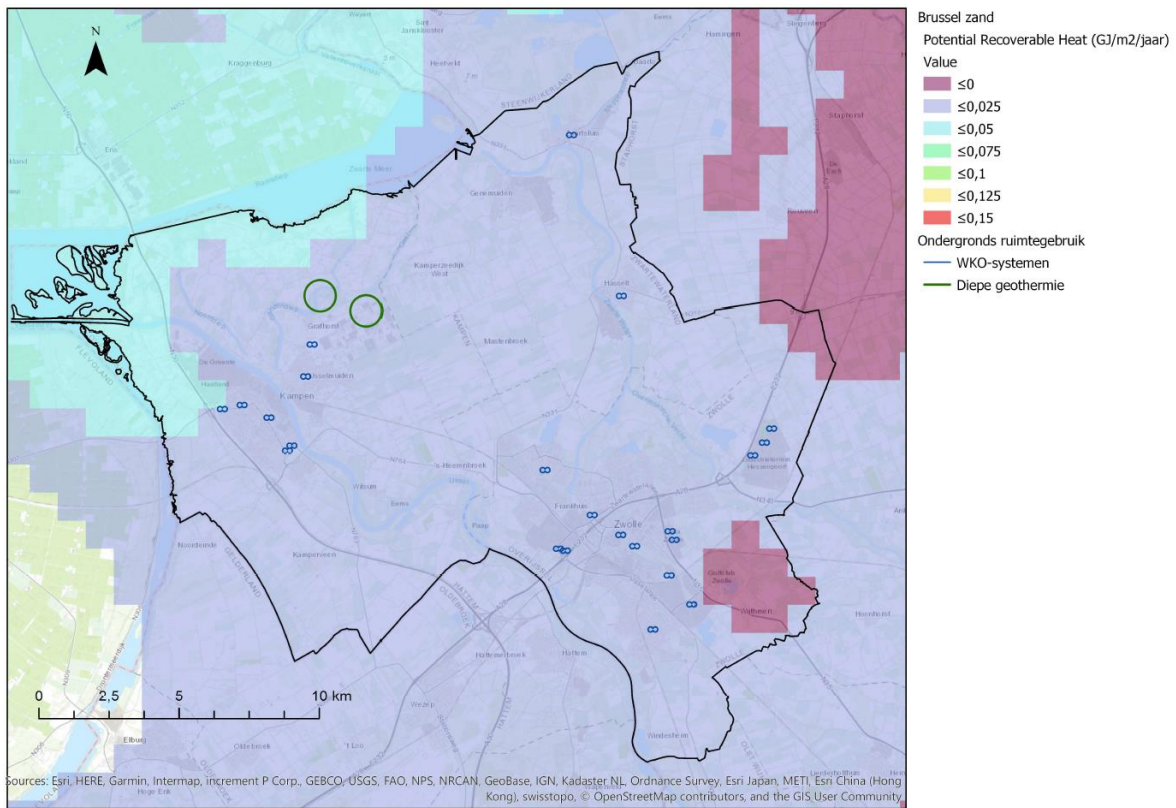
Figuur 26 Potentiekaart WKO-systemen

In figuur 27, 28 en 29 is de PRH in GJ/m²/jaar weergegeven van respectievelijk de Vessem member, het Brussel zand en de Heers member (TNO, 2018). De laatst genoemde aquifer ligt het diepst. Dit is ook te zien in de figuren 30, 31 en 32, die van dezelfde aquifers de hoogste temperatuur onderin de aquifer weergegeven (TNO, 2018). In figuur 27 is te zien dat de potentie van de Vessem member vrij laag is, minder dan 0,025 GJ/m²/jaar. De temperatuur is het hoogst in het zuidwesten van de regio, tussen de 35 en 40°C. Zoals te zien in figuur 28 is de potentie van het Brussel zand hoger, maximaal 0,05 GJ/m²/jaar in het westen van de regio. Ook in het Brussel zand is de temperatuur van de aquifer het hoogst in het zuidwesten van de regio, tussen de 40 en 45 °C (zie figuur 31). De Heers member komt alleen voor in het zuidwesten van de regio en heeft een vrij lage potentie, maximaal 0,025 GJ/m²/jaar. De temperatuur is door de diepere ligging wel hoger dan in het Brussel zand, tussen de 45 en 50°C.

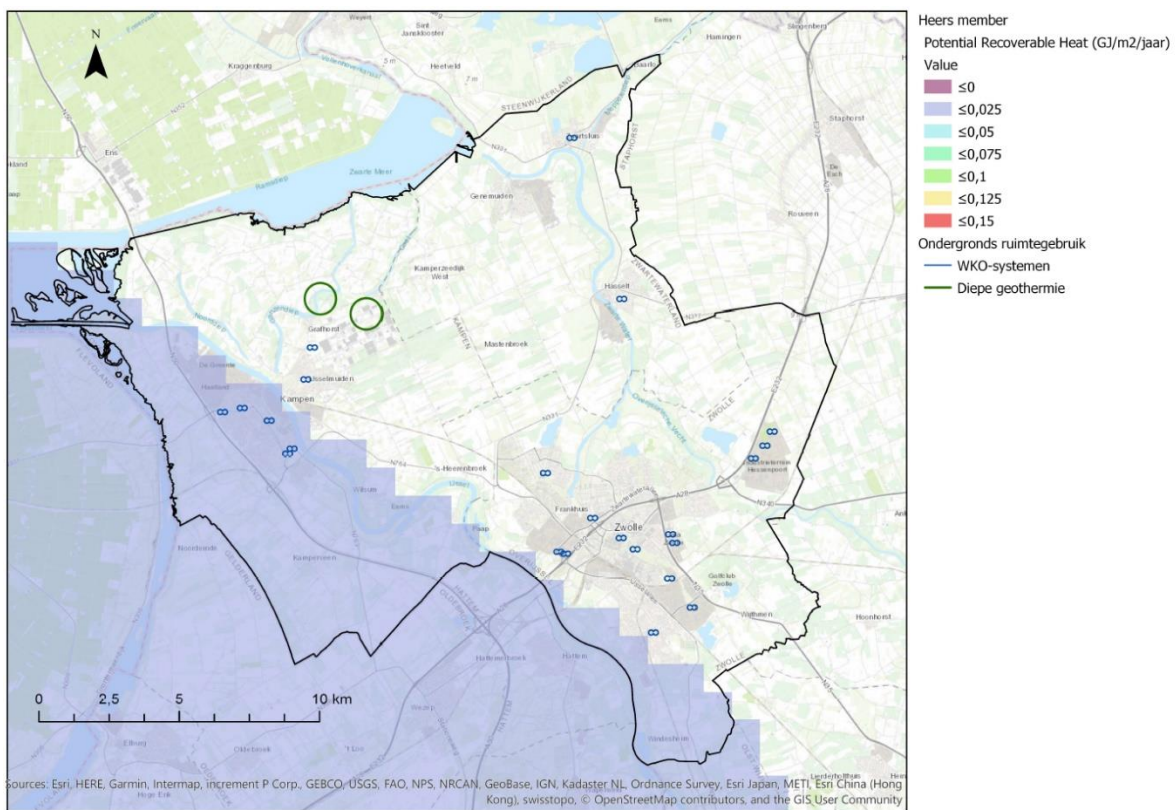
Om ook een beeld te krijgen van de technische potentie van deze aquifers is in figuur 33, 34 en 35 het potentiële thermische vermogen van ondiepe geothermiesystemen weergegeven per aquifer (TNO, 2018). Dit is het thermische vermogen van het ondiepe geothermiesysteem, zonder dat de warmte wordt opgewaardeerd met warmtepompen. Het thermische vermogen is bepaald door uit te gaan van een standaard putontwerp, met een beperkte pompdruk (ThermoGis, 2019). Ook uit deze kaarten komt het Brussel zand naar voren als de aquifer met de meeste potentie. In de Gemeente Kampen is een vermogen van bijna 0,5 MW haalbaar (zie figuur 34).



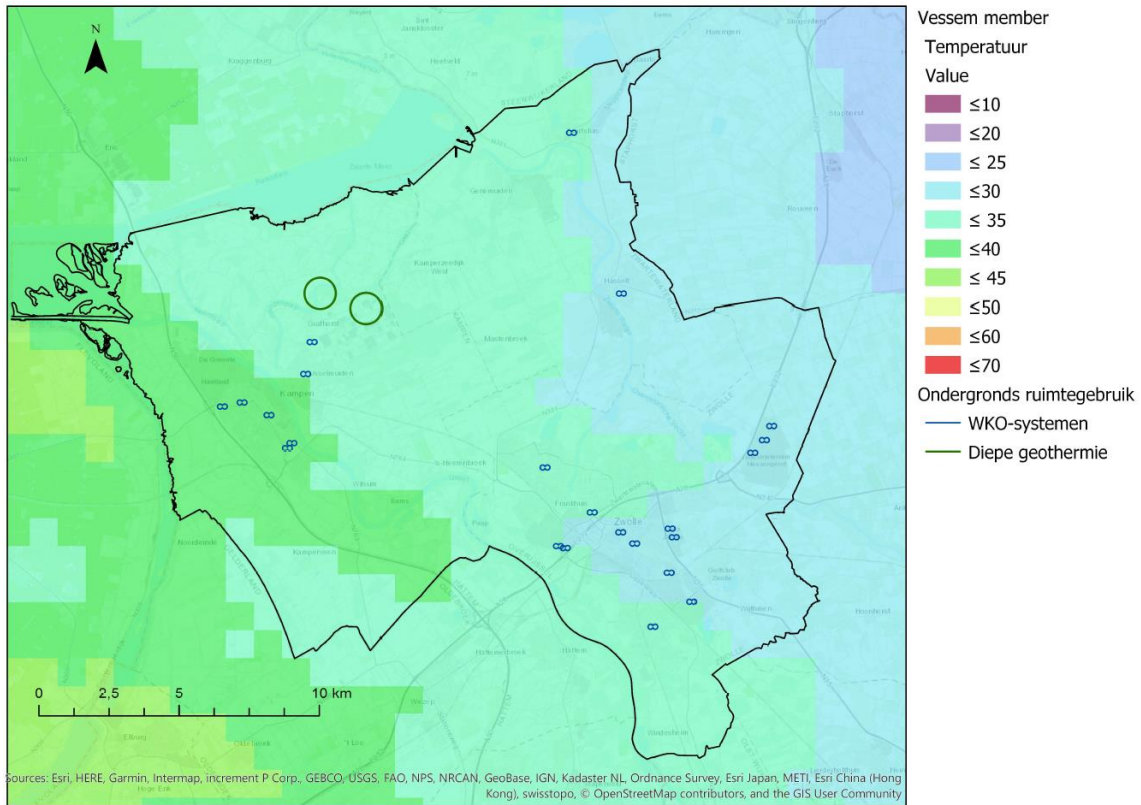
Figuur 27 Potential recoverable heat Vessem member in GJ/m²/jaar



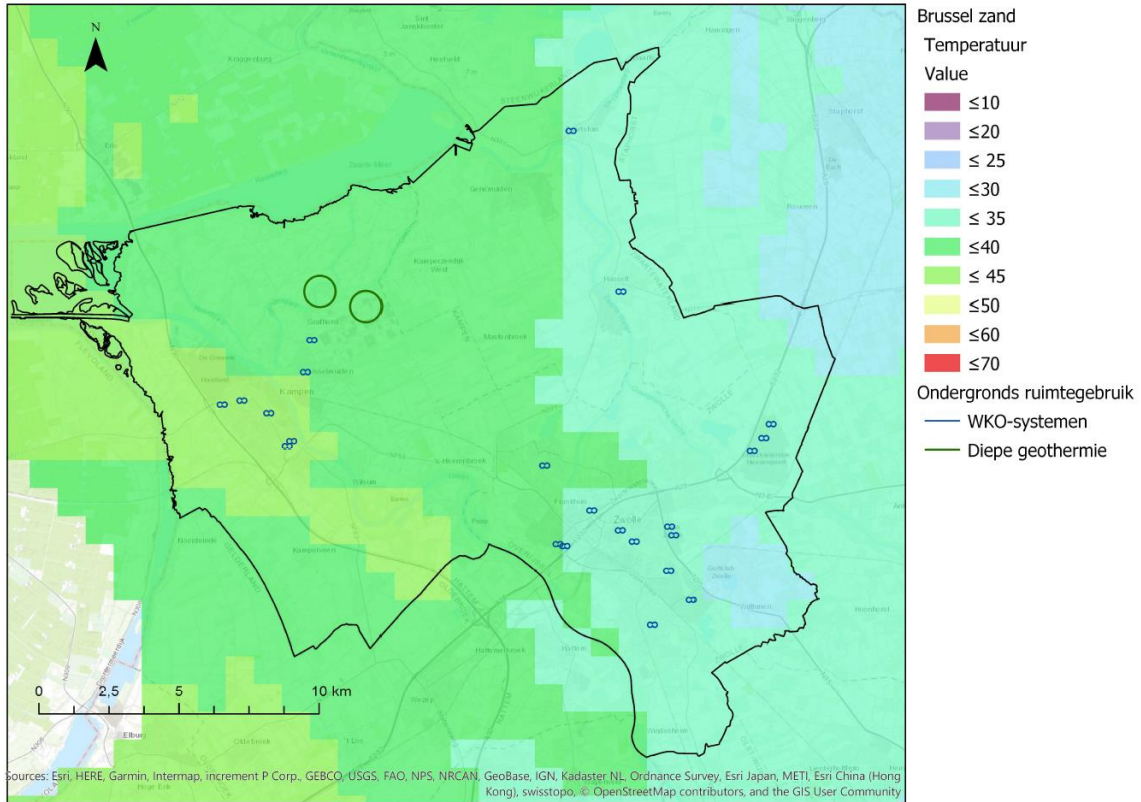
Figuur 28 Potential recoverable heat Brussel zand in GJ/m²/jaar



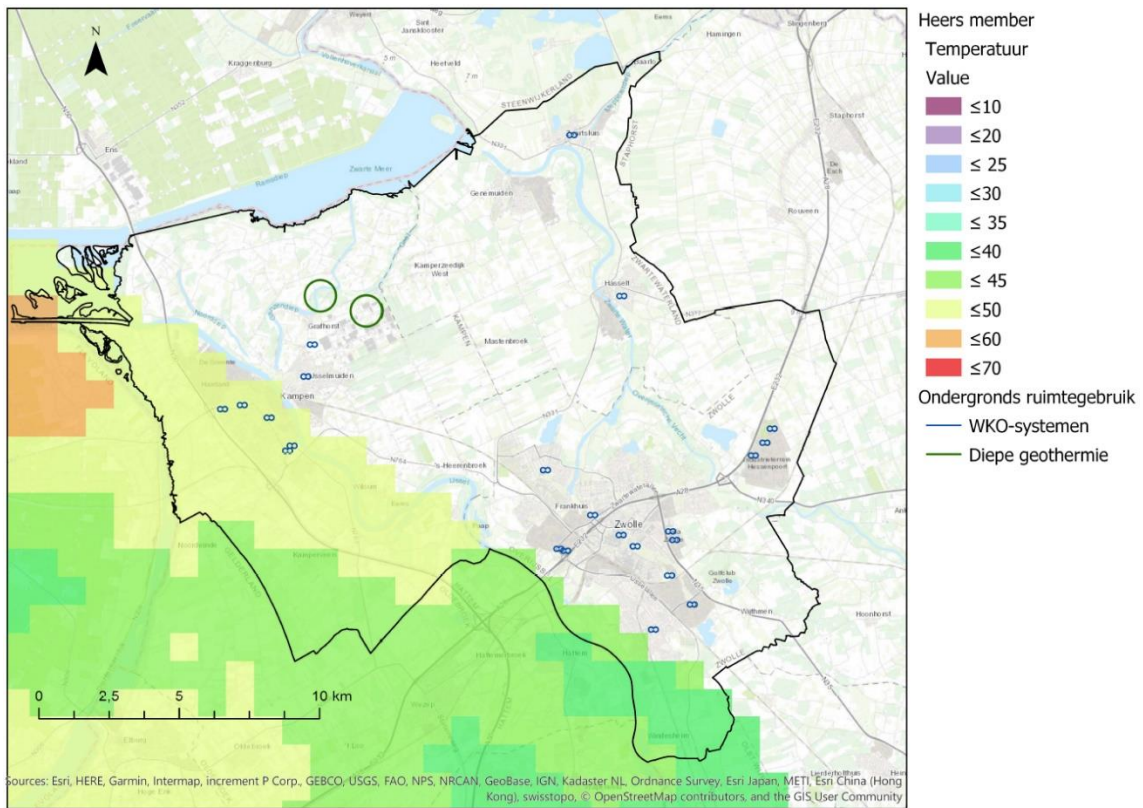
Figuur 29 Potential recoverable heat Heers member in GJ/m²/jaar



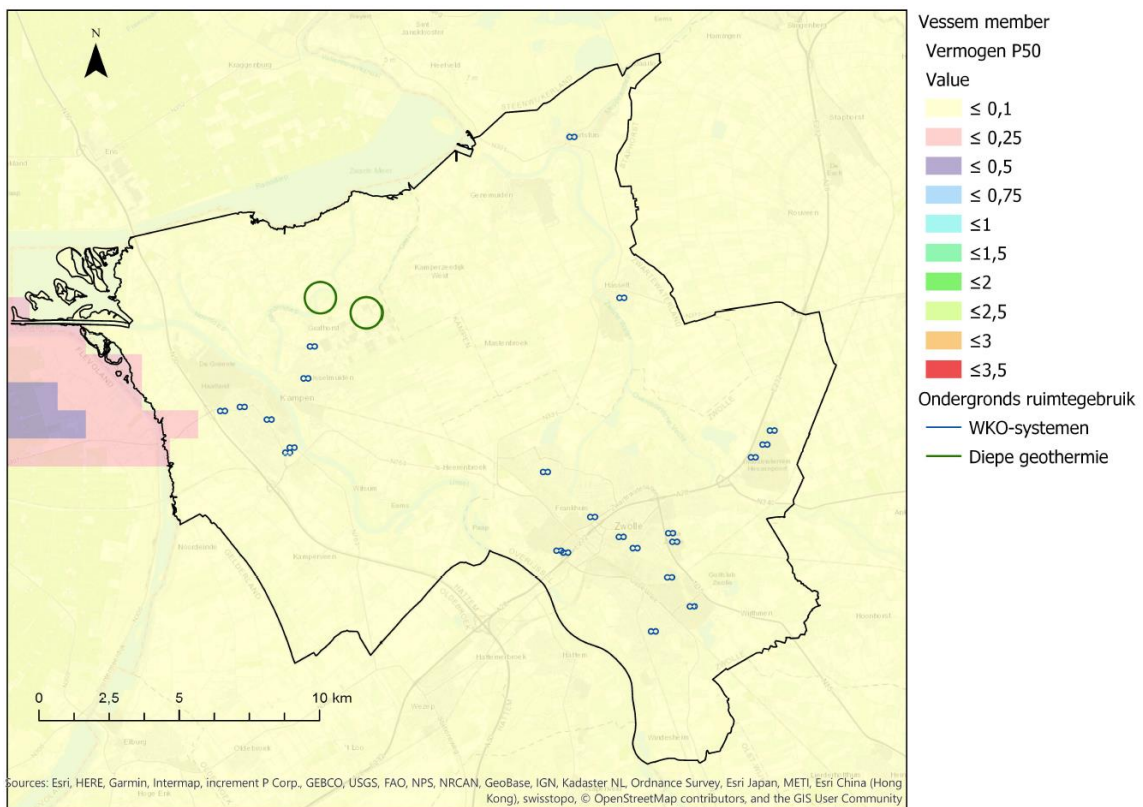
Figuur 30 Temperatuurkaart Vessem member in °C



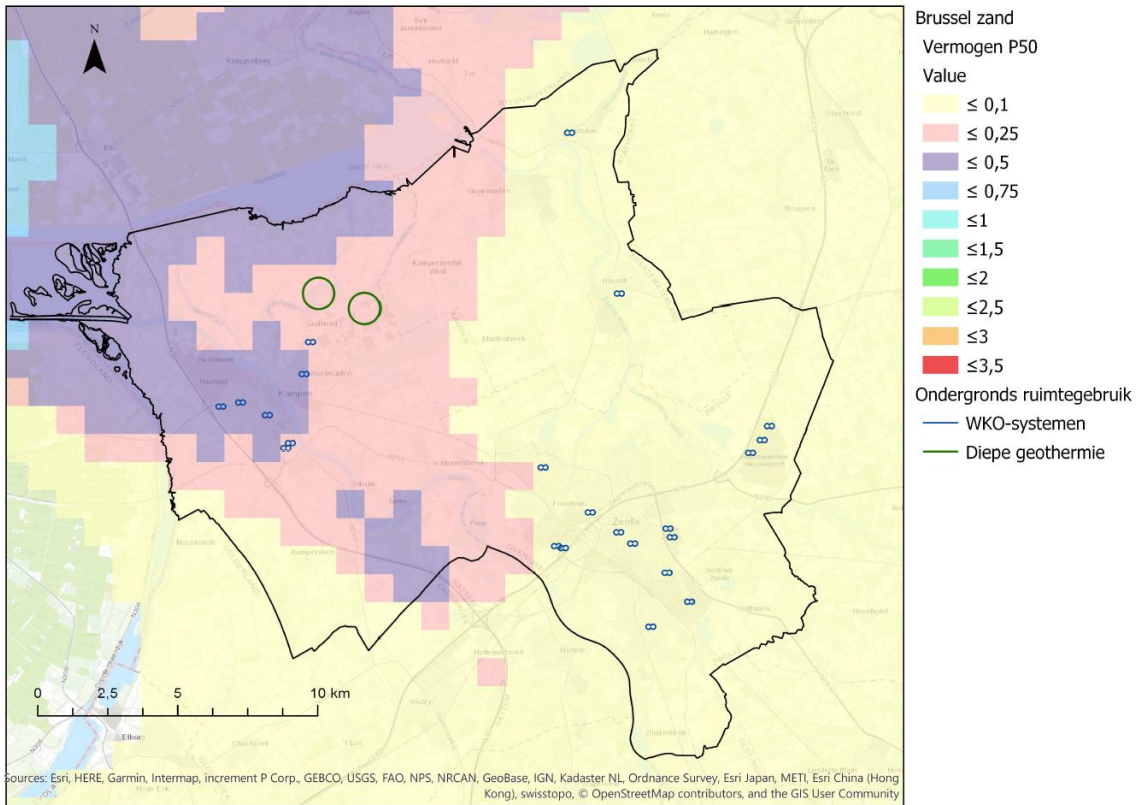
Figuur 31 Temperatuurkaart Brussel zand in °C



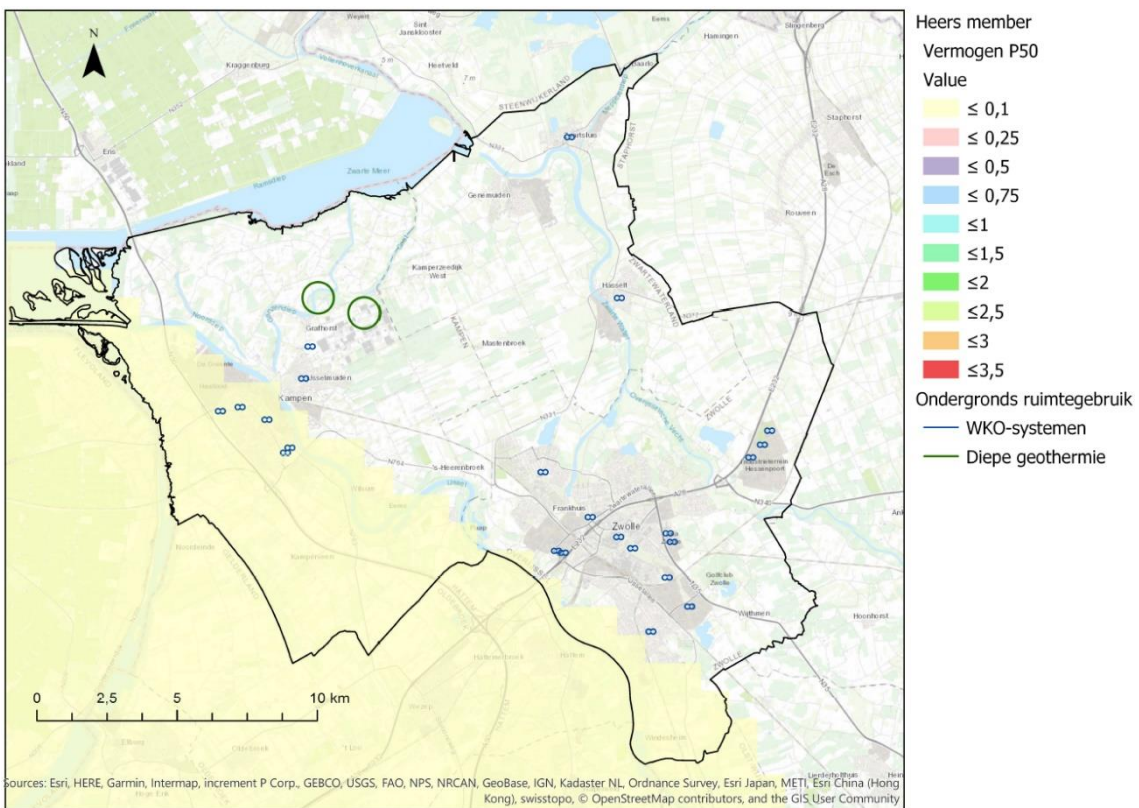
Figuur 32 Temperatuurkaart Heers member in °C



Figuur 33 potentieel vermogen ondiepe geothermie met aquifer in Vessem member in MW (megawatt)

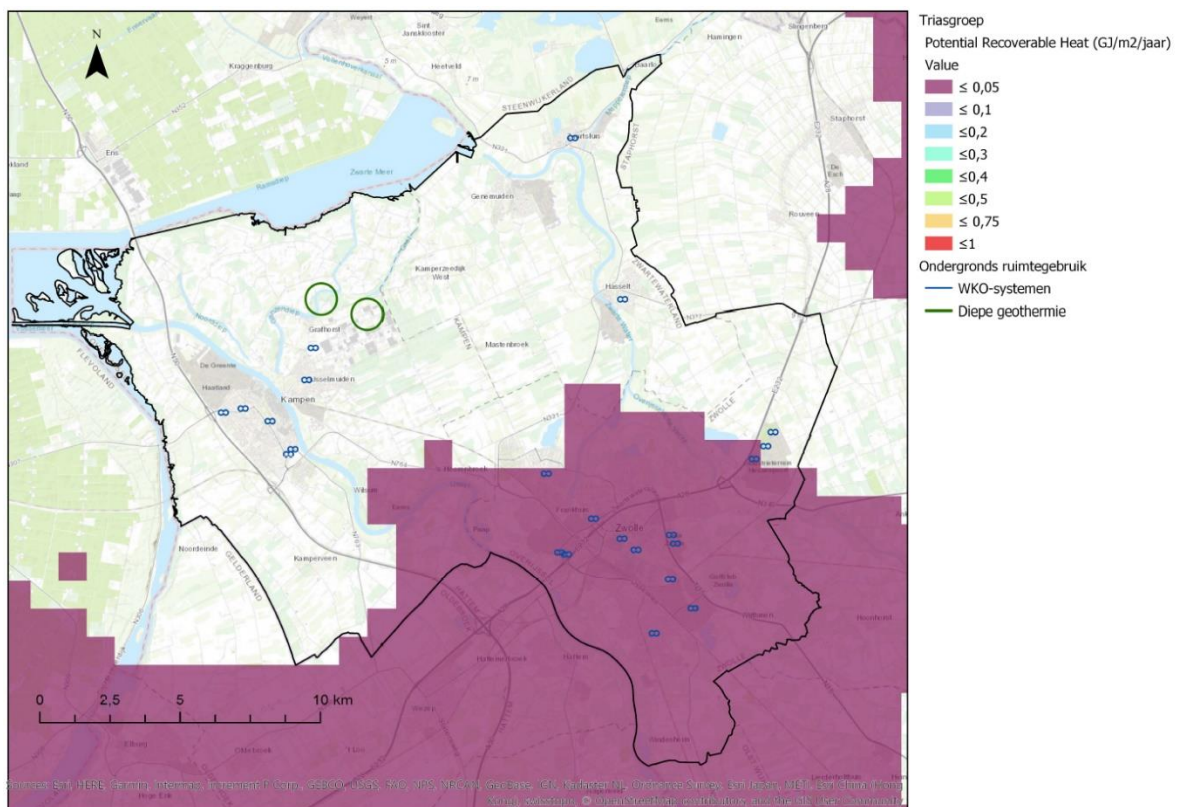


Figuur 34 potentieel vermogen ondiepe geothermie met aquifer in Brussel zand in MW (megawatt)

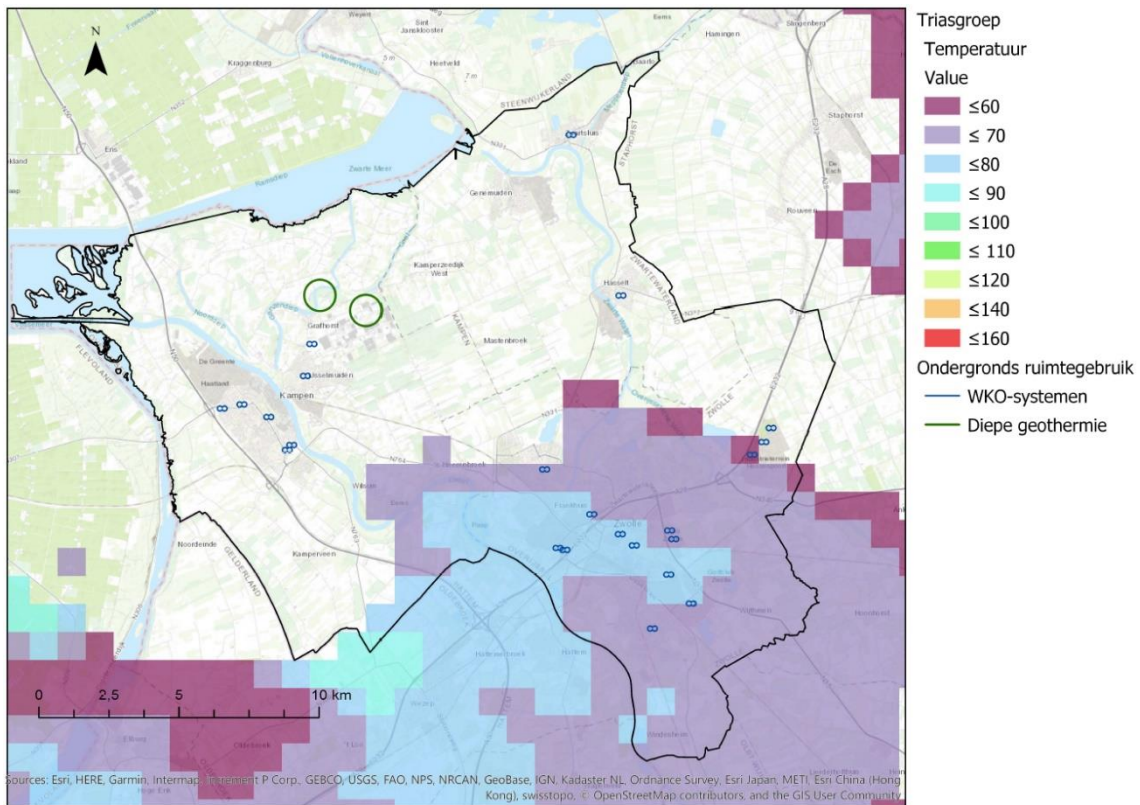


Figuur 35 potentieel vermogen ondiepe geothermie met aquifer in Heers member in MW (megawatt)

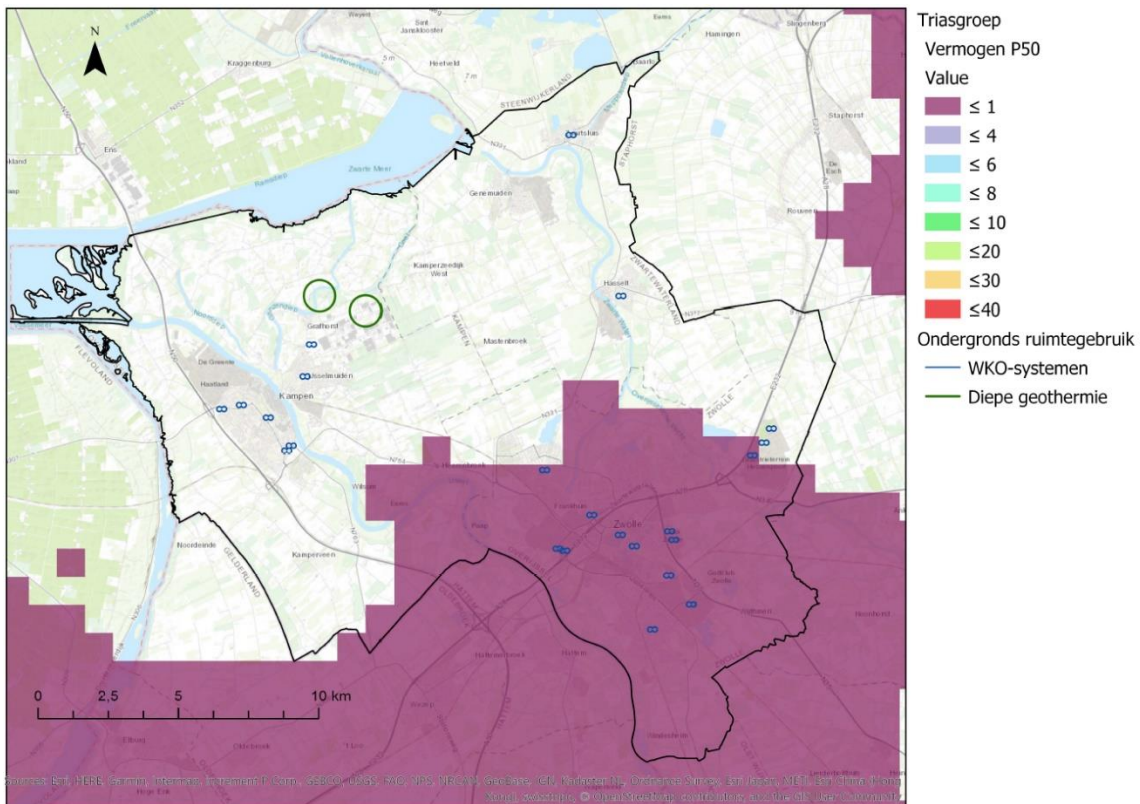
In figuur 36 is de PRH uit de Triasgroep zandsteenlagen weergegeven in GJ/m²/jaar (TNO, 2018). De aquifers in de Triasgroep bieden weinig potentie om te worden benut door diepe geothermiesystemen. De aquifers komen vooral in de gemeente Zwolle voor en hebben een PRH van maximaal 0,05 GJ/m²/jaar. De temperatuur is maximaal 80°C (zie figuur 37). Het vermogen van diepe geothermiesystemen die de aquifers uit de Triasgroep benutten is minder dan 1 MW (zie figuur 38). De aquifers uit de Rotliedengroep zandsteenlagen bieden mogelijk meer potentie. De PRH van deze aquifers is weergegeven in figuur 39 (TNO, 2018). De PRH is het hoogst in het zuidwesten van de regio, maximaal 0,4 GJ/m²/jaar. De temperatuur van de Rotliedengroep aquifers is hier ook het hoogst, maximaal 110 °C (zie figuur 40). Het hoogste vermogen van een potentieel diepe geothermiesysteem bevindt zich echter in het Noordwesten van de regio (zie figuur 41). Dit komt door de hogere permeabiliteit en transmissiviteit in dit gebied. Het vermogen is namelijk berekend met behulp van DoubletCalc 1.4.3 (ThermoGis, 2019). DoubletCalc 1.4.3 rekent met een standaard putontwerp voor geothermieputten en een beperkte pompdruk, waardoor permeabiliteit een belangrijke voorwaarde is voor een hoog thermisch vermogen (Mijnlieff et al., 2014).



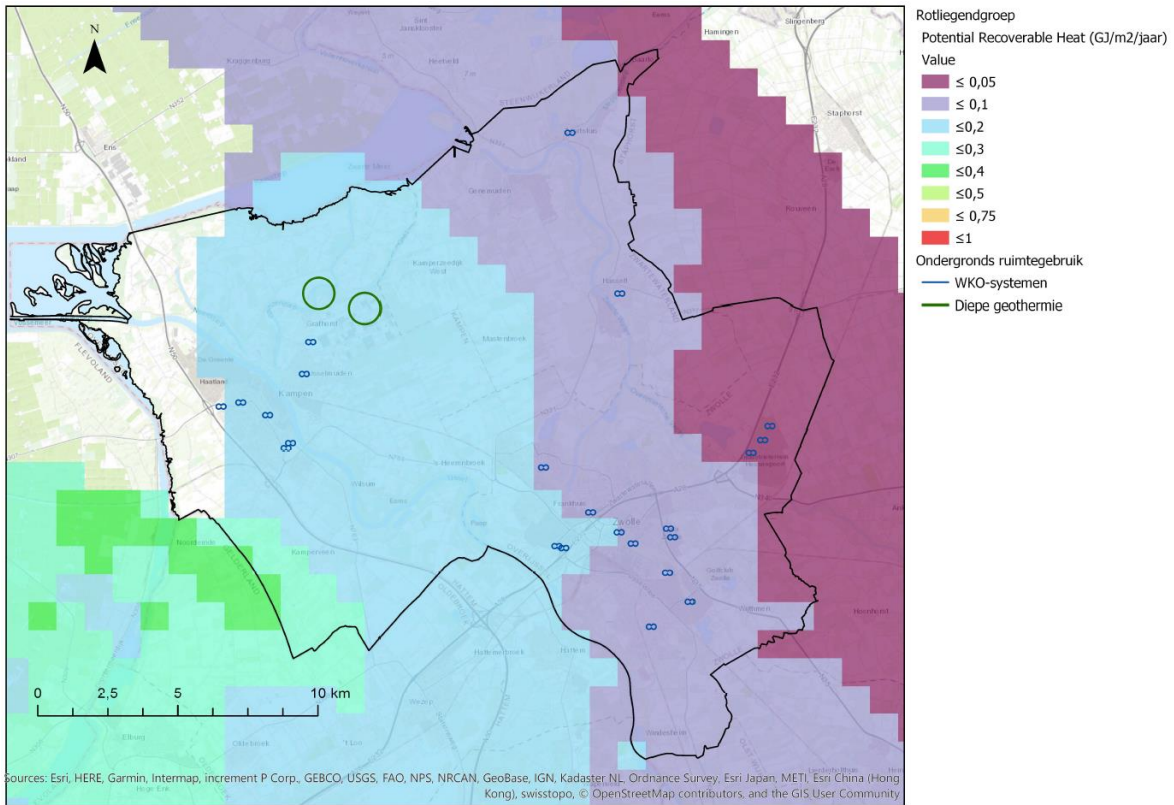
Figuur 36 potential recoverable heat Triasgroep zandsteen in GJ/m²/jaar



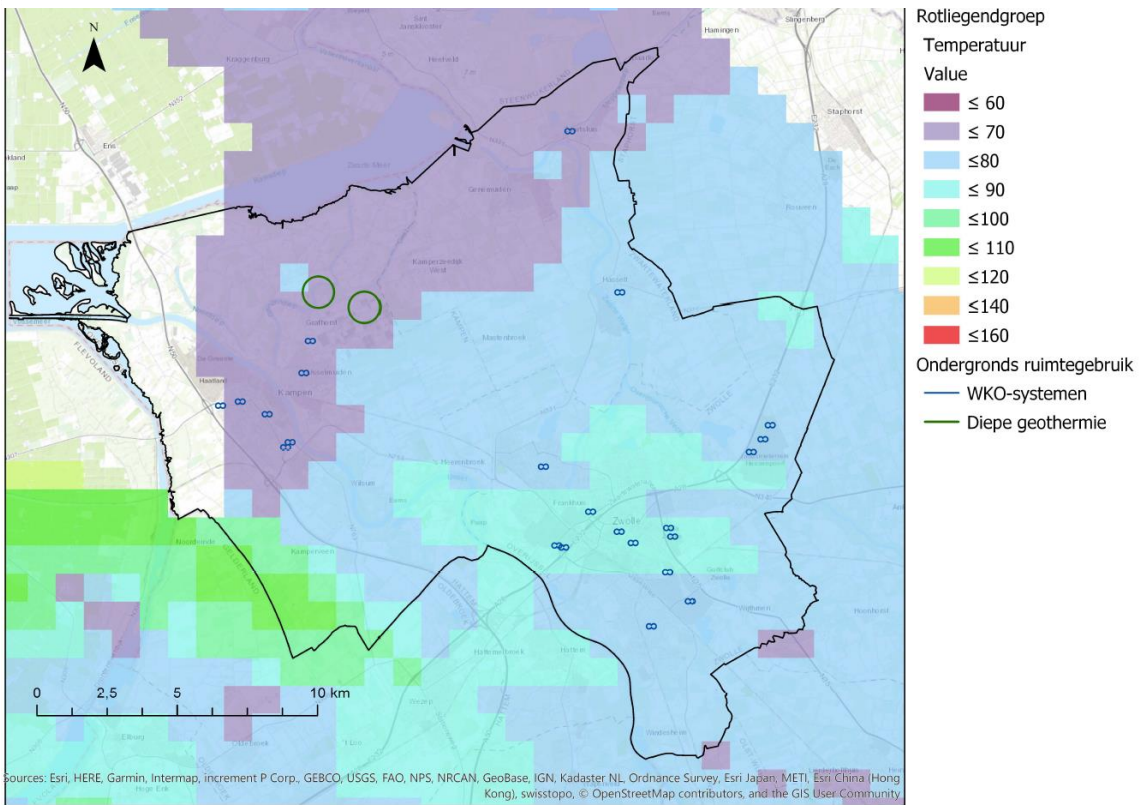
Figuur 37 Temperatuurkaart Triasgroep zandsteen in °C



Figuur 38 potentieel vermogen diepe geothermie met aquifer in Triasgroep zandsteen in MW (megawatt)



Figuur 39 Potential recoverable heat Rotliegendegroep zandsteen in GJ/m²/jaar



Figuur 40 Temperatuurkaart Rotliegendegroep zandsteen in °C

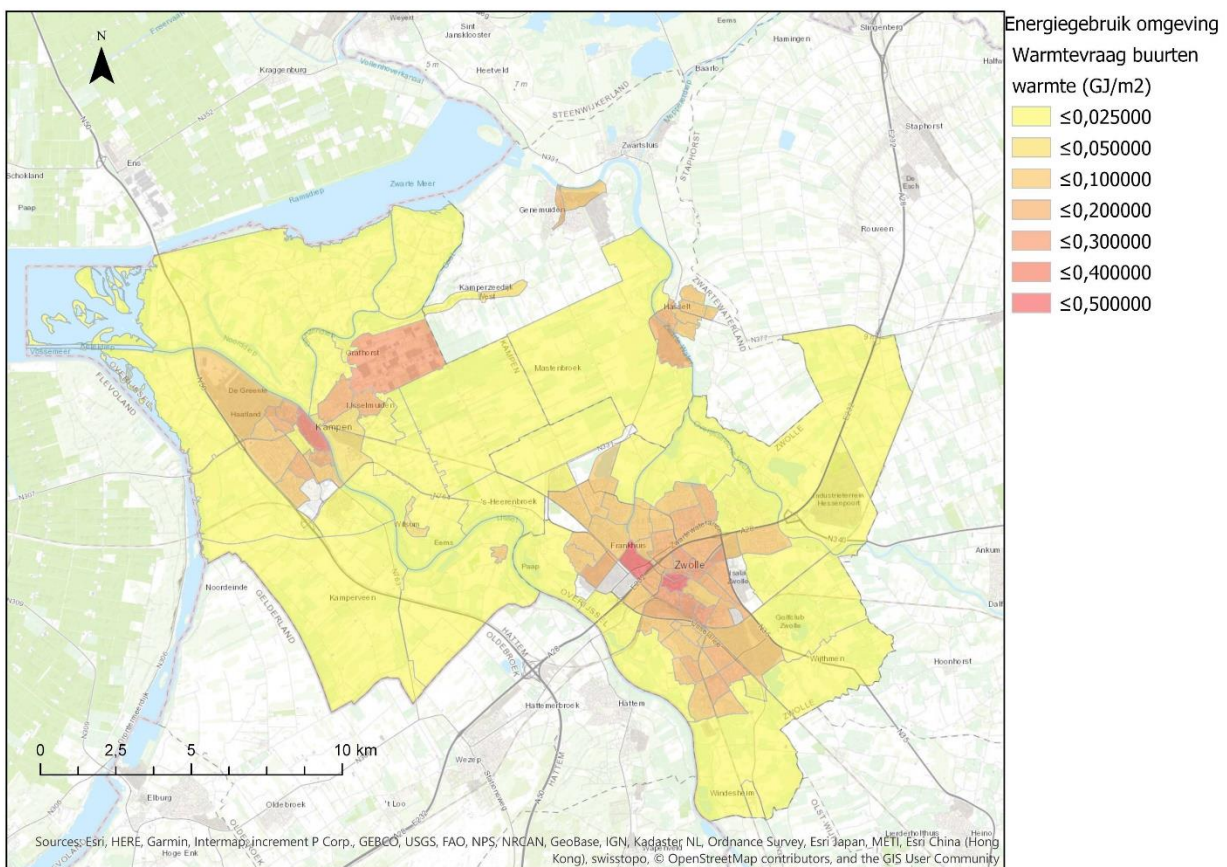
5.1.3 Onderzoek het warmtenetwerk

In de IJsseldelta regio bevinden zich nog geen regionale warmtenetwerken, enkel een paar lokale netwerken in de wijken Stadshagen, Holtenbroek en Aalanden (zie figuur 43). Wanneer we de REAP methodiek, zoals beschreven in paragraaf 2.3, toepassen om deze regio te verduurzamen en warmtenetwerken te ontwikkelen, moet worden begonnen met het verduurzamen van gebouwen op individueel niveau. Daarna kan worden gekeken of er op buurniveau tussen gebouwen of op wijkniveau tussen buurten warmte kan worden uitgewisseld en of er lokale duurzame energieprojecten kunnen worden gerealiseerd. Hierna kan worden gewerkt aan stedelijke en regionale warmtenetwerken.

De IJsseldelta regio kan worden getypeerd als een regio met twee dicht bebouwde kernen (Kampen en Zwolle) en daaromheen clusters met bebouwing (andere dorpen). Een geïntegreerd warmtenetwerk in deze regio zal volgens de theorie uit paragraaf 2.4 een mix aan lijntypes hebben. In de dicht bebouwde kernen een lokaal netwerk met een hoge directheid, korte (semi)-cirkellijnen en tangentele lijnen en veel opname- en afgiftepunten. In de dorpen en perifere gebieden een regionaal netwerk met een hoge structurele verbondenheid, lange diametrale en radiale lijnen en minder opname- en afgiftepunten.

5.1.4 Breng de warmteconsumenten in kaart

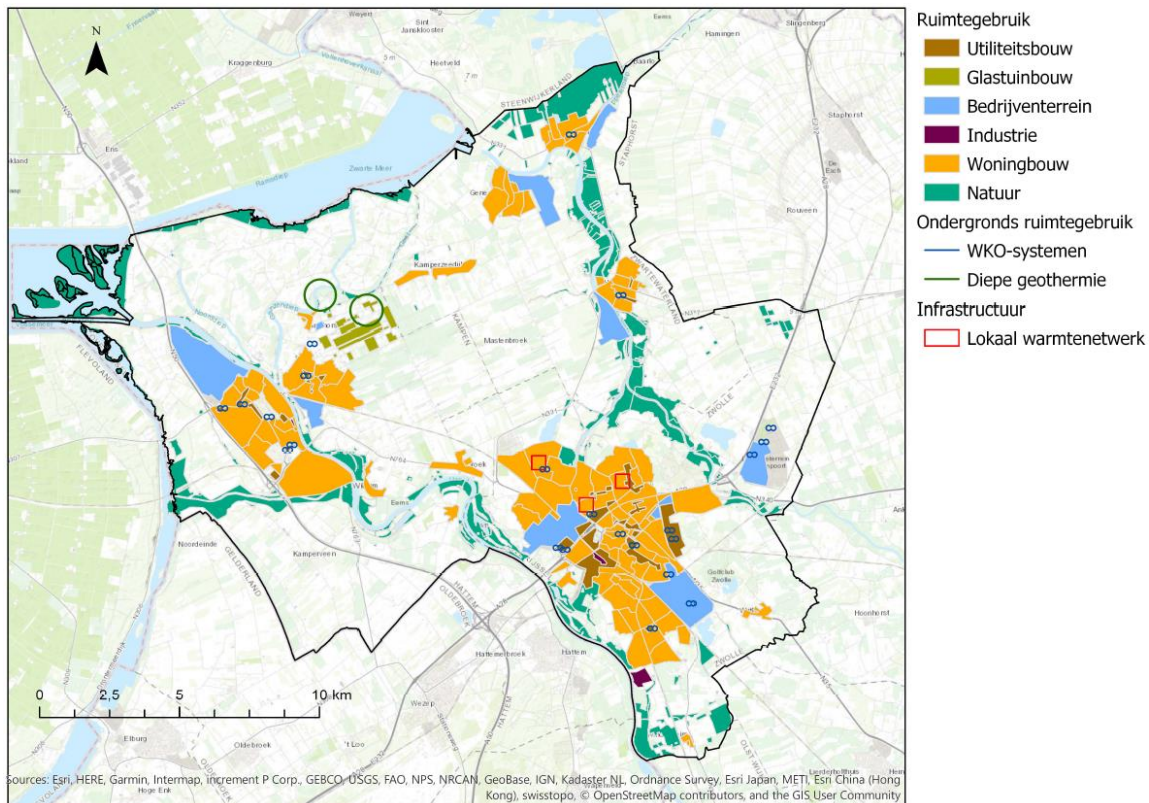
Van de meeste buurten, landelijke gebieden en bedrijventerreinen is in figuur 42 de warmtevraag weergegeven in GJ/m²/jaar.



Figuur 42 Warmtevraag IJsseldeltaregio op basis van gasverbruik

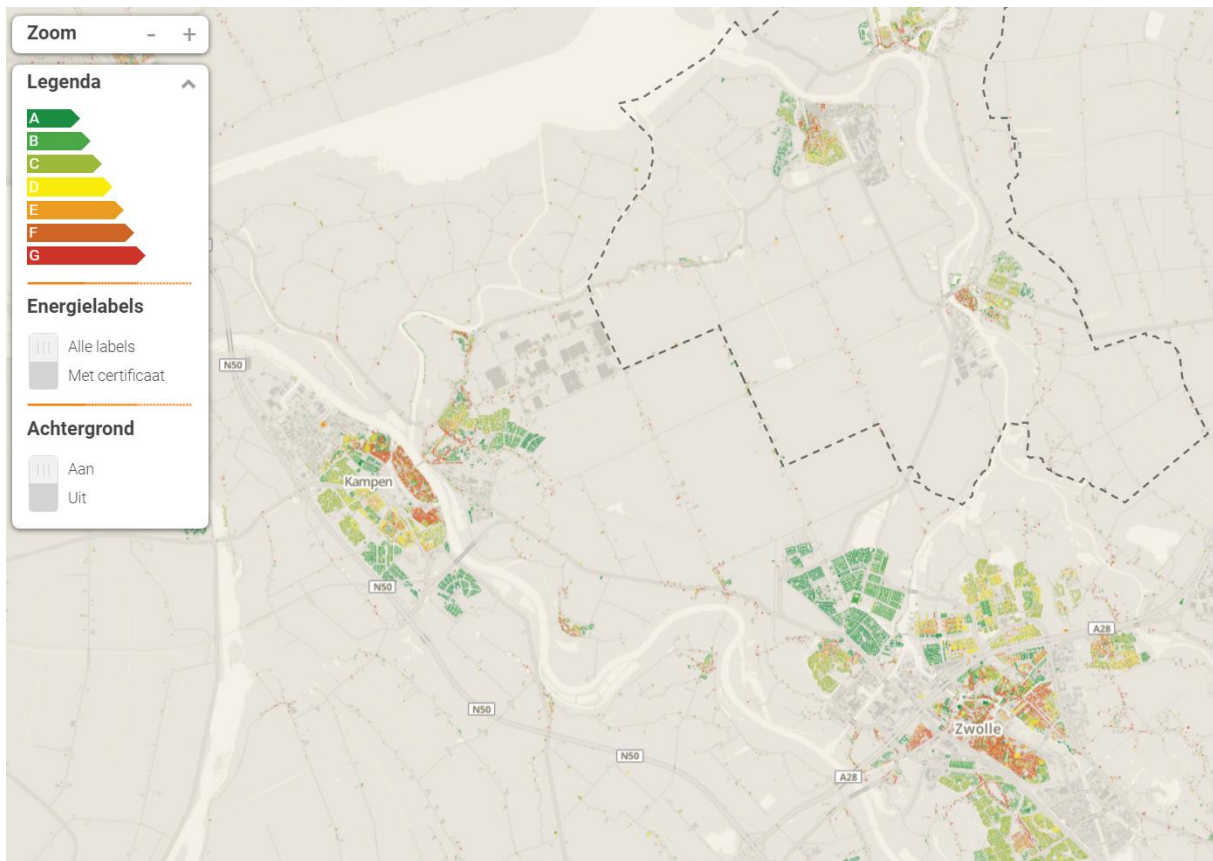
In figuur 43 is schetsmatig het ruimtegebruik weergegeven, waarbij de bebouwing is onderverdeeld in woningbouw, bedrijventerreinen, glastuinbouw en utiliteitsbouw. Dit zijn allen potentiële warmteconsumenten voor geothermiesystemen.

Wat opvalt in figuur 42 is de hoge warmtevraag in de Koekoekspolder, het glastuinbouwgebied boven IJsselmuiden. Daarnaast valt op dat grote gebieden in de regio zijn ingericht als bedrijventerrein. In Zwolle zijn grote oppervlakken met utiliteitsbouw te vinden en ook veel bedrijven met grote kantoorgebouwen welke als utiliteitsbouw kunnen worden bestempeld. Over het algemeen hebben de meeste bedrijventerreinen een laag warmteverbruik per vierkante meter. Het bedrijventerrein Voorst in Zwolle, met o.a. Scania en Abbott Laboratories, heeft wel een hoog energieverbruik. De bedrijven hier verbruiken meer dan 35 m³ aardgas per m² bedrijfsoppervlak (RVO, 2018a).

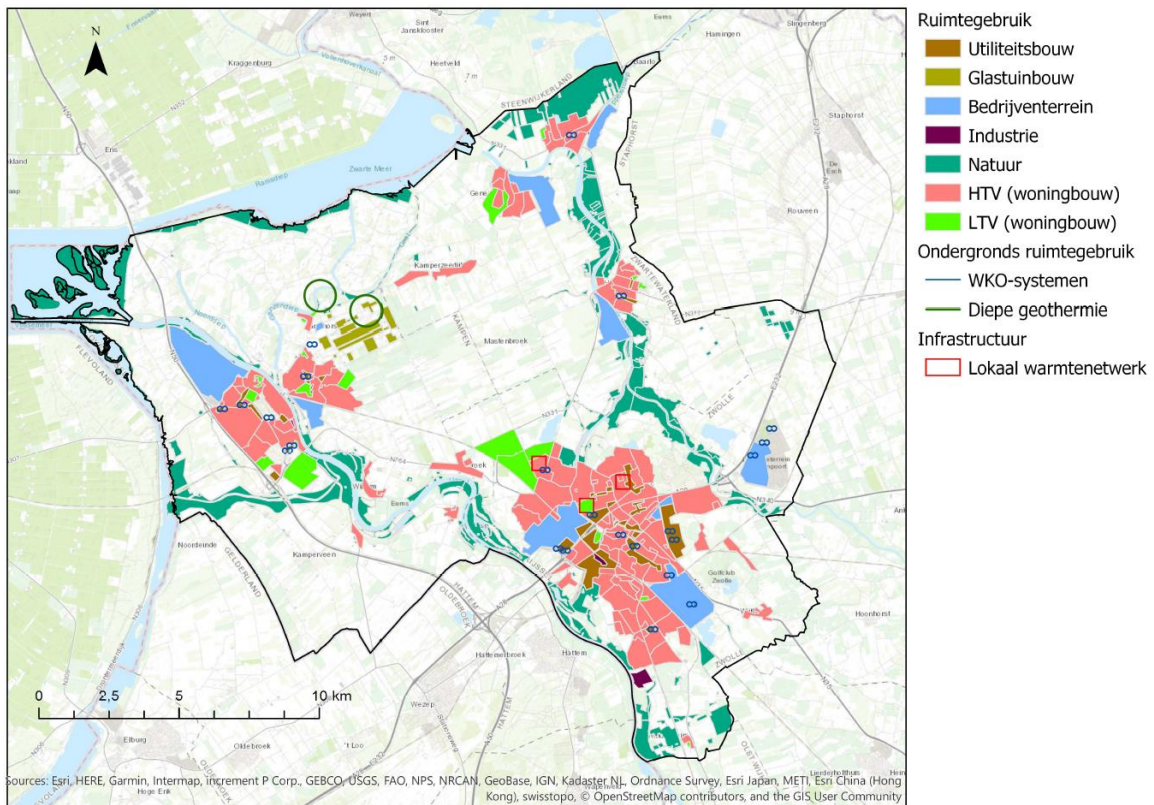


Figuur 43 Basiskaart IJsseldelta regio met geothermiesystemen en warmtenetwerken

In figuur 44 is het energielabel van alle gebouwen in de regio weergegeven (Waag Society, 2019). De energielabels zijn in deze casestudie vergeleken met het bouwjaar om te kunnen inschatten of de gebouwen kunnen worden verwarmd met LTV of HTV. Hierbij valt op dat met name woonwijken die na 1990 zijn gebouwd energielabel C of hoger hebben en woonwijken die na 2000 zijn gebouwd in veel gevallen energielabel A hebben (ESRI, 2018a). Dit komt overeen met de theorie uit paragraaf 4.2. Op basis van deze informatie is ingeschat welke buurten nu al met LTV kunnen worden verwarmd en welke buurten HTV nodig hebben, dit is weergegeven in figuur 45.



Figuur 44 Overzicht energielabels IJsseldelta regio

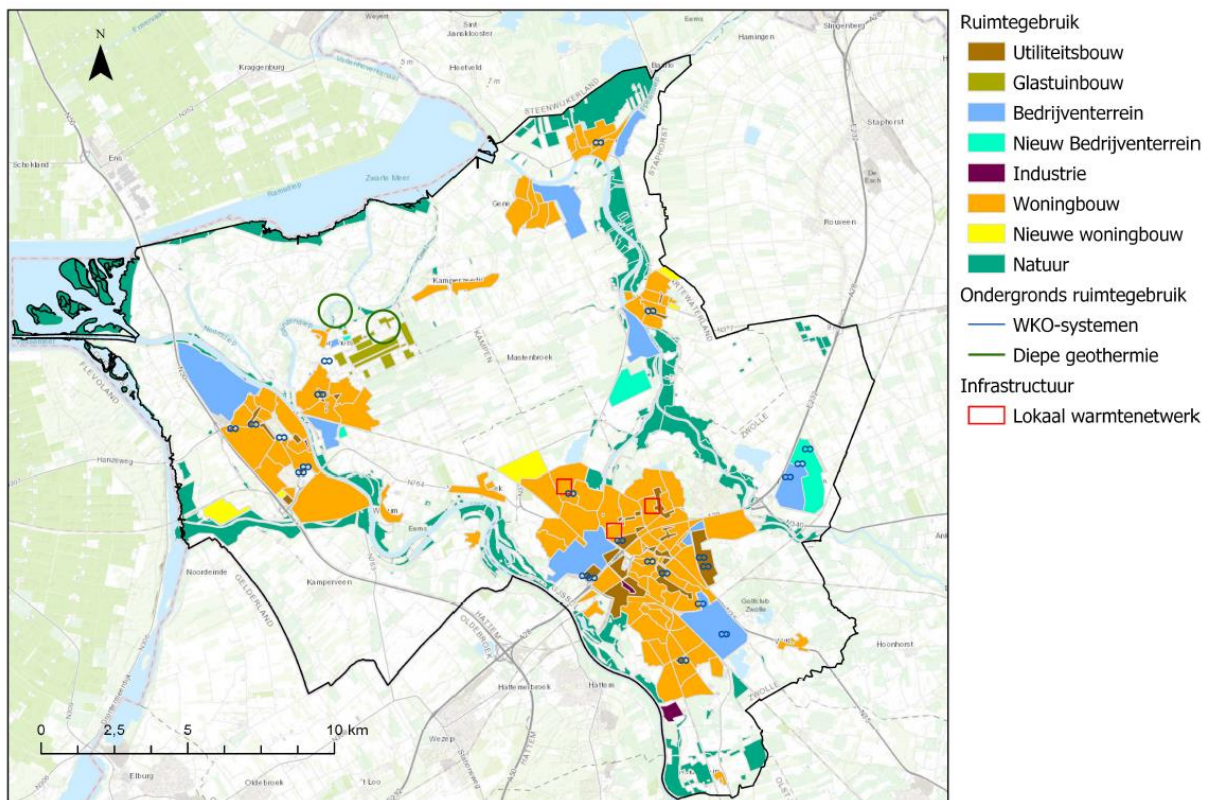


Figuur 45 Overzicht van woningbouw die momenteel door LTV of HTV kan worden verwarmd

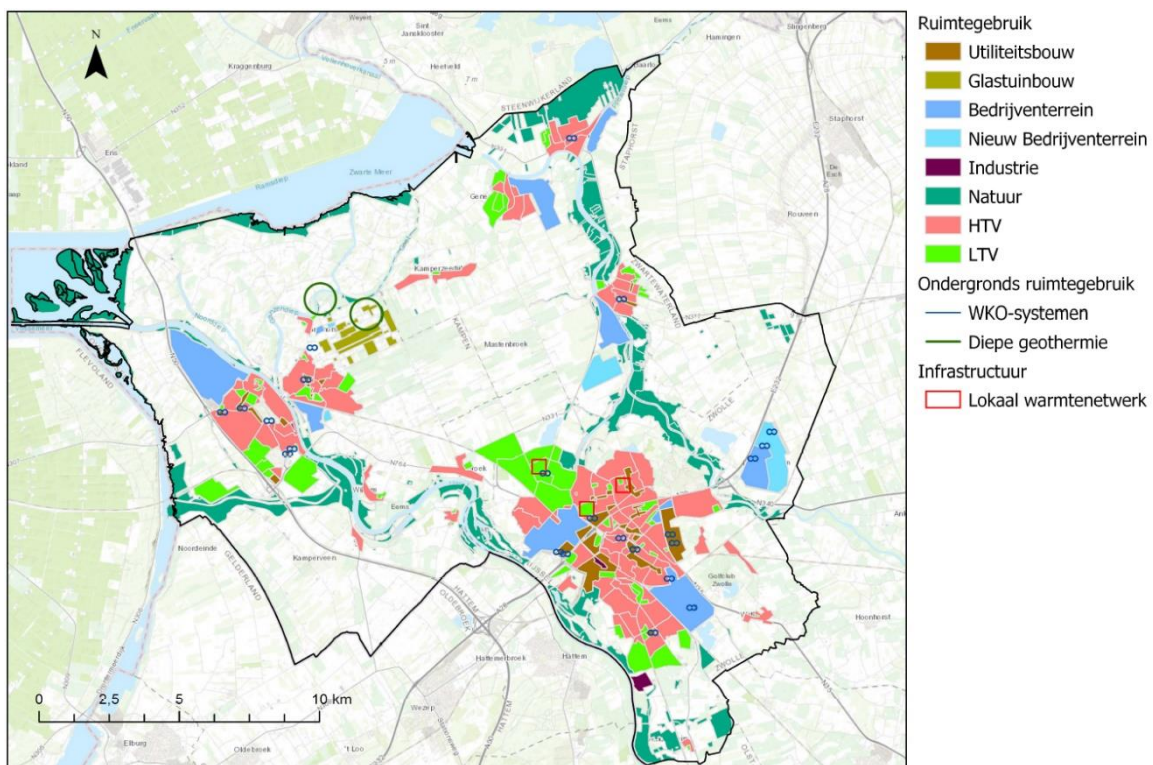
5.2 Nabije-toekomstontwikkelingen

De komende jaren worden er in alle gemeenten in de regio nieuwe woonwijken aangelegd. Daarnaast worden er ook enkele bedrijventerreinen bijgebouwd. Deze nieuwe woonwijken en bedrijventerreinen zijn al vastgelegd in het bestemmingsplan. De nieuwe woonwijken en bedrijventerreinen die op figuur 46 te zien zijn, zijn dan ook overgenomen van de betreffende gemeentelijke bestemmingsplannen (ESRI, 2018). In de gemeente Kampen is de meeste ruimte gereserveerd voor nieuwe woonwijken. De gemeente Zwolle heeft de afgelopen jaren al een grote staduitbreiding gehad met de wijk Stadshagen en hier is in mindere mate nog ruimte gereserveerd voor nieuwe woningen. Nieuwe bedrijventerreinen bevinden zich voornamelijk in de gemeente Zwolle en minder in de andere gemeentes. Met name bij het bedrijventerrein Hessepoort is veel ruimte gereserveerd voor nieuwe bedrijven.

In figuur 45 is te zien dat een aanzienlijk deel van de bestaande woningvoorraad momenteel nog door HTV wordt verwarmd. Een groot deel van deze woningen kan echter in de nabije toekomst ook met lagere aanvoertemperaturen worden verwarmd. Door deze woningen beter te isoleren en te verwarmen met LTV systemen, zoals LT-radiatoren, kunnen lagere aanvoertemperaturen van 40 of 50°C worden behaald (Vliet et al., 2016). Op korte termijn is er binnen de bestaande woningbouw dus een transitie van HTV naar LTV denkbaar. Zoals besproken in paragraaf 4.2 is deze transitie naar LTV op de korte termijn vooral van toepassing op woningen die na 1990 zijn gebouwd en nu een energielabel B hebben (middelgrote isolatie). Deze woningen kunnen in de nabije toekomst een hoge isolatiegraad en energielabel A+ behalen, waardoor zij kunnen worden verwarmd met LTV. In figuur 47 is weergegeven welke buurten op korte termijn door LTV of HTV kunnen worden verwarmd.



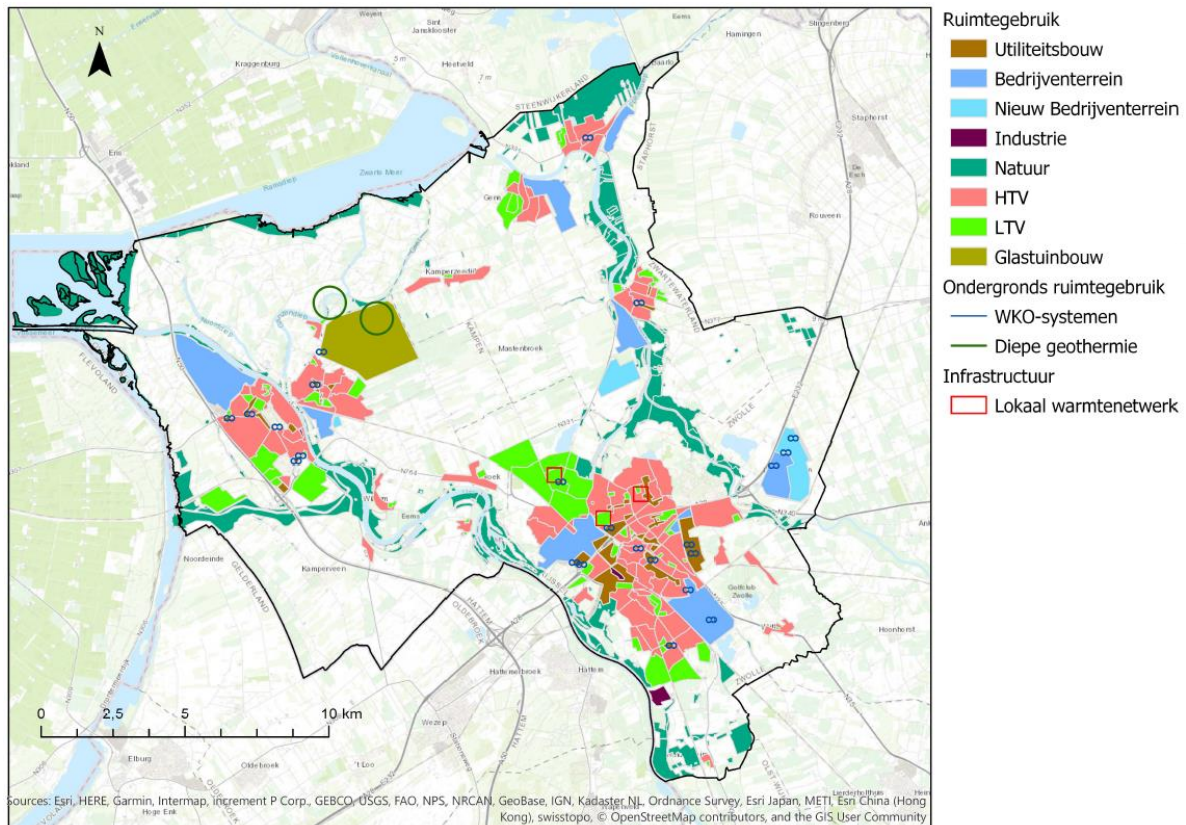
Figuur 46 Basiskaart nabije toekomst



Figuur 47 Basiskaart nabije toekomst, met transitie in de woningbouw van HTV naar LTV

5.3 Mogelijke verre-toekomstbeelden

In figuur 48 is een scenario-basiskaart opgenomen voor het scenario Mondiale Solidariteit. De grootste veranderingen in het landschap zijn enkele nieuwe woonwijken en bedrijventerreinen. Daarnaast zijn er nieuwe tuinbouwkassen aangelegd in het glastuinbouwgebied de Koekoekspolder. Natuurgebieden zijn beschermd en niet in grootte afgenomen. In de energiesector is een verduurzaming zichtbaar. Bestaande gebouwen zijn beter geïsoleerd en hebben betere energielabels. Nieuwbouwwoningen zijn zelfvoorzienend. In figuur 48 is te zien dat een aanzienlijk deel van de woningvoorraad nog steeds door HTV wordt verwarmd, maar dat een aantal buurten zijn overgegaan op LTV door betere isolatie en de toepassing van LTV systemen.



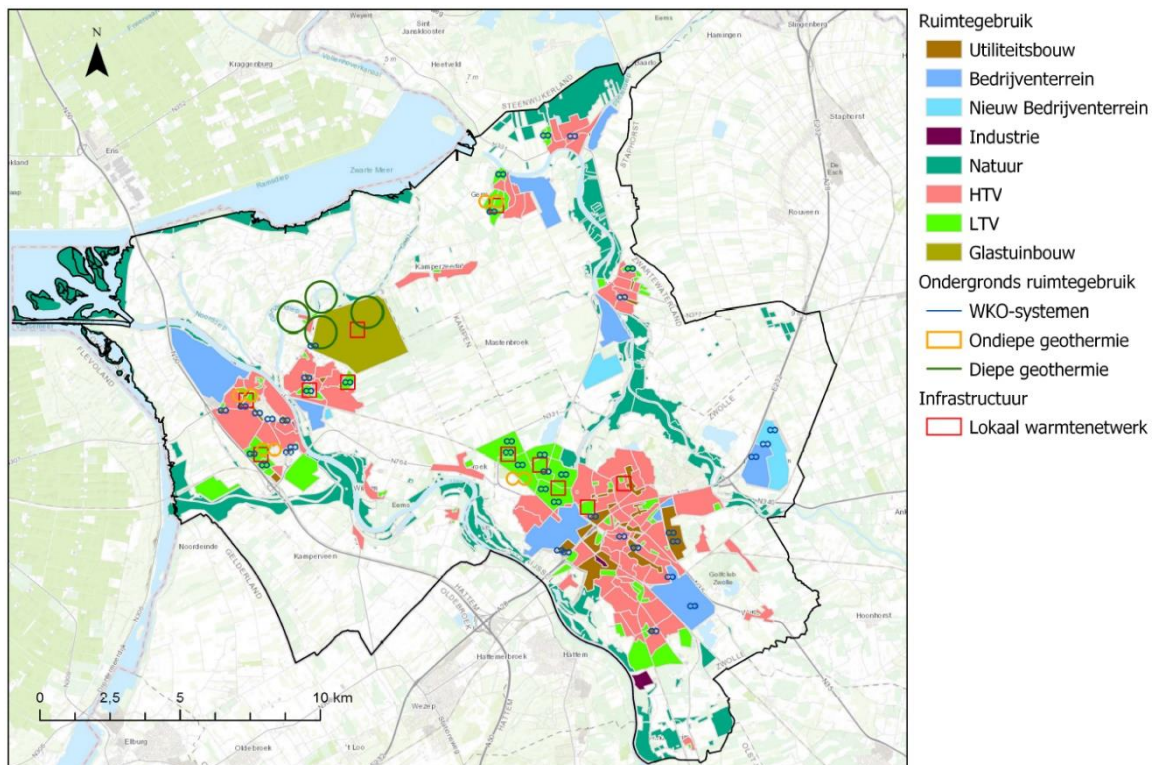
Figuur 48 Scenario-basiskaart

5.4 Energie-ruimtevisies

In de vorige paragrafen is een ruimtelijke en energetische analyse van de IJsseldelta regio uitgevoerd met behulp van de acties uit het raamwerk en de eerste drie stappen van de vijfstappenbenadering conform figuur 22. Nu kan de vierde stap van de vijfstappenbenadering worden uitgevoerd waarin energie-ruimtevisies worden opgesteld voor de IJsseldelta regio. Hierbij wordt inzichtelijk gemaakt hoe potentiële geothermiesystemen kunnen worden verbonden met warmteconsumenten volgens de laatste actie uit het raamwerk, zie ook figuur 22. Onderstaande energie-ruimtevisies zijn gebaseerd op de scenario-basiskaart voor het scenario Mondiale solidariteit, zoals weergegeven in figuur 48.

5.4.1 Energie-ruimtevisie voor 2030

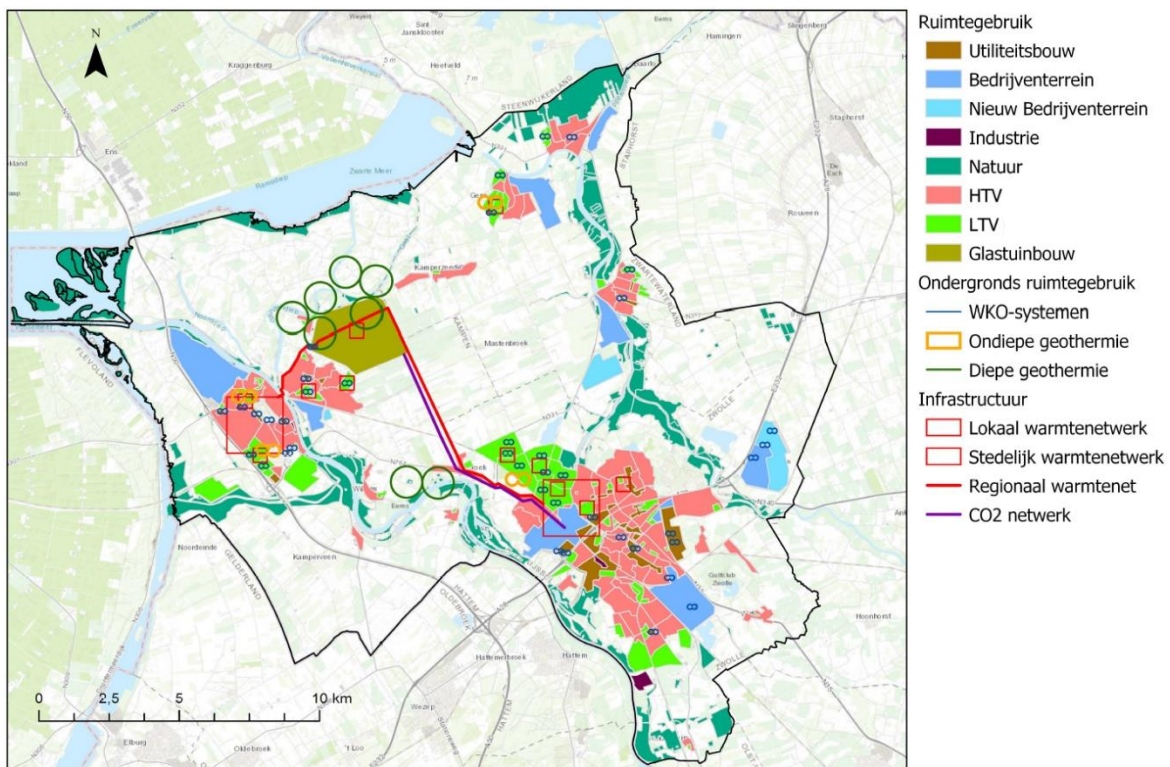
In alle dorpen en steden zijn nieuwe WKO-systemen en nieuwe lokale warmtenetwerken gerealiseerd. Daarnaast zijn in het zuidwesten van de stad Kampen enkele ondiepe geothermie projecten gerealiseerd die warmte leveren aan woningbouw met een LTV warmtenet. Ook in het westen van Genemuiden en Zwolle zijn ondiepe geothermiesystemen gerealiseerd die warmte leveren aan woningen met LTV. In de overige wijken van Zwolle zijn geen nieuwe geothermieputten geboord, omdat deze allen in een grondwater-beschermingsgebied liggen. Alle ondiepe geothermiesystemen gebruiken het Brussel zand als aquifer. In het glastuinbouwgebied de Koekoekspolder is een nieuw geothermiesysteem gerealiseerd met de Rotliedengroep zandsteenlagen als aquifer.



Figuur 49 Energie-ruimtevisie IJsseldelta regio voor 2030

5.4.2 Energie-ruimtevisie voor 2040

De vele lokale warmtenetwerken worden verbonden met een stedelijk warmtenet in Zwolle en Kampen. Er worden nog meer diepe geothermiesystemen gerealiseerd in de Koekoekspolder, omdat het vermogen van diepe geothermiesystemen hier het hoogst is en de glastuinbouw een grote warmtevraag heeft. De Koekoekspolder wordt met een regionaal warmtenet verbonden met de stedelijke netwerken van Zwolle en Kampen om warmte uit te wisselen. Daarnaast wordt er een CO₂ leiding aangelegd van het bedrijventerrein Voorst in Zwolle naar de Koekoekspolder. Doordat de glastuinbouw hier duurzaam wordt verwarmd is er namelijk een grote vraag naar CO₂. Nabij het dorp Wilsum wordt ook een diep geothermiesysteem gerealiseerd en aangesloten op het regionale warmtenet. De Rotliegendegroep zandsteenlagen hebben hier namelijk een iets hogere temperatuur dan in de Koekoekspolder, tussen de 80 en 90°C, en de PRH is hier hoger. Hogere temperaturen kunnen interessant zijn voor warmtelevering aan woningbouw met HTV. De diepe geothermiesystemen in de regio voorzien via het regionale warmtenetwerk in de basislast van de stedelijke warmtenetwerken in Kampen en Zwolle.



Figuur 50 Energie-ruimtevisie IJsseldelta regio voor 2040

5.5 Resultaten

In deze casestudie is het energiesysteem en de ruimtelijke structuur van de IJsseldeltaregio beschreven en inzichtelijk gemaakt in kaarten. Met behulp van het raamwerk is de theorie uit dit onderzoek toegepast tijdens het opstellen van basiskaarten, potentiekaarten en energie-ruimtevisies. Het is gelukt om de stappen uit de vijfstappenbenadering en de acties uit het raamwerk conform figuur 22 te combineren in een casestudie en om middels het raamwerk geothermiesystemen toe te passen in energie-ruimtevisies. Uit de casestudie is gebleken dat er in de IJsseldeltaregio op de lange termijn zowel WKO systemen als ondiepe- en diepe geothermiesystemen kunnen worden ontwikkeld. In het volgende hoofdstuk wordt verder gereflecteerd op de resultaten van dit onderzoek en de effectiviteit van het raamwerk voor het behalen van deze resultaten.

6. Conclusie

In dit onderzoek is binnen een research by design proces een raamwerk voor geothermie vormgegeven. Hiervoor is eerst een literatuurstudie uitgevoerd over de eigenschappen van de verschillende soorten geothermie in Nederland. Om de literatuur te kunnen gebruiken bij het opstellen van energie-ruimtevisies is getracht om deze literatuur te duiden in een raamwerk voor geothermie. De inzet van dit raamwerk is inzichtelijk gemaakt en uitgetoet tijdens het opstellen van energie-ruimtevisies voor de IJsseldelta regio. In dit hoofdstuk wordt eerst middels de literatuurstudie en de bevindingen uit de pre-design fase antwoord gegeven op de deelvragen van dit onderzoek. Ook wordt gereflecteerd op de resultaten van de casestudie en de effectiviteit van het raamwerk tijdens de design fase. Daarna wordt als onderdeel van de post-design fase op basis hiervan antwoord gegeven op de hoofdvraag van het onderzoek. De deelvragen van het onderzoek luiden als volgt:

Welke soorten geothermiesystemen zijn er in Nederland?

In dit onderzoek zijn drie verschillende hydrothermische geothermiesystemen gedefinieerd op basis van de diepteligging van de aquifer en de ordening van de ondergrond volgens Oomes (2012). Daarnaast is kort beschreven wat voor andere geothermiesystemen er nog meer mogelijk zijn. In grote lijnen zijn er duidelijke verschillen tussen de diepteligging en de temperatuur van de Noordzeegroep zanden en de dieper gelegen Onder Triasgroep, Rijnlandgroep en Rotliegendegroep zandsteenlagen. De Noordzeegroep zanden komen voor tot een diepte van ongeveer 1000m (Wong et al., 2007). Dit komt overeen met de dieptegrens van de matig diepe ondergrond volgens Oomes (2012). WKO-systemen komen volgens Hellebrand et al. (2012) voor tot een diepte van 250m en ondiepe geothermie systemen tot een diepte van 1000m. WKO- en ondiepe geothermie-systemen kunnen dus vooral worden toegepast in de Noordzeegroep zanden en diepe geothermiesystemen meer in de diepere zandsteenlagen (>1000m diep).

Wat zijn de ruimtelijke eigenschappen van de geothermiesystemen?

Over het algemeen nemen geothermiesystemen bovengronds weinig ruimte in beslag. Ondiepe en diepe geothermiesystemen moeten wel op enkele tientallen meters afstand worden geplaatst van plekken waar mensen wonen en werken, vanwege veiligheidscontouren (Schoof, 2014). Geothermiesystemen nemen vooral ondergronds veel ruimte in beslag. Hierbij is er een sterk onderscheid zichtbaar tussen de drie verschillende soorten geothermiesystemen. Dieper gelegen geothermiesystemen hebben meer ruimte nodig dan ondiepere vormen van geothermie. Volgens Van Kann (2015) hebben geothermiesystemen een hoge locatiegebondenheid in vergelijking met andere vormen van duurzame energie. Ook hier zijn echter duidelijke verschillen zichtbaar tussen de drie geothermiesystemen. Diepe geothermie heeft een hogere locatiegebondenheid dan WKO en ondiepe geothermie. Dit komt onder andere doordat diepe geothermiesystemen een hoger thermisch vermogen hebben (Lako et al., 2013) en daardoor meer en grotere warmteconsumenten nodig hebben. Daarnaast is het voorkomen van een geschikte diepe aquifer ook meer afhankelijk van een specifieke locatie met een goede ondergrond (Wong et al., 2007).

Wat zijn de exergetische eigenschappen van de geothermiesystemen?

Wanneer de exergetische eigenschappen van de drie geothermiesystemen inzichtelijk worden gemaakt zijn de voordelen van diepe geothermiesystemen duidelijk zichtbaar. Diepe geothermiesystemen leveren hogere thermische vermogens en hogere temperaturen dan WKO- en ondiepe geothermiesystemen. Hierdoor zijn er voor diepe geothermiesystemen veel meer potentiële warmteconsumenten denkbaar, waaronder veel industriële en agrarische processen met een hoge warmtevraag. WKO-systemen kunnen met name warmte leveren aan de bebouwde omgeving en ondiepe geothermiesystemen mogelijk ook aan de glastuinbouw (Hellebrand et al., 2012).

Hoe kunnen geothermiesystemen worden verbonden met warmteconsumenten?

Volgens Gommans (2010) is geothermie in de ondergrond opgeslagen energie die direct inzetbaar is wanneer er warmtevraag is. Daardoor kan geothermie concurreren met andere vormen van opgeslagen energie zoals biomassa en aardgas (Gommans, 2010). Uit dit onderzoek is gebleken dat er wel beperkingen zitten aan de inzetbaarheid van geothermie. Wanneer geothermiesystemen worden verbonden met warmteconsumenten zijn zaken als leveringszekerheid en back-up- en piekvoorzieningen van belang. Veel warmteconsumenten, zoals de woningbouw, hebben namelijk een hoge warmtevraag in de winter en een lage warmtevraag in de zomer. Geothermiesystemen kunnen beter een constante hoeveelheid warmte leveren en kunnen bij hoge

pieken in de winter niet plotseling veel meer bronwater verpompen. Hierdoor moet al snel aanspraak worden gemaakt op een piekvoorziening, zoals gasketels. Ook kunnen geothermiesystemen bij een lage warmtevraag in de zomer de overtollige warmte opslaan in HTO systemen, welke als piekvoorziening in de winter kunnen worden ingezet (Wesselink et al., 2018). Het is dus belangrijk dat het warmteaanbod van geothermiesystemen aansluit op de warmtevraag van warmteconsumenten en dat bij pieken in de warmtevraag andere warmtebronnen kunnen worden ingezet. Voor WKO-systemen is het van belang dat er zowel een warmte- als een koudevraag is. Daarnaast is met name bij ondiepe en diepe geothermiesystemen een goede back-up voorziening van belang voor de leveringszekerheid. Wanneer ondiepe en diepe geothermieputten uitvallen kan onderhoud namelijk veel tijd in beslag nemen (Schoof, 2014). Daarmee zijn ondiepe- en diepe geothermiesystemen minder geschikt om in een one-to-one relatie warmte te leveren aan warmteconsumenten en werken zij beter in een one-to-many of many-to-many relatie.

Welke andere ruimtelijke functies kunnen conflicteren met geothermiesystemen?

De Nederlandse ondergrond is op sommige dieptes al vrij vol en wordt voor veel verschillende functies gebruikt. Daarnaast zijn er grondwater- en natuur beschermingsgebieden waar boren niet of in beperkte mate is toegestaan (I&W & EZ&K, 2018). De dieptes waarop WKO-systemen functioneren zijn al veelvuldig in gebruik door andere functies, zoals grondwaterwinning. Ondiepe geothermiesystemen opereren daarentegen op een diepte die nog voor weinig andere toepassingen wordt gebruikt en waar nog veel ruimte beschikbaar is. Ook voor diepe geothermiesystemen is er nog veel ruimte, maar er moet wel rekening worden gehouden met het grote ruimtebeslag van zowel diepe geothermiesystemen als andere functies op deze diepte zoals gas- en zoutwinning.

Is het mogelijk om de eigenschappen van de geothermiesystemen te duiden in een raamwerk?

In grote lijnen zijn er duidelijk verschillen zichtbaar tussen de drie vormen van geothermie: WKO, ondiepe en diepe geothermie. De drie geothermiesystemen hebben verschillende ruimtelijke, exergetische en functionele eigenschappen. Deze eigenschappen zijn van belang om te bepalen hoe en waar geothermiesystemen kunnen worden aangelegd en met welke warmteconsumenten zij kunnen worden verbonden. Deze eigenschappen kunnen worden samengevat in een raamwerk door de bevindingen uit de literatuur overzichtelijk weer te geven en te beschrijven hoe en waarvoor deze informatie kan worden toegepast. Gezien de vele aspecten en detail informatie is het lastig om alle bevindingen te bundelen en wordt in het raamwerk verwezen naar uitgebreidere beschrijvingen en literatuur. Daarnaast is het raamwerk in dit onderzoek een kader waar nog veel detail informatie aan kan worden toegevoegd.

Kan dit raamwerk worden ingezet bij het opstellen van energie-ruimtevisies?

De methodiek en literatuur binnen het raamwerk kan worden toegepast bij het opstellen van energie-ruimtevisies. Met behulp van het raamwerk kan worden bepaald waar en wanneer welk type geothermiesysteem kan worden toegepast. Ook kunnen de warmteconsumenten op een bepaalde manier in beeld worden gebracht, waardoor snel kan worden ingeschat of hun warmtevraag aansluit bij het warmteaanbod van geothermiesystemen. Zo kon met behulp van warmtekaarten, die de warmtevraag in GJ/m²/jaar weergeven, makkelijk worden ingeschat of de warmtevraag intensief en groot genoeg was om warmte te kunnen leveren met geothermiesystemen. Dit is met name van belang voor diepe geothermiesystemen, omdat zij op een groter schaalniveau warmte leveren. Ook kon met behulp van energielabel- en bouwjaar kaarten en de literatuur uit hoofdstuk 4.2 worden ingeschat of woonwijken geschikt zijn voor LTV en warmtelevering middels WKO of ondiepe geothermie. Daarnaast droeg de literatuur over de ruimtelijke eigenschappen van geothermiesystemen uit hoofdstuk 4.3 bij aan een beter begrip van de ruimtelijke implicaties van geothermie. Ook hiervoor bleek de literatuur binnen het raamwerk bruikbaar.

Wanneer het raamwerk wordt toegepast om energie-ruimtevisies op te stellen komen echter ook de beperkingen van een raamwerk naar voren en rijst de vraag of geothermie wel te definiëren is binnen een overkoepelend raamwerk. De eigenschappen van de geothermiesystemen en de verschillen tussen de geothermiesystemen zijn in de praktijk minder duidelijk dan in de theorie van hoofdstuk 4. Zo zijn geothermiesystemen niet geheel eenduidig te definiëren op basis van de diepte en temperatuur van de aquifer, zoals is gedaan in paragraaf 4.1. In de casestudie is bijvoorbeeld gebleken dat aquifers binnen de Noordzeegroep zanden in de IJsseldelta regio tot wel 1500m diep liggen. Het is dan niet eenduidig of geothermiesystemen met aquifers binnen de Noordzeegroep zanden worden geclassificeerd als ondiepe geothermie of diepe geothermie. De keuze voor een ondiepe of diepe classificatie is afhankelijk van de uitkomsten van de casestudie en zal verschillen per ontwerpproces. Dit maakt het vooraf classificeren van

geothermiesystemen vrijwel onmogelijk en misschien wel overbodig. Daarnaast zijn ook de warmteconsumenten niet eenduidig te definiëren en toe te rekenen aan een bepaald type geothermiesysteem. De aanvoertemperatuur en de warmtevraag vanuit warmteconsumenten kan veranderen gedurende de jaren en het beschikbare temperatuurinterval vanuit geothermiesystemen kan worden opgewaardeerd door de inzet van warmtepompen.

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

Hoe kunnen geothermiesystemen worden toegepast in energie-ruimtevisies?

Uit de literatuurstudie over de verschillende geothermiesystemen en het opstellen van het raamwerk is gebleken dat geothermie niet makkelijk te definiëren is. Bij het in kaart brengen van de potentie en de mogelijkheden van geothermie moet met veel aspecten rekening worden gehouden. Er moet worden gekeken naar de potentie van aquifers voor geothermie op verschillende dieptes. Ook moeten zowel de huidige als de toekomstige eigenschappen van warmteconsumenten inzichtelijk worden gemaakt met betrekking tot de warmtevraag en aanvoertemperatuur. Zo kan de verwarming van de bebouwde omgeving in de loop der jaren veranderen van hoge temperatuur verwarming naar lage temperatuur verwarming (Vliet et al., 2016). Tevens is het belangrijk rekening te houden met de huidige status en toekomstige ontwikkeling van het warmtenetwerk in de regio.

De toepassing van geothermiesystemen in energie-ruimtevisies is niet enkel een kwestie van het verbinden van warmteconsumenten met geothermiesystemen. Er moet een strategie worden opgesteld voor de aanleg van geothermiesystemen en de uitrol van het warmtenetwerk in de regio. Hiervoor moet er conceptueel worden gedacht en rekening worden gehouden met toekomstige ontwikkelingen in de regio. Deze ontwikkelingen kunnen van invloed zijn op de mogelijkheden voor geothermie in de regio en de effectiviteit van geothermiesystemen op de lange termijn. Bij het opstellen van energie-ruimtevisies volgens de vijfstappenbenadering wordt zowel rekening gehouden met ontwikkelingen in de nabije toekomst als mogelijke verre toekomstbeelden en bewuste veranderingen/interventies in de ruimtelijke ordening (Broersma et al., 2011).

In dit onderzoek zijn energie-ruimtevisies met geothermiesystemen opgesteld met behulp van het raamwerk en de vijfstappenbenadering. Voor het in kaart brengen van de verduurzaming van de bebouwde omgeving is met name de REAP methode gevolgd, zoals beschreven door Dobbelsteen et al. (2011). Dit betekent in de praktijk dat er eerst verduurzaming op een kleine schaal plaatsvindt en daarna op een steeds grotere schaal. Er worden eerst warmtenetwerken en geothermiesystemen op buurt- en wijkniveau ontwikkeld en daarna op een stedelijke of regionale schaal (Dobbelsteen et al., 2011). Deze methode blijkt nuttig om de mogelijkheden en werkelijke potentie van geothermie voor een regio op de lange termijn in kaart te brengen. Zo is een regionaal warmtenetwerk op de korte termijn niet haalbaar maar op de lange termijn mogelijk wel, waardoor ook locaties voor geothermiesystemen die ver verwijderd zijn van warmteconsumenten potentie kunnen hebben.

Een nadeel van de REAP methode is wel dat er op de korte termijn vooral wordt gekeken naar WKO en ondiepe geothermie in combinatie met kleinschalige warmtenetwerken, waardoor diepe geothermie pas op de lange termijn een serieuze rol krijgt. Dit komt doordat de REAP methode op de korte termijn focust op kleinschalige ingrepen en voor diepe geothermie al gauw grootschalige ingrepen nodig zijn zoals de ontwikkeling van een warmtenetwerk op wijk- of stadniveau. Het is dan ook de vraag of voor het in kaart brengen van de verduurzaming van de bebouwde omgeving perse gebruik moet worden gemaakt van een bepaalde methodiek. Er kan ook worden gekozen voor een open ontwerpproces waarin steekproefsgewijs gebouwen of wijken worden gekoppeld aan geothermiesystemen en zo worden verduurzaamd.

7. Discussie en Reflectie

In dit hoofdstuk wordt gereflecteerd op enkele theorieën en methodieken uit dit onderzoek en op het onderzoeksproces in het algemeen. Ook worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

In dit onderzoek zijn eerst enkele begrippen, theorieën en concepten die betrekking hebben op exergieplanning, geothermie en energie-ruimtevisies beschreven in een theoretisch kader. Op basis hiervan is vervolgens literatuur verzameld over de eigenschappen van verschillende geothermiesystemen, welke nuttig kan zijn bij het opstellen van energie-ruimtevisies. Deze literatuurstudie is aangevuld met enkele acties en vormt een raamwerk voor de toepassing van geothermiesystemen in energie-ruimtevisies. Het functioneren van dit raamwerk is inzichtelijk gemaakt binnen een casestudie, welke bestond uit het opstellen van energie-ruimtevisies voor de IJsseldeltaregio met behulp van dit raamwerk. In hoofdstuk 6 is al besproken dat dit raamwerk en de toegepaste theorie uit dit onderzoek van meerwaarde waren bij het opstellen van energie-ruimtevisies. Er zijn echter wel aandachtspunten met betrekking tot het doel van het raamwerk, potentiekaarten en energie-ruimtevisies en de toepassing van sommige methodieken.

Het raamwerk heeft als doel om duurzame energielandschappen met geothermiesystemen vorm te geven in energie-ruimtevisies. Met behulp van het raamwerk kan op basis van literatuur en data worden bepaald hoe potentiële locaties voor geothermiesystemen in kaart worden gebracht. De werking van het raamwerk is daarmee in essentie technisch rationeel en gefocust op de toepassing van geothermiesystemen. De ontwikkeling van andere ondergrondse functies is niet meegenomen in het raamwerk en dit maakt het raamwerk minder geschikt voor (ondergrondse) ruimtelijke ordening vraagstukken. Onderdeel van de ruimtelijke ordening is namelijk het toebedelen van ruimte aan functies op basis van onder andere de maatschappelijke behoefte, de beschikbare ruimte en de kwaliteit van de ruimte (I&W & EZ&K, 2018). Binnen het raamwerk wordt wel rekening gehouden met ondergrondse ruimte die nu al bezet is door andere ondergrondse functies, maar niet met toekomstige functies in de ondergrond, zoals nieuwe gasputten of CO₂ opslag. Volgens Herber (2011) raakt de Nederlandse ondergrond echter steeds voller en moeten er afwegingen worden gemaakt op basis van de risico's, tijdsduur en waarde van nieuwe ondergrondse functies. Hebben geothermiesystemen bijvoorbeeld een grotere maatschappelijke waarde dan de ondergrondse opslag van CO₂? Het huidige raamwerk neemt geen andere potentiële ondergrondse functies mee in de beoordeling welke locaties geschikt zijn voor geothermiesystemen. Daarmee is het doel van het raamwerk gericht op de toepassing van geothermiesystemen en biedt het in de huidige vorm geen kader om afwegingen te maken tussen verschillende toekomstige ondergrondse functies.

Bij het inzichtelijk maken van de potentie van geothermie is het belangrijk om in gedachten te houden wat het doel is van de potentiekaarten en energie-ruimtevisies. Volgens Kramers et al. (2012) kan de potentie van geothermie in kaart worden gebracht door de PRH te vergelijken met de bovengrondse warmtevraag in GJ/m²/jaar. De PRH houdt echter geen rekening met permeabiliteit en transmissiviteit. Voor de huidige manier van warmtewinning met geothermieputten in Nederland zijn dit wel belangrijke variabelen. TNO (2018) heeft voor aquifers die potentie hebben voor geothermie het haalbare thermische vermogen berekend, waarbij rekening wordt gehouden met permeabiliteit en transmissiviteit en een standaard putontwerp met een beperkte pompdruk. In Hoofdstuk 5 is te zien dat bij sommige aquifers de gebieden met een hoge PRH sterk afwijken van de gebieden met een hoog thermisch vermogen. Het is dus lastig om te definiëren welke gebieden nu werkelijk een hoge potentie hebben voor geothermie. Wanneer het doel is om geschikte plekken te vinden voor geothermiesystemen op de korte termijn kan waarschijnlijk beter worden gekeken naar het haalbare thermische vermogen volgens een standaard putontwerp. Wanneer echter het doel is om de potentie van geothermie op de lange termijn inzichtelijk te maken kan mogelijk beter worden gekeken naar de PRH. In gebieden met een hoge PRH maar een lage permeabiliteit en transmissiviteit kan allicht met nieuwe technieken of andere putontwerpen het thermische vermogen worden verhoogd (Nitters et al., 2016) of kan de permeabiliteit en transmissiviteit worden versterkt door het zandgesteente te fracken (Kramers et al., 2012).

Voor de literatuurstudie van dit onderzoek is voornamelijk gebruik gemaakt van algemene informatie over geothermiesystemen en geschikte aquifers in Nederland. Wanneer meer in detail wordt gekeken naar een specifieke aquifer worden de eigenschappen van deze aquifer en de geothermiesystemen mogelijk anders gedefinieerd. Daarnaast is voor de casestudie die binnen dit onderzoek is uitgevoerd vooral gebruik gemaakt van geothermie potentie kaarten vanuit ThermoGis. Deze kaarten zijn opgesteld op basis van publiekelijk

beschikbare geologische data (TNO, 2018). Door alleen gebruik te maken van openbare data is het makkelijker om de casestudie te reproduceren voor andere regio's in Nederland. Door locatie specifiek geologisch onderzoek uit te voeren of aanvullende geologische data van mijnbouwbedrijven te gebruiken kunnen er echter gedetailleerde kaarten worden opgesteld die een beter beeld geven van de potentie van geothermie in een regio.

Verder is de casestudie binnen dit onderzoek beperkt tot een visualisatie van energie-ruimtevisies met behulp van GIS-kaarten. Er is geen uitgebreid proces doorlopen in een team met meerdere disciplines en er zijn ook niet meerdere energie-ruimtevisies opgesteld voor meerdere scenario's. Bij een uitgebreidere casestudie kunnen er mogelijk andere conclusies worden getrokken over de werking en effectiviteit van het raamwerk en de vijfstappenbenadering voor het opstellen van energie-ruimtevisies met geothermie. Hierbij kan een voorbeeld worden genomen aan uitgebreidere casestudies volgens de vijfstappenbenadering die voor de regio's Zuid-Limburg en Zuidoost-Drenthe zijn opgesteld binnen het onderzoek van Van Kann (2015) en Broersma et al. (2011). Bij een uitgebreidere casestudie met een team van beleidsmedewerkers en energie-experts kan mogelijk ook worden onderzocht wat andere deelnemers vinden van het raamwerk en de informatie over geothermie binnen dit onderzoek. Daarnaast kan worden gekeken welke synergiën er mogelijk zijn tussen geothermie en andere duurzame warmtebronnen.

Andere aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn onder andere een verdieping in de productiekosten van geothermie en de prijs die warmteconsumenten betalen voor warmte. Zo zal een kilometerslange warmteleiding niet altijd economisch zijn wanneer er niet genoeg kan worden verdiend aan de warmtelevering. Hierbij kunnen de productiekosten van geothermie ook worden vergeleken met andere duurzame warmtebronnen, om te bepalen wanneer wat de beste optie is. Ook kan er in een vervolgonderzoek worden gekeken naar de instituties die geothermiesystemen kunnen realiseren en waar bij de ontwikkeling van geothermie rekening mee moet worden gehouden. Het raamwerk voor geothermie binnen dit onderzoek is dan ook nog maar een concept, een kader waar nog veel informatie aan kan worden toegevoegd.

8. Literatuurlijst

- Baisch, S., Koch, C., Stang, H., Pittens, B., Drijver, B. & Buik, N. (2016). *Defining the Framework for Seismic Hazard Assessment in Geothermal Projects V0.1 - Technical Report*. Arnhem: KennisAgenda Aardwarmte
- Beek, D., De Boer, S., Braakhekke, M., Buik, N. (2014). *Kansen voor Hogetemperatuuropslag en Geothermie*. Assen: Provincie Drenthe.
- Bonté, D., Van Wees, J.-D. & Verweij, J.M. (2012). Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 91(4), 491-515.
- Bot, B. & Zwamborn, M. (2013). Open WKO-systemen B: Thermisch gedrag. *Stromingen*, 19 (3&4)
- Bot, B. & Zwamborn, M. (2013a). Open WKO-systemen C: Hydraulisch gedrag en optimale configuraties. *Stromingen*, 19 (3&4)
- Bouwmeester, H. (2013). *Wko 3x beter*. Lente Akkoord.
- Braak, N.J., Kempkes, F.L.K., Knies, P., Lokhorst, A., Vernooij, C.J.M. (2001). *Toepasbaarheid van aquifers in de glastuinbouw voor aardwarmtewinning en warmteopslag*. Wageningen: Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)
- Broersma, S., Fremouw, M. & Van den Dobbelsteen, A. (2011). *Synergie tussen Regionale Planning en Exergie: SREX*. Delfgauw: NIVO.
- CBS (2018). Totale oppervlakte. Geraadpleegd op 26-12-2018 via <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70262ned/table?ts=1545860422460>
- CBS (2018a). Bevolking. Geraadpleegd op 26-12-2018 via <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70072ned/table?ts=1545861463802>
- Clifford, N., French, S. & Valentine, G. (2010). *Key methods in geography*. Glasgow: Bell and Bain Ltd.
- De Taskforce WKO (2009). *Groen licht voor bodemenergie*. Den Haag: Ministerie VROM
- Demir, A. (2013). *Energieverbruik van huishoudens gepeild -de complexe relatie 'woning-huishouden-energie' in de sociale huursector nader onderzocht*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
- Dobbelsteen, A., Tillie, N., Fremouw, M., Wisse, K., Doepel, D., Genten, L., Dorst, M., Hobma, F. & Daamen, T. (2011). *REAP2 – Rotterdamse EnergieAanpak en –Planning 2: technische, ruimtelijke, sociale, juridische en strategische uitwerking van het REAP-model, toegepast in de Merwe-Vierhavens*. Delft/ Rotterdam/ Den Haag: TU Delft / DSA / DWA.
- Doornenbal, J.C., Pagnier, H.J.M. (2004). *Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands – onshore*. Utrecht: National Institute of Applied Geoscience TNO – National Geological Survey.
- Dreesen, R. & Laenen, B. (2010). *Technology watch: geothermie en het potentieel in Vlaanderen*. Mol: VITO NV
- EL&I (2011). *Actieplan Aardwarmte*. The Hague: Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie
- Energie in Beeld (2018). Energie in beeld. Geraadpleegd op 18-12-2018 via <https://www.energieinbeeld.nl/>
- ESRI (2018). Basisregistraties - Bestemmingsplannen. Geraadpleegd op 19-12-2018 via <https://www.arcgis.com/home/group.html?id=225f471fb06f4a6d86ec72fcaeb36fe3#overview>
- ESRI (2018a). BAG - Basisregistratie Adressen en Gebouwen. Geraadpleegd op 19-12-2018 via <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=822dff944ec5451bb053f5969a92df41>

- GNS (2018). *Lindal Diagram: the applications for geothermal resources depending on the temperature*. Geraadpleegd op 30-09-2018 via <https://www.gns.cri.nz/gns/content/download/5535/30267/file/LindalDiagram.pdf>
- Gonzalez, L. (2013). *De duurzaamheid van geothermie*. Den Haag: Haagse Hogeschool.
- Gommans, L. (2010). *Gebiedsgerichte Energetische Systeemoptimalisatie*. Delft: TU Delft
- Haartsen, A.J. (2018). *CultGIS: beschrijvingen Overijsselse regio's - Naam regio: IJsseldelta*. Den Haag: Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Bureau Lantschap.
- Harmesen, R., Planje, W., Bakker, E.J. & Wagener, P. (2009). *Energiebesparing- en CO₂-reductiepotentieel hybride lucht/water warmtepomp in de bestaande woningbouw*. ECOFYS
- Hauberg, J. (2011). Research by Design – a research strategy. *Architecture & Education Journal*, 5 (1), 46-56.
- Hellebrand, K., Post, R.J. & Groen, B. (2012). *Kansen voor ondiepe geothermie voor de glastuinbouw*. Arnhem: Kas als energiebron.
- Herber, R. (2011). *Kan ook de diepe ondergrond ruimtelijk geordend worden?* Groningen: Rijksuniversiteit Groningen
- Heslinga, D.C. & Harmelen, A.K. (2006). *Vaststellingsmethodieken voor CO₂ emissiefactoren van aardgas in Nederland*. Apeldoorn: TNO.
- I&W & EZ&K (2018). *Structuurvisie Ondergrond*. Den Haag: Rijksoverheid.
- Kas als Energiebron (2014a). *Handboek Geothermie 2014 – bijlage Notitie bijvangst Ministerie EZ van april 2014*. Den Haag: Ministerie EZ.
- Kramers, L., Van Wees, J.-D., Pluymaekers, M.P.D., Kronimus, A. & T. Boxem (2012). Direct heat resource assessment and subsurface information systems for geothermal aquifers; the Dutch perspective. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw*, 91(4), 637-649.
- Lako, P., Luxembourg, S.L., Lensink, S.M. & In't Groen, B. (2013). *Aanvullend advies geothermie in SDE+ 2013*. ECN
- Maas, K.J. (2013). *Rendementsverbetering van een warmte- koude opwek en opslag systeem*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology
- Mijnlieff, H.F. & Van Wees, J., D. (2009). *Rapportage ruimtelijke ordening geothermie*. Utrecht: TNO
- Mijnlieff, H.F., Obdam, A.N.M., Van Wees, J.D.A.M., Pluymaekers, M.P.D. & Veldkamp, J.G. (2014). *DoubletCalc 1.4 manual*. Utrecht: TNO.
- NGR (2018). Aandachtsgebieden voor bodemenergie - opensystemen (dataset). Geraadpleegd op 25-11-2018 via <https://data.overheid.nl/data/dataset/48891-aandachtsgebieden-voor-bodemenergie---opensystemen--dataset->
- NGR (2018a). Aandachtsgebieden voor bodemenergie - grondwateronttrekkingen (dataset). Geraadpleegd op 25-12-2018 via <https://data.overheid.nl/data/dataset/48938-aandachtsgebieden-voor-bodemenergie---grondwateronttrekkingen--dataset->
- NGR (2018b). Waterwingebieden, (Omgevingsvisie). Geraadpleegd op 25-12-2018 via <https://data.overheid.nl/data/dataset/49317-waterwingebieden---omgevingsvisie->
- NGR (2018c). Potentieel warmte uit open WKO systemen per buurt (GJ/ha.jaar). Geraadpleegd op 25-12-2018 via <https://data.overheid.nl/data/dataset/49006-potentieel-warmte-uit-open-wko-systemen-per-buurt--gj-ha-jaar->

- Nitters, G., Pittens, B. & Buik, N. (2016). *Well Stimulation Techniques for Geothermal Projects in Sedimentary Basins*. Arnhem: IF Technology bv
- NLOG (2018). Bestanden interactieve kaart – Boorgaten. Geraadpleegd op 16-12-2018 via <https://www.nlog.nl/bestanden-interactieve-kaart>
- NLOG (2018a). Bestanden interactieve kaart – Velden en mijnbouwwerken. Geraadpleegd op 16-12-2018 via <https://www.nlog.nl/bestanden-interactieve-kaart>
- NLOG (2018b). Bestanden interactieve kaart – Vergunningen. Geraadpleegd op 16-12-2018 via <https://www.nlog.nl/bestanden-interactieve-kaart>
- Oomes, J. (2012). *Duurzaam gebruik van de ondergrond; Gereedschap voor structuur en visie*. Den Haag: Technische Commissie Bodem.
- Roggema, R. (2017). Research by Design: Proposition for a Methodological Approach. *Urban Science*, 1 (2), 1-19.
- RVO (2018). *Factsheet: WKO en warmtepompen*. Geraadpleegd op 30-09-2018 via <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/07/RVO.nl%20-%20Factsheet%20WKO%20en%20warmtepompen.pdf>
- RVO (2018a). Warmteatlas. Geraadpleegd op 16-12-2018 via <http://rvo.b3p.nl/viewer/app/Warmteatlas/v2>
- Schoof, F. (2014). *Handboek Geothermie 2014*. Kas als Energiebron.
- Schoof, F. (2017). *Inventarisatie kansen en belemmeringen voor geothermie in stedelijk en landelijk gebied*. Utrecht: FPP Management B.V.
- SER (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei*. The Hague: Sociaal-Economische Raad.
- Stijkel, I. (2018). Is er nog toekomst voor restanten IJsselcentrale? *De Stentor*, 30-06-2018
- Stremke, S. (2010). *Designing sustainable energy landscapes: concepts principles and procedures*. Wageningen: Wageningen University
- ThermoGis (2019). Technisch model. Geraadpleegd op 03-05-2019 via <https://www.thermogis.nl/technisch-model>
- TNO (2018). ThermoGIS 2.0 overzicht en gedetailleerde kaarten (643 kaarten). Geraadpleegd op 26-12-2018 via <https://www.thermogis.nl/beschikbaarheid-kaarten>
- Valk, H.J.J., Haytink, T.G., Kaspers, J., Van Meegeren, P. & Zijlstra, J. (2018). *Verkenning tool aardgasvrije bestaande woningen*. Utrecht: RVO.
- Van den Bosch, R., Flipse, B. & Vorage, R. (2013). *Stappenplan winning aardwarmte voor glastuinbouw*. Kas als Energiebron.
- Van der Krogt, R. (2011). *Energie uit de ondergrond: potenties en kartering*. RVO.
- Van Kann, F. (2015). Energie en ruimtelijke planning, een spannende combinatie: over integrale ruimtelijke conceptvorming op een regionale schaal met exergie als basis.
- Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson M. and Pálsson, P.G. (2015). *Uses of geothermal energy in food and agriculture – Opportunities for developing countries*. Rome, FAO.
- Visser, S., Noordhoek, M. & Woudstra, A. (2015). *Afstudeerverslag STEP*. Groningen: Hanzehogeschool Groningen.
- VITO (2012). *Verslag boring CAL-GT-01*. Mol: VITO.

Vliet, E. van, Keijzer, J. de, Slingerland, E., Tilburg, J. van, Hofsteenge, W. & Haaksma, V. (2016). *Collectieve warmte naar lage temperatuur - Een verkenning van mogelijkheden en routes*. Utrecht: Ecofys & Greenvis

Vorage, R. (2012). *Duurzame warmte voor de Koekoekspolder*. IJsselmuiden: Greenhouse GeoPower

Waag society (2019). Energielabels. Geraadpleegd op 04-01-2018 via <http://energielabelatlas.nl/#Zwartewaterland/Zwartewaterland/12/52.5647/6.0507>

Wesselink, M., Liu, W., Koornneef, J. & Van den Broek, M. (2018). Conceptual market potential framework of high temperature aquifer thermal energy storage - A case study in the Netherlands. *Energy*, (147), 477-489.

Willemsen, G. (2017). *Ondiepe Geothermie*. Zevenbergen: IF Technology

Wong, Th.E., Batjes, D.A.J. & De Jager, J. (2007). *Geology of the Netherlands*. Amsterdam: Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences.

Yin, R. K. (2003). *Case study research: design and methods*. 3de editie. Thousand Oaks: Sage Publications, Inc.

9. Bijlagen

Bijlage 1: Overzicht van informatie raamwerk voor geothermie

WKO

Diepte: < 250m
Temperatuur: 8-16°C
Schaalgrootte: straatniveau
Ruimtebeslag: ± 5 hectare

- Levering van warmte en koude met warmtepomp aan:
Utiliteitsbouw en nieuwbouw (LTV)
- Op veel locaties mogelijk
- Warmteconsumenten met een warmte en koude vraag
- Rekening houden met veel andere functies vanwege ondiepe ligging (grondwaterniveau)

Ondiepe geothermie

Diepte: < 1000m
Temperatuur: 15-40°C
Schaalgrootte: buurtniveau
Ruimtebeslag: ± 30 hectare

- Levering van warmte met warmtepomp aan:
Utiliteitsbouw, nieuwbouw (LTV) en glastuinbouw
- Locatiegebonden
- Warmtelevering in combinatie met goede back-up en piekvoorziening
- Werkt op een diepte waar met weinig andere functies rekening hoeft te worden gehouden

Diepe geothermie

Diepte: > 1000m
Temperatuur: 40-160°C
Schaalgrootte: wijkniveau
Ruimtebeslag: ± 200 hectare

- Levering van warmte aan:
Woningbouw (HTV) en diverse industriële of agrarische processen
- Zeer locatiegebonden
- Warmtelevering in combinatie met goede back-up en piekvoorziening
- Rekening houden met een aantal andere functies (o.a. gaswinning) met eveneens een groot ruimtebeslag

Bijlage 2: Lijst van zoektermen literatuurstudie

Geologie van Nederland
Geothermie in Nederland
Geothermiesystemen
Types geothermie in Nederland
Ruimtelijke ordening ondergrond
Ruimtelijke ordening WKO
Ruimtelijke eigenschappen WKO
Ruimtelijke ordening ondiepe geothermie
Ruimtelijke eigenschappen ondiepe geothermie
Ruimtelijke ordening diepe geothermie
Ruimtelijke eigenschappen diepe geothermie
Ruimtelijke ordening geothermie
Geothermal energy sedimentary basin
Geothermal energy sedimentary basin spatial
WKO
WKO in Nederland
Ondiepe geothermie
Ondiepe geothermie in Nederland
Diepe geothermie
Diepe geothermie in Nederland
Applications geothermal energy
Toepassingen geothermie
Lindal diagrams geothermal
Lindal diagram geothermie
Lindal diagrams geothermal rural areas
LTV
HTV
LTV energieklassen
HTV energieklassen
LTV WKO
LTV geothermie
HTV WKO
HTV geothermie
Ruimtebeslag WKO
Ruimtebeslag geothermie
Ruimte WKO hectare
Ruimte WKO m²
Ruimte geothermie hectare
Ruimte geothermie m²

Geothermie potentie kaarten
ThermoGis
ThermoGis kaarten
DoubletCalc
Potential Recoverable Heat
PRH
Kaart energielabels
Kaart energielabels per buurt
Kaart warmtevraag per buurt
Kaart warmtevraag gemeenten
Kaart gasverbruik gemeenten
Kaart gasverbruik per buurt
Hydraulische straal WKO
Hydraulische straal Ondiepe geothermie
Hydraulische straal Diepe geothermie
Thermische straal WKO
Thermische straal Ondiepe geothermie
Thermische straal Diepe geothermie
Warmtekaarten
PRH Tertiair
PRH Trias
PRH Rotliegend
Thermisch vermogen Tertiair
Thermisch vermogen Trias
Thermisch vermogen Rotliegend
Geothermie basislast
Geothermie piekbelasting
Woningbouw warmtevraag
Woningbouw piekbelasting
Woningbouw basislast
Geothermie onderhoud
Geothermie leveringszekerheid
Geothermie stappenplan
Geothermie warmtekaarten
Geothermie kartering
Boringsvrije zones
Grondwaterbeschermingsgebied
Waterwingebied
Nationale grondwater reserves

Bijlage 3: Overzicht van bronnen per deelvraag

Informatie	Moment	Bron	Methode	Documentatie
Welke soorten geothermiesystemen zijn er in Nederland?				
Bevindingen vanuit de literatuur	Pre-design fase	Wong et al. (2007), Doornenbal & Pagnier (2004)	Literatuurstudie	Bevindingen uitwerken en refereren naar literatuur
Wat zijn de exergetische eigenschappen van de geothermiesystemen?				
Bevindingen vanuit de literatuur	Pre-design fase	Maas (2013), Bouwmeester (2013), Hellebrand et al. (2012), Beek et al. (2014), Kas als Energiebron (2014), Baisch et al. (2016), Dreesen & Laenen (2010), Van Nguyen et al. (2015)	Literatuurstudie	Bevindingen uitwerken en refereren naar literatuur
Wat zijn de ruimtelijke eigenschappen van de geothermie systemen?				
Bevindingen vanuit de literatuur	Pre-design fase	Schoof (2014), Hellebrand et al. (2012), Bot & Zwamborn (2013a), Mijnlief & Van Wees (2009)	Literatuurstudie	Bevindingen uitwerken en refereren naar literatuur
Hoe kunnen geothermiesystemen worden verbonden met warmteconsumenten?				
Bevindingen vanuit de literatuur	Pre-design fase	Maas (2013), Bouwmeester (2013), Hellebrand et al. (2012), Beek et al. (2014), Kas als Energiebron (2014), Baisch et al. (2016)	Literatuurstudie	Bevindingen uitwerken en refereren naar literatuur
Welke andere ruimtelijke functies kunnen conflicteren met geothermiesystemen?				
Bevindingen vanuit de literatuur	Pre-design fase	Oomes (2012), De Taskforce WKO (2009), Ministerie van I&W & EZ&K (2018)	Literatuurstudie	Bevindingen uitwerken en refereren naar literatuur
Is het mogelijk om de eigenschappen van de geothermie systemen te duiden in een raamwerk?				
Bevindingen vanuit de literatuurstudie	Pre-design fase	Alle literatuur vanuit de literatuurstudie, aangevuld met Van der Krogt (2011), Kramers et al. (2012)	Aanpak voor opstellen van potentiekaarten aanvullen met bevindingen vanuit literatuurstudie	Beschrijven, uitwerken in acties
Kan dit raamwerk worden ingezet bij het opstellen van energie-ruimtevisies?				
Case studie IJsseldelta regio	Design fase	ThermoGis, NLOG, PDOK, data.overheid.nl, CBS, Kadaster, NGR, ESRI	Casestudie van energiesysteem en ruimtelijke eigenschappen van de case IJsseldelta regio, volgens vijfstappenbenadering en raamwerk	GIS kaarten en beschrijving IJsseldelta regio, inclusief energie-ruimte visies
Hoe kunnen geothermiesystemen worden toegepast in energie-ruimtevisies?				
Bevindingen uit literatuurstudie en uit casestudie over werking raamwerk	Post-design fase	Literatuurstudie en casestudie	Evaluatie resultaten literatuurstudie en casestudie	Conclusie

