

Warmtevraag en geothermie- potentieel in het Waddengebied



Warmtevraag en geothermie- potentieel in het Waddengebied

Colofon

Opgesteld door TNO

Adres: Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht
Telefoon: +31 88 866 42 56
Fax: +31 88 866 44 750
Website: www.tno.nl

Auteurs

J.G. Veldkamp, T.A.P. Boxem, J.M. Koornneef

Grafisch ontwerp omslag

BW H ontwerpers

Fotografie omslag

Thea Smit

ISBN

978-94-90289-41-6

Position paper 2017-03

Gepubliceerd door Waddenacademie
© Waddenacademie september 2017

Contactpersoon

Klaas Deen
Secretaris
T 058 233 90 31
E klaas.deen@waddenacademie.nl
www.waddenacademie.nl

De basisfinanciering van de Waddenacademie
is afkomstig van het Waddenfonds.

Samenvatting

Bodemwarmte is een onuitputtelijke bron van energie die een belangrijke bijdrage kan leveren aan de energietransitie van fossiel naar duurzaam. Geothermie is bovendien een van de goedkoopste vormen van duurzame energie. Wel is het zo dat een grote 'up front' investering nodig is om een productie- en een injectieboring (samen een doublet genoemd) te realiseren, maar door de grote hoeveelheid haalbare productie-uren is het rendement groot. In het algemeen is de onzekerheid over het te behalen geothermisch vermogen relatief groot alvorens de boringen zijn uitgevoerd.

Warmtevragers

Omdat het relatief duur is om warmte te transporteren, is het bij geothermie belangrijk dat de warmteafnemers zich dicht bij de bron bevinden, en dat de gevraagde temperatuur overeen komt met het aanbod. Voor de Waddenprovincies speelt in mindere mate omdat grote delen van het gebied zich boven gesteentelagen bevinden die gunstig zijn voor het winnen van aardwarmte, zowel lage als hoge temperatuur. De Warmteatlas van RVO bevat een gedetailleerde inventarisatie van de belangrijkste warmtevragers, maar niet de warmteprofielen (de warmtevraag door het jaar heen), en het temperatuurniveau. Voor het temperatuurbereik van ongeveer 60-100 °C is de warmtevraag bepaald door kassengebieden in Middenmeer, Sexbierum, Berlikum, Hoogezand-Sappemeer en (mogelijk) de Eemshaven, en de huidige stadsverwarmingsnetten die in Leeuwarden, Groningen en Hoogezand-Sappemeer liggen. In de nabije toekomst zal het aantal stadsverwarmingsnetten door de Energietransitie mogelijk sterk stijgen. Dit soort netten kan goed door geothermische warmte gevoed worden. Het is voor het bepalen van de mogelijkheden van geothermie voor de Waddenprovincies zeer belangrijk te weten of en waar plannen zijn voor het aanleggen van meer stadsverwarmingsnetten. Voor hoge temperatuur (stoom) zijn de in de Warmteatlas geïdentificeerde warmtevragers de zuivel- en voedingsmiddelenindustrie (FrieslandCampina, Royal AWARE, Sonac en Suiker-Unie), de papierindustrie (Smurfit Kappa, ESKA Graphic Board) en de chemische industrie (BioMethanol Chemie Nederland, ESD-SIC). Ook hiervoor geldt dat de precieze aard van de warmtevraag vooralsnog onbekend is. Veel kleine warmtegebruikers zoals onder meer de rioolwaterzuiveringen (die nu soms in de warmtevraag voorzien door verbranding van eigen biogas verkregen uit vergisting) zouden mogelijk baat kunnen hebben bij een goedkoop doublet met klein vermogen (ondiep en/of dunne productiebuizen). Wanneer de verzamelde vraag in een gebied relatief klein is, zoals bijvoorbeeld op de Waddeneilanden, is het waarschijnlijk niet rendabel een doublet te boren tot een diepte van minimaal twee à drie kilometer, met een vermogen van 5-15 MW_{th}. Wel kan bepaald worden of het rendabel is een klein doublet ('slim hole' of ondiep) te boren met een klein vermogen.

Soorten winning

Aardwarmtewinning kan ruwweg verdeeld worden in ondiep, diep en ultra-diep. Ondiepe aardwarmtewinning wordt aangeduid als warmte-koudeopslag (WKO). Dit wordt in de Waddenprovincies al veelvuldig succesvol toegepast. Het gaat hierbij om verwarming en koeling van kantoren met relatief kleine vermogens. Diepe aardwarmtewinning met een temperatuur van ongeveer 60-100 °C vindt plaats op een diepte van ongeveer twee à drie kilometer. Het gaat hierbij om vermogens van on-

geveer 5-15 MW_{th}. Dit is voldoende voor het verwarmen van enkele duizenden huizen of enkele hectares kas. In de Waddenprovincies is dit momenteel alleen gerealiseerd in Middenmeer, waar zes putten zijn geboord voor de verwarming van een kassencomplex. Ook stadsverwarming kan gevoed worden met warmte van deze temperatuur. De ondergrond in een groot deel van het gebied is zeer gunstig voor geothermie van dit temperatuurniveau door de aanwezigheid van permeabele gesteenten van Rotliegend ouderdom. Dit is hetzelfde gesteente als waar op veel plaatsen aardgas uit wordt gewonnen. Dit kan voor interferentie zorgen. Aardwarmtewinning zorgt in principe niet voor aardbevingen, maar omdat er in het gebied al aardbevingen voorkomen als gevolg van gaswinning, is voorzichtigheid geboden. Het Staatstoezicht op de Mijnen houdt toezicht op veilige winning. Ultradiepe geothermie, met een temperatuur van meer dan 150 °C, is in principe mogelijk in het gebied maar hier is nog geen ervaring mee opgedaan. Het gesteente is relatief onbekend, en waarschijnlijk ongeschikt om zonder stimulering voldoende heet water of stoom te kunnen produceren. Binnen de Green Deal Ultradiepe Geothermie wordt onderzoek gedaan naar dit soort geothermie. FrieslandCampina en Royal Aware (samen met Vermilion) zijn deelnemers in dit project.

Combinatie met opslag van warmte

Veel warmtevraag is (typisch bij kassen en stadsverwarmingsnetten) in de zomer laag, en in de winter hoog. Dat betekent dat een doublet een deel van het jaar suboptimaal wordt benut. Het rendement van een doublet kan verbeterd worden wanneer in de zomer overtollige warmte (afkomstig van een doublet of restwarmte van elders) in de ondiepe ondergrond wordt opgeslagen, en in de winter geproduceerd. Dit principe heet Hoge-temperatuuropslag (HTO). In het gebied is een aantal mogelijk interessante locaties geïdentificeerd waar boven- en ondergrond op elkaar aansluiten.

Identificatie en specificering van de warmtevraag

Voor het beter in kaart brengen van de mogelijke overeenkomst tussen warmtevraag en – aanbod is het belangrijk dat van de warmtevragers die in de Warmte-atlas zijn geïdentificeerd beter wordt bepaald wat het warmteprofiel is, en of er mogelijkheden zijn voor synergie tussen verschillende bij elkaar in de buurt gelegen warmtevragers (hoge en lage temperatuur) zodat cascadering mogelijk wordt, en de business case beter.

Risico's van aardwarmtewinning

Het Staatstoezicht op de Mijnen houdt toezicht op veilige winning van delfstoffen. In een recent rapport is kritiek geuit op de manier van werken van de jonge geothermiesector met betrekking tot transparantie, veiligheid en kennisontwikkeling en -deling. De geothermiesector neemt deze kritiek serieus, stelt dat een aantal kritiekpunten al is geadresseerd, en dat verdere verbetering komt uit het Verbeterplan Geothermie en de Kennisagenda Geothermie.

Aardbevingen puur als gevolg van aardwarmtewinning zijn in Nederland onwaarschijnlijk, maar in seismisch actieve gebieden, in de nabijheid van gedepleteerde aardgasvelden of actieve breuken kan seismische monitoring van de doubletten door de toezichthouder verplicht worden. Ook kan tijdens het boren enige seismische activiteit optreden.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	7
1.1	Warmtevraag	10
1.2	Verschillende vormen van geothermie	11
1.3	Ondergrond.....	12
1.4	Stimulering en alternatieve boorconcepten	18
2	Warmtevraag	20
3	Warmte-koudeopslag	23
4	Hoge-temperatuuropslag	25
4.1	Wat is HTO	25
4.2	Voorwaarden	27
4.3	Kansen in de ondergrond van de Waddenprovincies.....	29
5	Diepe geothermie.....	36
5.1	Wat is diepe geothermie	36
5.2	Doublet	36
5.3	One-hole warmtewisselaar	37
5.4	DoubletCalc	37
5.5	ThermoGIS	39
5.6	Relatie met olie- en gaswinning.....	41
5.7	Kansen in de ondergrond van Noord-Nederland.....	42
6	Ultradiepe geothermie.....	47
6.1	Wat is ultradiepe geothermie	47
6.2	Hot Dry Rock en Enhanced Geothermal Systems	47
6.3	Ultradiepe reservoir	48
6.4	Kansen in de ondergrond van Noord-Nederland.....	52
7	Subsidieregelingen.....	53

7.1	Risico's dekken voor Aardwarmte (RNES).....	53
7.2	Stimulering Duurzame Energie (SDE+).....	53
7.3	Green deal UDG	54
8	Risico's van aardwarmtewinning.....	55
8.1	Rapport 'De Staat van de Sector Geothermie'	55
8.2	Reactie van DAGO	55
8.3	Reactie van Platform Geothermie:	56
8.4	Aardwarmtewinning in gebieden met seismisch risico	56
9	Conclusies.....	58
9.1	WKO / Ondiepe geothermie	58
9.2	HTO	58
9.3	Diepe geothermie	58
9.4	Ultradiepe geothermie	59
9.5	Staat van de Sector Geothermie	60
10	Referenties en websites.....	61

Bijlage(n)

A HTO-systemen in Nederland en buitenland

B Aardwarmtevergunningen

C Verklarende woordenlijst

1 Inleiding

Dat er een urgentie bestaat om onze energiehuishouding aan te passen, om daarmee de opwarming van de aarde niet meer dan 1,5°C te laten zijn, wordt niet meer betwist. Het klimaatakkoord van Parijs, dat landen dwingt om hiertoe actie te ondernemen, heeft ongebruikelijk snel de ratificatiedrempel behaald, waardoor het al op 5 november 2016 in werking kon treden. Een breed gedragen gevoel van noodzaak die ook haar weg vindt naar nationale en decentrale overheden. Een noodzaak ook die vraagt om een brede beschouwing van alle opties om de verduurzaming van de energiehuishouding te realiseren.

Doorgaans wordt bij het verduurzamen van de energieopwekking in eerste instantie gekeken naar wind- en zonne-energie. Hiermee wordt over het hoofd gezien dat ongeveer 55% van de energiebehoefte bestaat uit warmte (Tabel 1.1). Een gemiddeld huishouden in Nederland verbruikt ongeveer 3.300 kWh elektriciteit en 1.500 m³ gas (bron: Milieu Centraal; prijspeil 2016/2017). Daarmee bestaat de energierekening voor ongeveer 60% uit gas, waarvan circa 80% voor de verwarming. Dit komt voor verwarming overeen met gemiddeld bijna 770 € per jaar per huishouden. Het Nationaal Warmtenet Trendrapport (2017) schat dat de warmtevraag op langere termijn zal afnemen tot ongeveer 1455 PJ/jaar, maar dat die behoefte voor 58% gedeckt zal worden door geothermie (850 PJ). Hiermee kan geothermie in de toekomst de belangrijkste warmtebron worden.

De glastuinbouw heeft een zeer grote warmtevraag (ongeveer 60-100 °C), maar van lagere temperatuur dan warmtenetten¹ (>100 °C). Dit geldt overigens voornamelijk voor de bestaande 'oude' warmtenetten. De huidige nieuwbouw en warmtenetten hebben een lagere bovengrens van ongeveer 60 °C. De agrarische sector is als geheel verantwoordelijk voor ongeveer 9% van de totale Nederlandse aardgasconsumptie van ongeveer 134 PJ in 2014 (IEA 2014).

Tabel 1.1 Primair energieverbruik (PJ) in Nederland in 2012. (bron: CE 2015, in PBL 2017).

Sector	Totaal in 2012	Licht en apparaten	Transport en mobiliteit	Hoge temperatuur warmte	Lage temperatuur warmte
Transport	500	0	500	0	0
Industrie en centrales	970	260	0	670	40
Huishoudens, utiliteit en landbouw	1190	440	0	0	750
Totaal	2660	700	500	670	790

Ook gebruikers die een grote warmtevraag van hoge temperatuur hebben, vertegenwoordigen een aanzienlijke groep van mogelijke te verduurzamen warmte. De industrie met een thermische behoefte tot 250°C, bedraagt ca. 170 PJ (Ministerie

¹ Een warmtenet is een netwerk van leidingen waardoor warm water gepompt kan worden om kantoren en woningen te verwarmen

van Economische Zaken 2016). Grote sectoren hierbinnen zijn de chemische, papier en karton en voedings- en genotsmiddelen industrieën. Dit zijn sectoren die ook in de toekomst een grote warmtebehoefte blijven houden (CE Delft 2015).

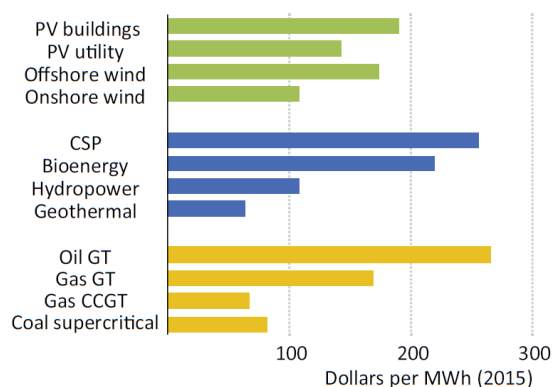
Naast de kans om de elektriciteitsopwekking te verduurzamen, is er dus ook een breed scala aan kansen voor een duurzame warmtetransitie, door duurzame warmte aan te bieden en slim te gebruiken.

Geothermie (ook wel: aardwarmte) is een van de grootste bronnen van duurzame warmte. Er kan energie uit gewonnen worden, zonder schadelijke uitstoot naar het milieu. Het is een bron van energie die ook grote mogelijkheden biedt in een regio waar de temperatuur in de ondergrond relatief laag is (zoals Nederland in vergelijking met IJsland of Italië). De gehele Nederlandse glastuinbouw (bijna 10.000 ha waarvan ruwweg de helft glasgroenten en de helft bloemen en sierplanten) zou theoretisch 500 jaar vooruit kunnen, uitgaande van de warmtevraag in 2013 en een geothermisch potentieel van iets meer dan 63 TJ (Van Wees et al. 2013). Dezelfde orde grootte is van toepassing op de koppeling van een miljoen huishoudens aan geothermie via warmtenetten.

Niet alleen heeft geothermie grote potentie, het is ook een van de goedkoopste bronnen van energie. Tabel 1.2 toont de resultaten van een benchmark-studie van de US Department of Energy (DOE) uit 2013 die de gemiddelde kosten van geproduceerde energie (Levelized Cost Of Energy LCOE) uit verschillende bronnen met elkaar vergelijkt. Hoewel de cijfers niet een op een te vertalen zijn naar de Nederlandse situatie, is het wel indicatief voor de verhouding tussen de verschillende energiedragers. De capacity factor (of load factor) is het percentage tijd dat het systeem gemiddeld operationeel is. Voor geothermie is dit doorgaans 80 tot 90%, afhankelijk van het systeemontwerp en keuzes rondom het onderhoud. Dit is vergelijkbaar met fossiele energiebronnen, en veel meer dan zon en wind. De 'total levelized system cost' omvat de totale kosten van het totale systeem per geproduceerde MWh energie. Ook hierin scoort geothermie hoog als voordeligste bron van energie. De gegevens van DOE zijn recent bevestigd in de World Energy Outlook van het International Energy Agency (IEA, 2016, zie Figuur 1.1).

Tabel 1.2 Gemiddelde operationele tijd van het systeem (zgn. capacity of load factor) en de kosten van het totale systeem (LCOE) per geproduceerde MWh voor centrales die in 2022 in gebruik worden genomen. Hieruit blijkt dat relatief gezien geothermische energie de hoogste operationele tijd heeft, tegen, op gas na, de laagste kosten per geproduceerde hoeveelheid energie (bron: US Energy Information Administration 2017)

type	capacity factor [%]	levelized kosten [US\$/MWh]
kolen (conventioneel)	85	94.9
gas (conventioneel)	87	13.9
nucleair	90	73.6
geothermie	91	32.2
biomassa	83	44.7
wind onshore	39	47.2
wind offshore	45	133.0
zon PV	25	70.2
hydro-elektrisch	59	56.2



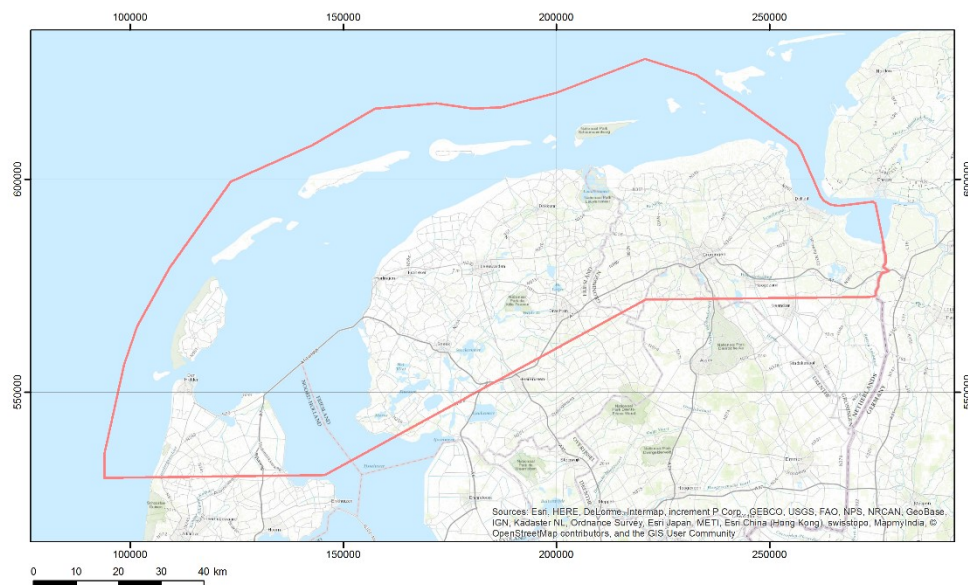
Figuur 1.1 Gemiddelde LCOE van elektriciteit per technologie binnen Europa, voor in 2015 gereed gekomen projecten. PV: Photo-Voltaic, CSP: Concentrated Solar Power, GT: Gas Turbine, CCGT: Combined Cycle Gas Turbine. Bron: IEA 2016 (figuur 11.3).

Ondanks de grote load factor en de lage kosten neemt het aantal geothermieprojecten in Nederland niet heel snel toe. Dit heeft twee dominante oorzaken:

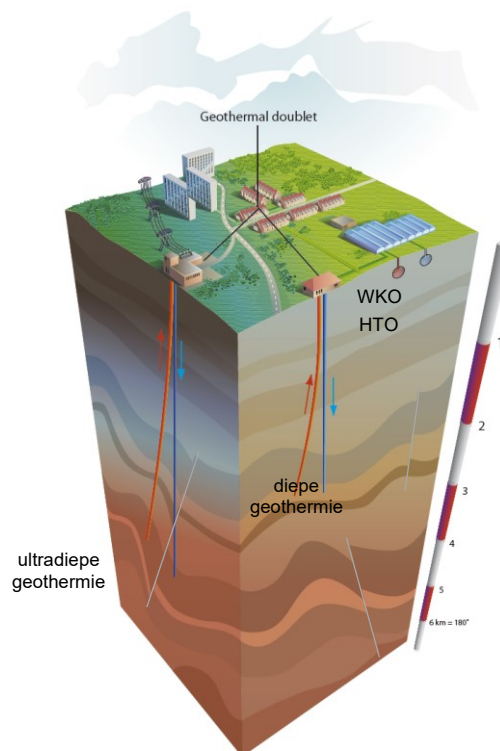
- De ‘up front’ investeringen voor het ontwikkelen van een geothermisch systeem zijn hoog en gaan gepaard met een grote onzekerheid. De investering wordt voor een groot deel bepaald door de boorkosten die per boorgat enkele miljoenen euro's bedragen. Daarnaast is de onzekerheid van de ondergrond groot. Deze neemt toe met de diepte. Deze onzekerheid kan verkleind worden door gedegen geologische verkenning (exploratie), door het met elkaar verbinden van gegevens uit bestaande boorputten, seismiek en gesteentemonsters. Dat ondanks de hoge investeringen geothermie per saldo toch goedkoop uitvalt komt door de grote aantal mogelijke draaiuren (vullast-uren). De investering betaalt zich dus dubbel en dwars uit.
- In de geothermiesector bestaat in Nederland (nog) geen operator die beschikt over een grote portfolio aan projecten, waardoor de risico's gespreid worden (en gemiddeld kleiner), en de kosten 10-20% lager kunnen uitvallen. Dit is in tegenstelling tot wat het geval is in de olie- en gassector. De ontwikkeling van geothermie in Nederland rust nu vooral op de schouders van het MKB, wat maakt dat de ‘downsides’ van een project zwaar wegen. De meeste operators ontwikkelen maar één project, hetgeen betekent dat ze het risico lopen failliet te gaan wanneer het project mislukt. In de olie- en gasindustrie is het vanwege de grote opbrengst van de gewonnen delfstof doorgaans voldoende als van iedere tien proefboringen er één (!) lukt.

De mogelijkheden die de Nederlandse ondergrond biedt, de grote nationale warmtebehoefte (tot 60% van de totale energieconsumptie), het ontbreken van uitstoot van schadelijke stoffen naar de atmosfeer of het milieu en de lage kosten van de energie, zorgen voor een goed perspectief voor geothermie, zeker wanneer de onzekerheden en de risico's overwonnen kunnen worden.

Het onderhavige rapport beschrijft de verschillende vormen van geothermie, de optimalisatiemogelijkheden voor duurzaamheid en economie en de kansen in de Waddendprovincies. Dit gebied is in Kabat et al. (2009) gedefinieerd als ‘ruwweg het zee-kleigebied van de drie noordelijke provincies [...] dat gebied van Noord-Holland, Fryslân en Groningen dat cultuurhistorisch en economisch aansluit bij het waddengebied’ (Figuur 1.2).



Figuur 1.2 Omlijning studiegebied Waddenprovincies (bron: Kabat et al. 2009)



Figuur 1.3 Belangrijkste vormen van aardwarmtewinning.

1.1 Warmtevraag

Voor geothermie is het belangrijk dat de bron en de afnemer dicht bij elkaar liggen. Dit is in tegenstelling tot wat het geval is in de sector olie- en gas – deze laatste energiedragers kunnen makkelijk economisch over grote afstand worden getransporteerd vanwege de grote energiedichtheid ervan. Warm water en stoom kunnen weliswaar ook goed getransporteerd worden wanneer de buizen groot genoeg en goed geïsoleerd zijn, maar dit vergt een relatief grote investering. Transport over

enkele kilometers is mogelijk. Wanneer elektriciteit uit stoom wordt gegenereerd is de nabijheid van bron en afnemer minder belangrijk, zij het dat bij elektriciteitsproductie uit stoom altijd veel restwarmte overblijft. Om de business case sluitend te houden is het noodzakelijk dat deze restwarmte ook gebruikt kan worden.

1.2 Verschillende vormen van geothermie

Geothermie is het winnen van warmte uit de aarde (van het Griekse geos = aarde en thermos = warmte). Het bestaat in verschillende vormen. Hieronder volgt een kort overzicht van de verschillende vormen van geothermie die onderscheiden worden.

1.2.1 Open en gesloten systemen

Er bestaan in principe twee systemen om energie uit de bodem te gebruiken. Bij een open systeem wordt in de zomer relatief koel grondwater uit de bodem opgepompt. Dit wordt bijvoorbeeld gebruikt om gebouwen te koelen met behulp van een warmtepomp. Het aldus opgewarmde water wordt na gebruik teruggepompt in de bodem. In de winter wordt dit warme water weer opgepompt en gebruikt voor verwarming. Het afgekoelde water wordt teruggepompt. De efficiëntie van het terugwinnen van de opgeslagen warmte en koude kan hoog zijn, tot boven de 75%. Bij een gesloten systeem (ook wel: bodemwarmtewisselaar) wordt een vloeistof (bijvoorbeeld glycol) in buizen door de bodem geleid. De buizen bevatten een aantal lussen om het contactoppervlak tussen vloeistof en bodem (en hiermee de warmte-uitwisseling) zo groot mogelijk te maken. Wanneer de vloeistof (in de winter) kouder is dan de bodem wordt deze opgewarmd en kan gebruikt worden voor verwarming. Wanneer de vloeistof (in de zomer) warmer is dan de bodem, koelt deze af en kan gebruikt worden voor koeling.

De definitie van een open systeem volgens de Algemene Maatregel van Bestuur bodemenergiesystemen [AMvB, 2013, p2]:

‘open bodemenergiesysteem: installatie waarmee van de bodem gebruik wordt gemaakt voor de levering van warmte of koude ten behoeve van de verwarming of koeling van ruimten in bouwwerken, door grondwater te onttrekken en na gebruik in de bodem terug te brengen, met inbegrip van bijbehorende bronpompen en warmtewisselaar en, voor zover aanwezig, warmtepomp en regeneratievoorziening’

Het belangrijkste verschil tussen open en gesloten systemen is dat in een gesloten systeem de vloeistof niet in direct contact komt met het grondwater. Gesloten systemen zijn meestal kleinschaliger dan open systemen. Gesloten systemen worden vooral in de woningbouw en kleine utiliteitsbouw toegepast, terwijl open systemen bijvoorbeeld worden gebruikt voor het verwarmen en koelen van kantoren.

1.2.2 Warmte-koudeopslag (WKO)

Door gebruik te maken van de constante temperatuur in en de isolerende werking van de ondiepe ondergrond (bovenste laag tot max. 250 meter) kan in de zomer warm water in de bodem opgeslagen worden, dat in de winter gebruikt kan worden voor verwarming. Tegelijkertijd kan in de winter koud water opgeslagen worden dat in de zomer gebruikt kan worden voor koeling (seizoenbuffering). Dit is mogelijk op het niveau van huishoudens en kantoorpanden, maar wordt ook veel toegepast in

glastuinbouw. Het gaat hierbij om relatief kleine temperatuurverschillen. WKO wordt kort besproken in hoofdstuk 3.

1.2.3 *Hoge-temperatuuropslag (HTO)*

Grootschalige opslag van warmte (groter dan op de schaal van huishoudens of een kantoor zoals bij WKO), mogelijk ook met hoge temperatuur (hoger dan bij WKO) staat bekend onder de naam HTO (Hoge Temperatuur Opslag). Water van hoge temperatuur wordt hierbij opgeslagen op grotere dieptes dan bij WKO typisch het geval is, tot wel enkele honderden meters. De warmte is vaak afkomstig van geothermiesystemen (doubletten) die leveren aan stadsverwarmingsnetten of kassen die 's zomers een kleinere warmtevraag hebben dan 's winters, of van warmtecentrales die door het jaar heen een constante warmteproductie hebben. Hoge-temperatuuropslag wordt verder besproken in hoofdstuk 4.

1.2.4 *Diepe geothermie*

Ook wel vaak simpelweg aangeduid als 'geothermie'. Dit refereert aan de geothermie zoals deze bekend is van de glastuinbouw in Nederland. Hier wordt gebruik gemaakt van de natuurlijke warmte in de ondergrond tot dieptes van maximaal ongeveer drie kilometer om kassen te verwarmen. Ook aansluiting op stadsverwarming is mogelijk, hoewel dit in Nederland op dit moment nog niet gebeurt (dit was wel de bedoeling voor het geothermie-doublet Den Haag, maar de te verwarmen stadswijk was ten tijde van het gereed komen van het doublet nog niet gebouwd). In deze geothermische systemen wordt gebruik gemaakt van de natuurlijk aanwezige doorlatendheid van het gesteente. De maximale temperatuur op deze diepte is in Nederland ongeveer 100°C. Diepe geothermie wordt verder besproken in hoofdstuk 5.

1.2.5 *Ultradiepe geothermie (UDG)*

Een temperatuur van meer dan 120°C is noodzakelijk voor industrie met een hoogwaardige energievraag, of voor het opwekken van elektriciteit uit geothermische warmte. UDG heeft betrekking op dieptes van ongeveer vier tot acht kilometer. Op deze diepte is de natuurlijke doorlatendheid van het reservoir meestal onvoldoende om water economisch te produceren. Het reservoir moet daarom gestimuleerd worden. Een dergelijk systeem staat bekend onder de naam 'EGS' (enhanced of engineered geothermal system). Ultradiepe geothermie wordt verder besproken in hoofdstuk 6.

1.3 **Ondergrond**

1.3.1 *Gesteenten*

De belangrijkste afzettingen in de Nederlandse ondergrond zijn klei en kleisteen (= schalie), zand en zandsteen, mergel (klei-kalksteen) en kalksteen. Kleisteen en zandsteen (*geconsolideerd*) worden gevormd uit respectievelijk klei en zand (*ongeconsolideerd sediment*) wanneer ze diep worden begraven en samengedrukt (*consolidatie* of *lithificatie*). Lokaal komen in de Nederlandse ondergrond ook intrusiva (magmatisch gesteente zoals graniet) en steenkool voor. Zand komt in de ondiepere ondergrond voor en is daarmee belangrijk voor WKO en HTO. Zandsteen en kalksteen worden in de diepere ondergrond aangetroffen en zijn de belangrijkste gesteenten voor diepe en ultrasdiepe geothermie.

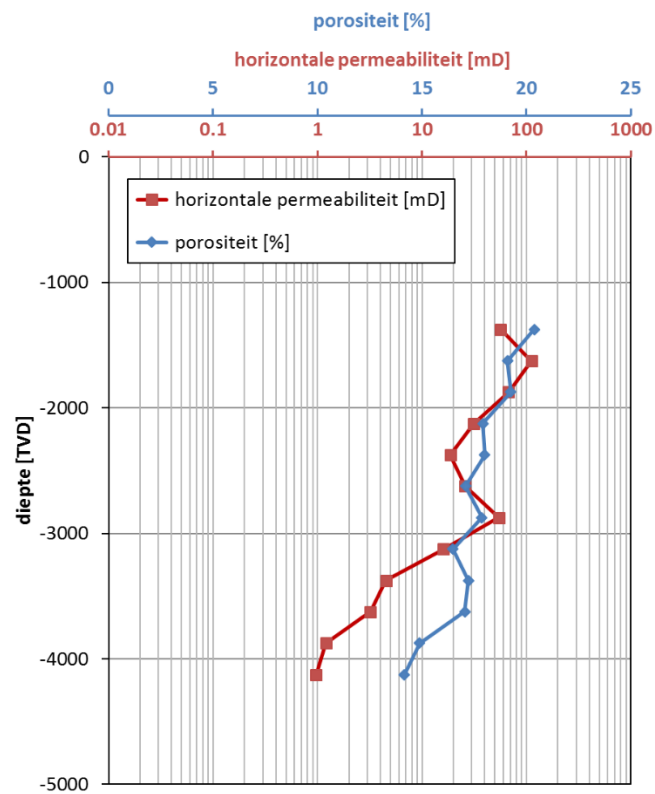
Om warm water uit een gesteentelaag te kunnen winnen is het nodig dat het gesteente poreus is, en dat het water door het gesteente kan stromen. Dit laatste is mogelijk wanneer de poriën met elkaar in verbinding staan, met andere woorden, wanneer het gesteente permeabel is. In de Nederlandse ondergrond wordt geschikte porositeit en permeabiliteit het vaakst aangetroffen in zandsteenlagen. Gesteenten kunnen verschillende soorten porositeit of permeabiliteit hebben:

- Bij afzetting blijft er tussen de korrels van het gesteente ruimte vrij. Dit heet de poriënruimte. Deze ruimte blijft in sommige gevallen gevuld met water (of olie of gas), maar wordt in andere gevallen op een later moment gevuld met kleinere korrels of gecementeerd met bijvoorbeeld kalk. Wanneer een gesteente diep begraven wordt neemt de permeabiliteit gemiddeld genomen af (Figuur 1.4). Dit komt doordat de korrels dichter op elkaar gedrukt worden door het gewicht van overliggende lagen (compactie), en door chemische veranderingen waarbij mineralen herkristalliseren of nieuwe mineralen worden gevormd (diagenese).
- Een netwerk van zeer kleine scheuren of breukjes kan ontstaan wanneer het gesteente onder druk komt of wordt vervormd. Een dergelijk netwerk kan de doorlatendheid van het gesteente vergroten. Dit soort gesteentes wordt 'natural fractured reservoir' genoemd. Er is in dit soort systemen geen risico voor aardbevingen.
- Grotere breuksystemen ontstaan bij intensere deformatie (bijv. tektoniek). Grote breuken komen op veel plaatsen in Nederland voor. Deze zijn veroorzaakt door dezelfde processen die gebergten als de Pyreneeën en de Alpen hebben gevormd. De directe omgeving van deze grote breuken is mogelijk doorlatend. Aardbevingen kunnen optreden langs grote breuken. Zie hiervoor paragraaf 8.4.
- Karst is een proces waarbij kalksteen oplost in water en daarmee voor doorlatendheid zorgt. Dit kan regenwater zijn (meteorisch water, bij kalksteen dat aan het oppervlakte ligt), of geothermisch water. De Grotten van Han zijn een voorbeeld van (grote) karst. Karst komt op diverse schaalgroottes voor.

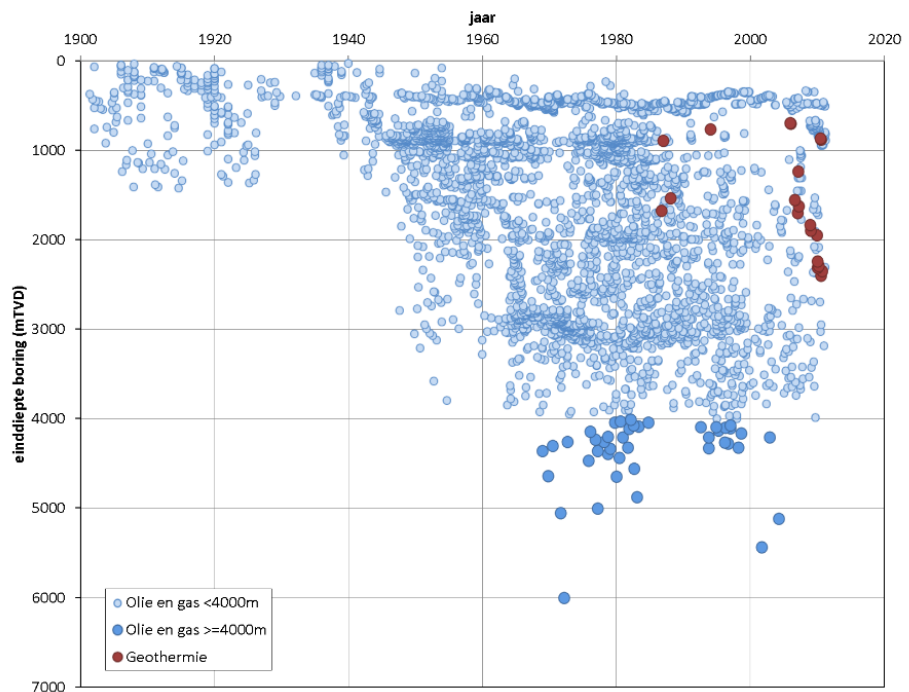
1.3.2 *Boringen en seismiek*

In Nederland is al ruim 4000 maal geboord op land naar een diepte van meer dan een kilometer. Op grotere diepte (>1 km) heeft de olie- en gasindustrie een grote hoeveelheid exploratie- en productieboringen uitgevoerd, met name sinds de jaren 50 in Noord-Nederland (Groningen, Friesland, Drenthe en Noord-Holland, en de offshore). Ook is veel informatie verkregen door 2D en later 3D seismiek. De in opdracht van Het Ministerie van Economische Zaken door TNO bijgehouden website www.nlog.nl geeft een overzicht van de locaties van boringen en seismiek (<http://nlog.nl/data>). Behalve de locaties kunnen ook de boringen en seismiek zelf worden bekeken en gedownload.

Al deze boringen leveren een schat aan informatie over de ondergrond. Nederland is hiermee een van de landen met de meest uitgebreide openbare dataverzameling van de ondergrond. Figuur 1.5 laat de relatie zien tussen de ouderdom van de boringen en de einddiepte. Hoewel er al sinds de jaren 70 tot grote diepte wordt geboord, is het aantal boringen dieper dan vier kilometer zeer beperkt. Olie- en gasvoorkomens beperken zich – met name door toenemende druk en temperatuur met de diepte – tot de bovenste circa vier kilometer van de ondergrond. De kennis van de ondergrond vermindert sterk met toenemende diepte.



Figuur 1.4 Gemiddelde afname van de porositeit en permeabiliteit met toenemende begravingsdiepte op basis van kernplugmetingen van het Rotliegend in heel Nederland (on+off-shore). Hoe dieper het gesteente is begraven, hoe ongunstiger de permeabiliteit.



Figuur 1.5 Overzicht van alle diepe boringen op land uitgezet tegen de einddiepte. Vanaf de jaren 50 van de vorige eeuw is de einddiepte van boringen sterk toegenomen. Blauw: olie- en gasboringen, rood: geothermieboringen. 41 boringen zijn dieper dan 4 kilometer, 6 dieper dan 5.

1.3.3 *Ondergrondmodellen*

De eerste regionale en landelijke inventarisaties naar de mogelijkheden van aard-warmtewinning en -opslag zijn uitgevoerd door de toenmalige Rijks Geologische Dienst en de Dienst Grondwaterverkenningen van TNO in het kader van het Nationaal Onderzoeksprogramma Aardwarmte in de eerste helft van de jaren 80 van de vorige eeuw (RGD 1985). Momenteel worden met behulp van de ondergrondgegevens verschillende modellen ontwikkeld. Deze kunnen bekeken worden op de website www.dinoloket.nl. De voor geothermie meest relevante zijn:

GeoTOP is een zeer gedetailleerd driedimensionaal model van de zeer ondiepe ondergrond (tot ongeveer 50 meter diepte). Het beschrijft de samenstelling van de ondergrond in blokken van 100x100x0.5 meter. Per blokje is bepaald wat de meest waarschijnlijke lithologie is. De belangrijkste zijn zand, klei, grind en veen. Het model is het fundament voor hydro-geologische, geotechnische en geo-archeologische toepassingen. Voor geothermie is dit model met name relevant voor ondiepe bodemwarmtesystemen zoals WKO.

DGM (Digitaal Geologisch Model) is een regionaal lagenmodel van de Nederlandse ondergrond tot een diepte van ongeveer 500 meter. De bodemlagen in dit deel van de ondergrond bestaan hoofdzakelijk uit onverharde sedimenten, waarin de grondsoorten klei, zand, grind en veen voorkomen. De lagen worden op basis van verschillen in opbouw (grondsoort en andere eigenschappen) ingedeeld in eenheden. Het DGM is een model van de opbouw en de samenhang (geometrie) van deze lithostratigrafische eenheden. Vanwege de beperkte diepte is dit model vooral relevant voor WKO en HTO. Uit DGM is REGIS (Regionaal Geohydrologisch InformatieSysteem) afgeleid. Het verschil met DGM is onder meer dat de eenheden van DGM in REGIS zijn opgedeeld in watervoerende en waterremmende lagen. Voor het maken van DGM zijn voornamelijk boringen en sonderingen gebruikt.

DGMDiep (Digitaal Geologisch Model – Diep) is een regionaal lagenmodel van de Nederlandse ondergrond tot een diepte van enkele kilometers². De bodemlagen in de diepere ondergrond bestaan hoofdzakelijk uit de hierboven genoemde gesteenten zandsteen, kalksteen en kleisteen. De lagen zijn op basis van verschillen in opbouw (gesteente- en andere eigenschappen) hiërarchisch ingedeeld in Members, Formaties en Groepen. De Slochteren Formatie bestaat bijvoorbeeld uit de Onder en Boven Slochteren Members, maakt zelf weer deel uit van de Boven Rotliegend Groep, en is van Perm ouderdom. Figuur 1.6 toont een doorsnede door de Nederlandse ondergrond op basis van DGMDiep. Deze is tot op zekere hoogte representatief voor Nederland, hoewel uiteraard lateraal belangrijke verschillen bestaan. Duidelijk is dat de ondergrond van Noord-Nederland aanzienlijk verschilt van die van de rest van Nederland. De aanwezigheid van een dik pakket Zechstein zout in het belangrijke dieptebereik van twee tot drie kilometer (temperatuur ongeveer 70-100°C) is ongunstig. Het hieronder liggende Rotliegend heeft wel relatief gunstige reservoir-eigenschappen.

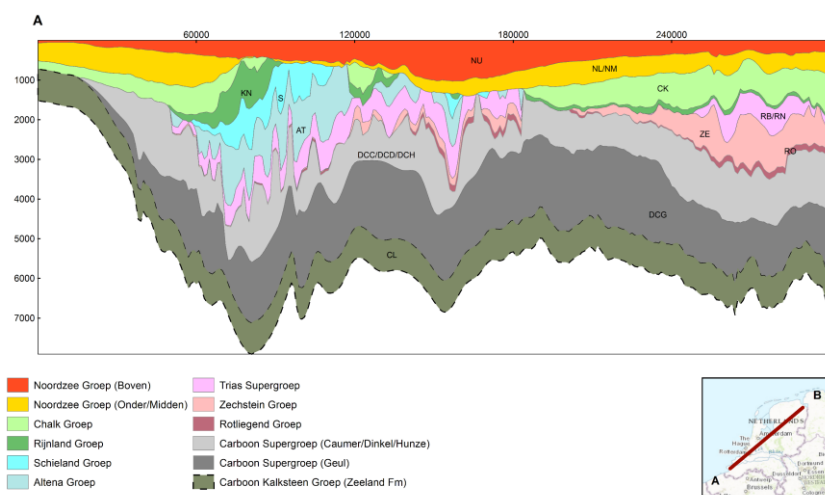
² Vanwege de beschikbaarheid van gegevens ligt de ondergrens van het model in Zuid-Nederland ondieper dan in Noord-Nederland

Figuur 1.7 bevat een aantal doorsnedes specifiek door Noord-Nederland. Deze figuur laat zien dat van west naar oost aanzienlijke verschillen bestaan.

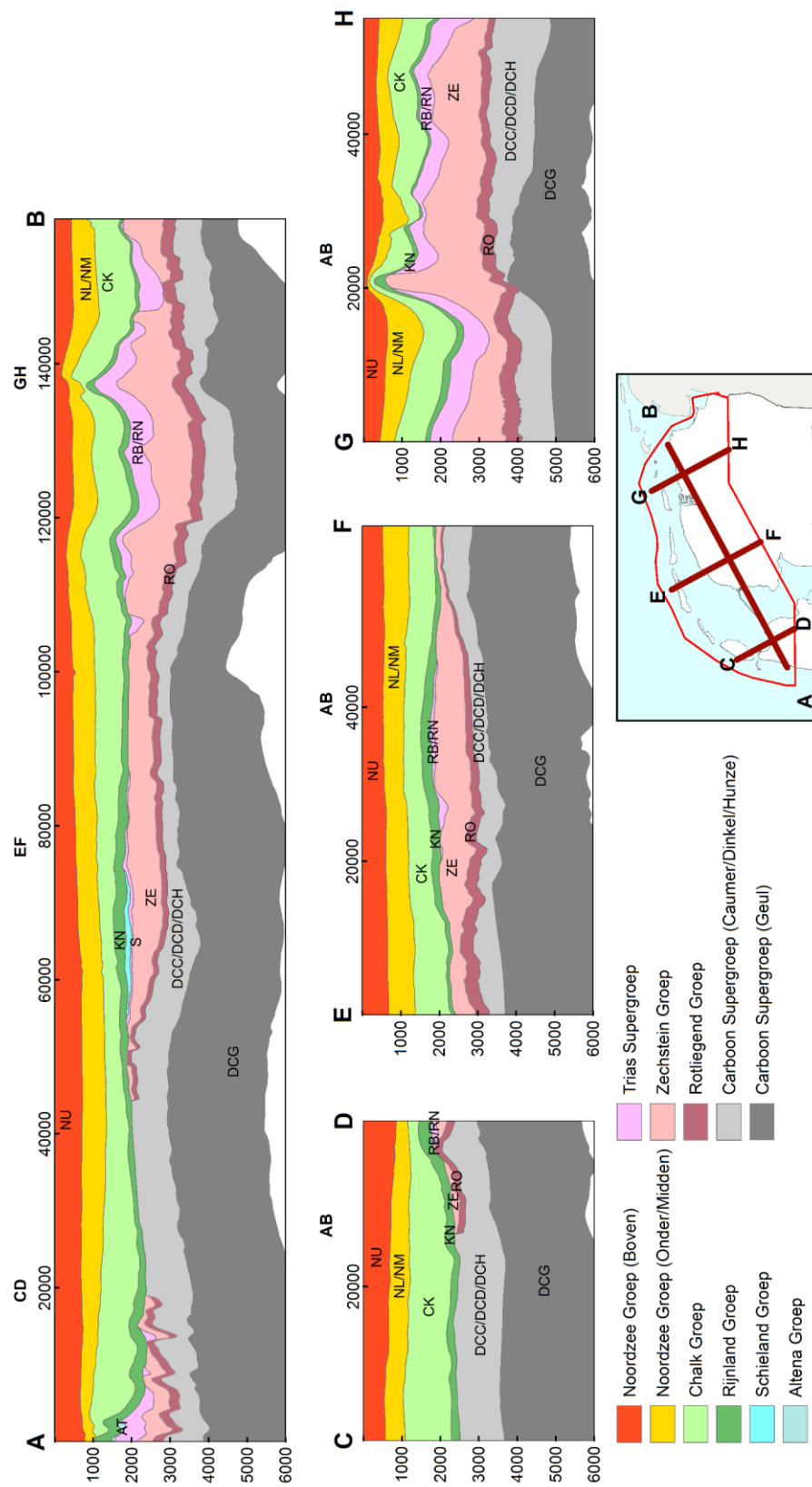
Zowel DGM als DGMDiep bevat van de onderscheiden eenheden kaarten van de diepte van boven- en onderkant. Dat betekent dat er geen informatie over de gesteente-eigenschappen in de modellen zit. De Nomenclator op www.dinoloket.nl bevat een uitgebreide beschrijving van de onderscheiden eenheden en hun karakteristieken. De Groepen zoals genoemd in Tabel 1.3 zijn allemaal in meer of mindere mate heterogeen van opbouw. Dat betekent dat ze op sommige plaatsen geschikt kunnen zijn voor geothermie, en op andere plaatsen niet. Tabel 1.3 geeft dus een zeer algemene inschatting van de geschiktheid.

Tabel 1.3 Voornaamste eenheden in de Nederlandse ondergrond, en hun mogelijke geschiktheid voor geothermie.

(Super-)Groep	Ouderdom	Geschikt voor geothermie
Noordzee	Tertiair	Ja (maar lage temperatuur)
Chalk	Laat Krijt	Nee (lage permeabiliteit)
Rijnland	Vroeg Krijt	Ja (maar heterogeen van opbouw)
Altena, Schieland	Jura / Vroeg Krijt	Ja (maar heterogeen van opbouw)
Trias	Trias	Ja (maar heterogeen van opbouw)
Zechstein	Perm	Nee (voornamelijk zout)
Rotliegend	Perm	Ja
Carboon	Carboon	Mogelijk (maar grotendeels schalie, potentie in carbonaten)
Devoon	Devoon	Mogelijk (maar zeer weinig kennis)



Figuur 1.6 Doorsnede door de Nederlandse ondergrond van Middelburg naar Delfzijl. Bron: DGMDiep. Noord-Nederland verschilt significant van de rest van Nederland.



Figuur 1.7 Doorsnedes door de ondergrond van Noord-Nederland. Er bestaan lateraal grote verschillen.

1.3.4 *Temperatuur*

In Nederland neemt de temperatuur in de ondergrond toe met iets meer dan 30°C per kilometer (de geothermische gradiënt, zie Figuur 1.8). Aangezien de gemiddelde oppervlaktetemperatuur ongeveer 10°C is, is de temperatuur op een kilometer diepte ongeveer 40°C, en op twee kilometer ongeveer 70°C, etc. Het bestaan van de stabiele geothermische gradiënt impliceert dat wanneer de warmtevraag bekend is (zie hoofdstuk 2), ook ongeveer duidelijk is op welke diepte een geschikt reservoir gezocht moet worden in de ondergrond. Lokaal kan de gradiënt echter sterk afwijken van het gemiddelde. De absolute afwijking van het ten opzichte van de gradiënt kan ± 5 °C zijn. Dit komt door de geologische geschiedenis en het soort gesteente. Vanwege laterale en verticale variaties in de voorkomende typen gesteente in de ondergrond, en de verschillende geologische geschiedenis, kan de (ondiepe) bovengrens van het ultra-diepe temperatuurdomein lokaal dieper of ondieper liggen.

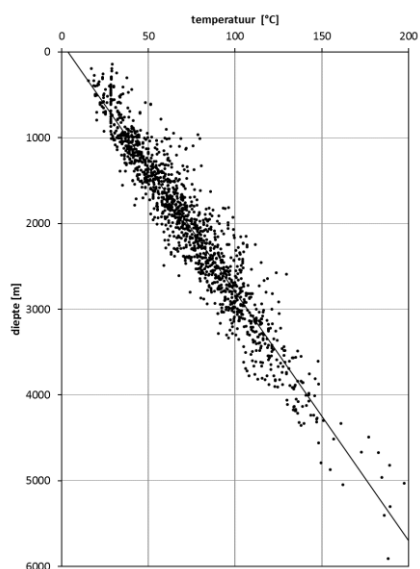
TNO heeft een driedimensionaal temperatuurmodel van de ondergrond van Nederland berekend (Bonté et al. 2012, zie Figuur 1.9). Dit model bevat een schatting van de temperatuur per blok van 1×1×0.1 kilometer, tot een diepte van ongeveer zeven kilometer. Het model is een van de pijlers van ThermoGIS (zie paragraaf 5.5). In 2017 actualiseert TNO het temperatuurmodel. De berekeningsmethode en de onderliggende gegevens worden verbeterd.

1.4 **Stimulering en alternatieve boorconcepten**

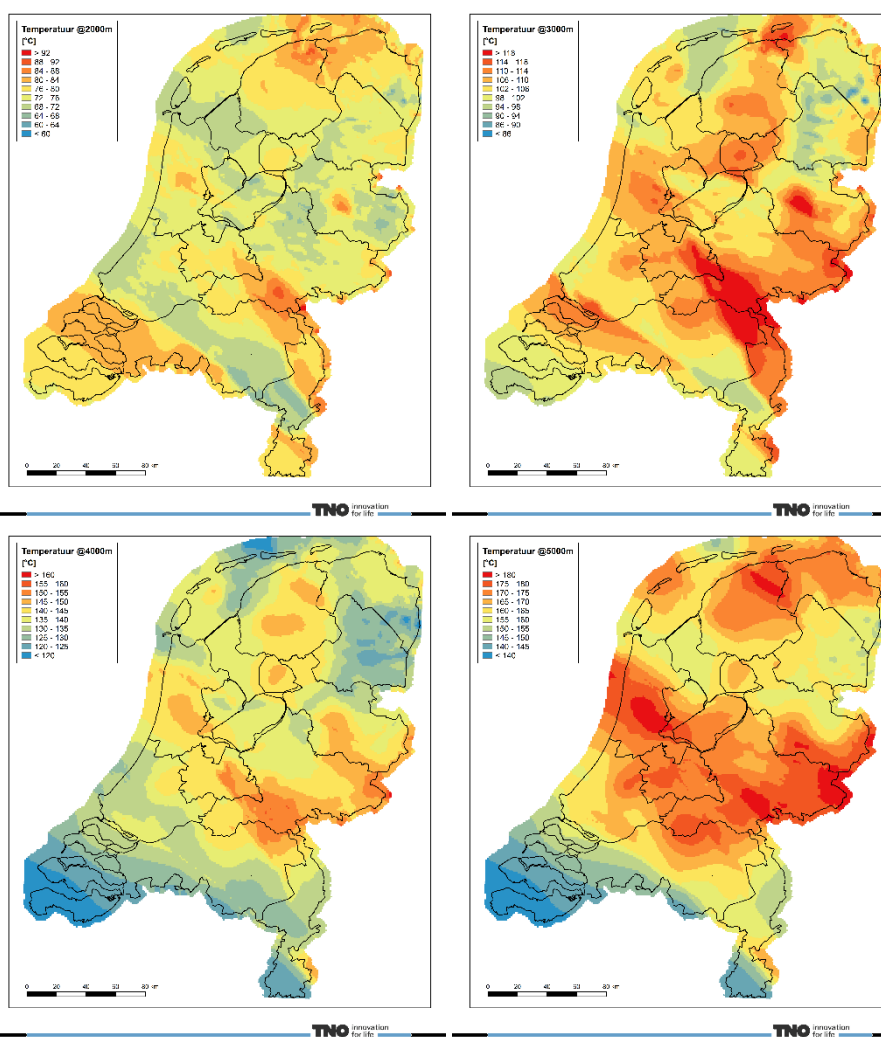
In paragraaf 1.3.1 is onder meer het belang van permeabiliteit behandeld. Wanneer een gesteente onvoldoende permeabel is, kost het oppompen en herinjecteren van water veel energie. Het reservoir kan in een dergelijke situatie mogelijk toch voldoende water produceren door het gesteente te stimuleren, of de boring anders te ontwerpen. De meest gebruikte technieken zijn:

- Chemische stimulatie: Rond het boorgat wordt een deel van het gesteente opgelost met zuur (*acidizing*). Hierdoor wordt de permeabiliteit van het gesteente in de directe nabijheid van de boring vergroot.
- Hydraulische stimulatie: Het gesteente wordt in de nabijheid van het boorgat gekraakt door onder hoge druk vloeistof te injecteren (*hydraulic fracturing*). Door de ontstane scheuren kan water makkelijker toestromen.
- Thermische stimulatie: door het injecteren van koud water in een heet reservoir kunnen onder gunstige omstandigheden scheuren in het gesteente ontstaan.
- Het einde van het boorgat is niet verticaal of schuin maar horizontaal over een grote lengte in het reservoir (*horizontal lateral*), in een of twee richtingen (*dual lateral*). Het contactoppervlak tussen boorgat en reservoir wordt hierdoor groter, en het water kan makkelijker toestromen.
- Vanuit het boorgat wordt een aantal lange gaten met een diameter van 2 à 3 cm gespoten (*radial jetting*). Dit heeft ongeveer hetzelfde effect als bovengenoemde horizontal lateral.

TNO (2015b) (en referenties daarin) geeft een overzicht van de relevante technieken voor reservoirstimulatie.



Figuur 1.8 Toename van de temperatuur met de diepte (naar Bonté et al. 2012). Op grote diepte (vanaf ongeveer 4 km) is het aantal metingen klein en dus de onzekerheid groot.



Figuur 1.9 Temperatuur van de ondergrond op dieptes van 2, 3, 4 en 5 kilometer. N.B. de legenda-eenheden van de vier kaarten verschillen.

2 Warmtevraag

In de regel is het niet economisch om warmte over grote afstand te transporteren³. Dit is een groot verschil met bijvoorbeeld olie en gas, die een dusdanig grote energiedichtheid hebben dat ook transport over lange afstand nog aantrekkelijk is. Een transportleiding moet namelijk zeer goed geïsoleerd worden om het warmteverlies te beperken. Dit is kostbaar. De warmtevraag is daarom leidend in de zoektocht naar een geschikte bron in de ondergrond. Het aanbod en de vraag moeten dicht bij elkaar liggen.

Figuur 2.1 laat het indicatieve temperatuurbereik zien voor verschillende toepassingen van warm water en stoom. Voor de meeste industriële processen ligt de benodigde temperatuur tussen de 80 en ruim 200°C. Elektriciteitsopwekking middels ORC (Organic Rankine Cycle) is mogelijk vanaf ongeveer 100 tot 220°C. Hoewel elektriciteitsopwekking dus al bij relatief lage temperatuur mogelijk is, is het rendement erg laag. Acceptabele rendementen worden pas gehaald wanneer de temperatuur van de stoom ruim boven de 100°C ligt⁴. Deze grens is niet hard – hoe hoger de temperatuur, hoe hoger het rendement.

Figuur 2.2 laat de door RVO geïnventariseerde warmtevraag in noorden van Nederland zien, in terajoules (TJ) per jaar, uitgesplitst naar verschillende groepen warmtevragers. Hierbij is de veronderstelling dat de industriële warmtevraag (rode driehoeken) voldoende is voor een doublet, en vooral hoge temperatuur betreft voor chemie, raffinaderijen, papier en voedingsmiddelen (bijvoorbeeld stoom voor de zuivelindustrie; zie bijvoorbeeld IF & ECN 2014). Niet-industriële warmtevragers (gele driehoeken) zijn onder meer afvalverwijdering, verkeer en vervoer, bouw, afvalwaterzuivering, etc. Deze hebben een lagere vereiste temperatuur.

Mega-, Giga- Tera- en Petajoules

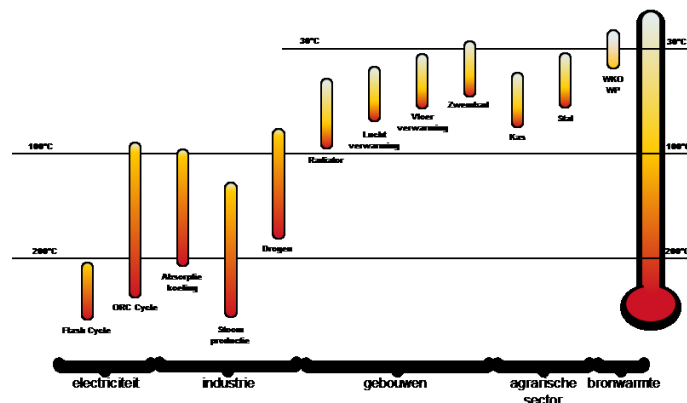
De meest gebruikte eenheid van energie is de joule. Grootschalig energieverbruik wordt vaak uitgedrukt in megajoules (MJ, 10^6 joules), gigajoules (GJ, 10^9), terajoules (TJ, 10^{12}) of petajoules (PJ, 10^{15}). Vermogen wordt uitgedrukt in watt (W). Een watt is 1 joule per seconde. Een wattuur (Wh) is dus 3600 joules, een megawatt-uur (MWh) 3.6 GJ.

Duizend huishoudens met een gemiddeld verbruik van 1500 m³ gas per jaar gebruiken ongeveer 48 TJ (Groningen gaskwaliteit ongeveer 31.7 MJ / m³)

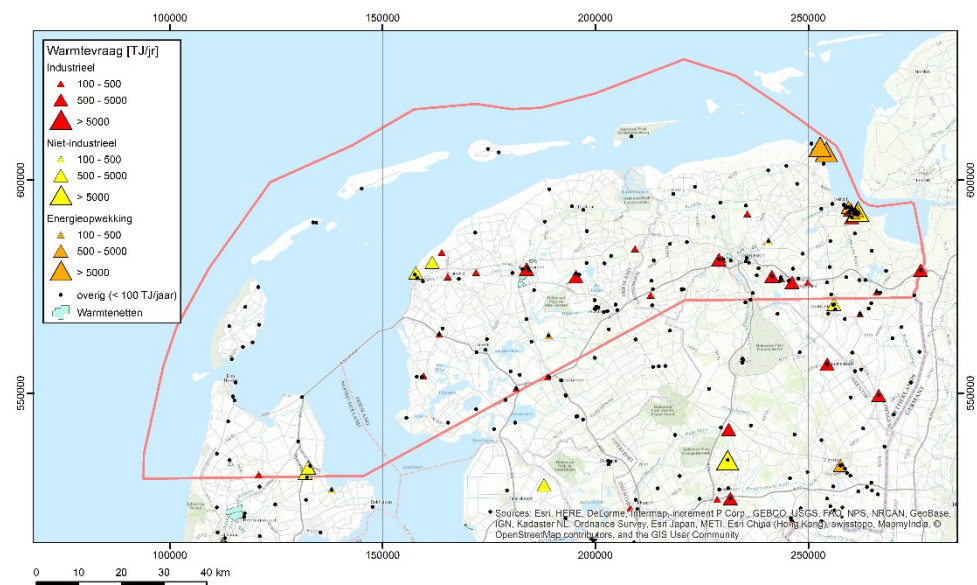
Een gemiddeld conventioneel doublet met een (thermisch) vermogen van 10 MW_{th} (megawatt-uur thermisch) en 8000 vollasturen produceert ongeveer 300 TJ per jaar (= 0.3 PJ). Een dergelijk doublet kan dus ruim 6000 huizen van warmte voorzien wanneer (onrealistisch) uit wordt gegaan van een constante vraag.

³ In Frankrijk is een project bekend waarbij industriële warmte over een afstand van 15 kilometer wordt getransporteerd, maar dit is vrij ver.

⁴ Elektriciteit wordt in Duitsland geproduceerd in 12 aardwarmtecentrales (zowel primair als secundair). De laagste temperatuur is 124 °C (Unterhaching, 3350 meter diepte, primair gebruik stadsverwarming, elektriciteit secundair), de hoogste 165 °C (Insheim, 3600 meter diepte). De debieten liggen bij benadering tussen de 250 en 500 m³/hr. Bron: www.GeoTis.de



Figuur 2.1 Indicatief temperatuurbereik voor verschillende toepassingen van warm water en stoom. Het warmte-aanbod wordt bepaald door de ondergrond. Bron TNO 2016.



Figuur 2.2 Warmtenetten en industriële en niet-industriële warmtevraag. Bron: RVO, www.Warmteatlas.nl.

De grote industriële warmtevragers in het gebied zijn FrieslandCampina (Leeuwarden), Sonac (Burgum), Suiker Unie (Vierverlaten), PPG Industries Fiber Glass (Westerbroek), ESKA Graphic Board (Hoogezand), Smurfit Kappa Solid Board (Nieuweschan), BioMethanol Chemie Nederland (Farmsum) en ESD-SIC (Farmsum) (bron: Warmte-atlas⁵) en Royal Aware (Heerenveen).

De grote niet-industriële warmtevragers zijn Royal Pride Holland, Kesgro, Kwekerij de Wieringermeer (afnemers van geothermie ECW Middenmeer), Hartman (Sexbierum), Reststoffen Energie Centrale (Harlingen), Nedmag Industries Mining & Manufacturing (Veendam) en E.ON Energy from Waste (Delfzijl) (bron: Warmte-atlas).

⁵ 'De Warmte-atlas toont een overzicht van de warmtevraag en -aanbod in Nederland' [...], en wordt uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie.

Grote energie-opwekkers zijn Nuon en Engie (Eemshaven), de BioEnergie Centrale Delfzijl en Delesto (Farmsum) (bron: Warmte-atlas).

De categorie 'overig' beslaat alle bedrijven met een warmtevraag van minder dan 100 TJ/jaar. Dit is veel minder dan een gemiddeld doublet produceert. Hierbij valt het grote aantal rioolwaterzuiveringen (RWZI) op. Er is voor deze figuur een ondergrens van 100 TJ/jaar gebruikt; warmtevragers die minder dan 100 TJ per jaar gebruiken zijn weergegeven met een zwarte stip.

Het Wetterskyp Fryslân heeft over de onder hun beheer vallende RWZI's de volgende informatie verstrekt. Een aantal rioolwaterzuiveringen vergist het restproduct van het biologische zuiveringsproces, zuiveringsslib. Dit vergisten gebeurt bij ongeveer 37°C en sporadisch bij 55°C. 's Zomers is minder warmte nodig dan 's winters. De meeste RWZI's waar ook slib wordt vergist maken gebruik van de warmte die vrijkomt bij het verbranden van het zelf geproduceerde biogas in een gasmotor (warmtekrachtkoppeling). De RWZI in Leeuwarden produceert bijvoorbeeld meer dan een miljoen kubieke meter gas per jaar, waarvan ongeveer 40% wordt gebruikt in de vergister. De gasmotor produceert zowel elektriciteit als warmte. Warmte was daardoor tot voor kort geen issue. Er zijn echter wel initiatieven om van het biogas geen stroom te maken, maar te verkopen als 'groen gas'. Als dit grootschalig gaat gebeuren ontstaat mogelijk wel behoefte aan externe warmte. Hiervoor zijn verschillende opties, waaronder geothermie, mogelijk in de vorm van restwarmte van FrieslandCampina in Leeuwarden.

Warmtenetten bestaan in Leeuwarden (Camminghaburen-Noord, Goutum, Techum en Unia, 3283 (1236) en Groningen (Vinkhuizen-Zuid, Korrewegbuurt, Rivierenbuurt en Lewenborg-Noord, 8469 (615)). Het rapport 'Toekomstbeeld klimaatneutrale warmtenetten in Nederland' van het Planbureau voor de Leefomgeving voorziet een grote groei van het aantal stadsverwarmingsnetten, met daarin een grote rol voor geothermie.

De vijf (bewoonde) Waddeneilanden hebben de ambitie energieneutraal en -onafhankelijk te worden. Zo heeft Ameland aangegeven een energieproeftuin te willen worden (zie het [nieuwsbericht](#) op www.nos.nl). Daarvoor is Duurzaam Ameland in het leven geroepen, met als partners de gemeente Ameland, netbeheerder Liander, energiebedrijf Eneco, TNO, Gasterra, de NAM, Phillips Lightning en de Hanzehogeschool Groningen/EnTranCe.

De in de Warmte-atlas geïnventariseerde warmtevraag op de Waddeneilanden is beperkt. Dit is in principe ongunstig voor de ontwikkeling van geothermie. De warmtevraag kan echter toenemen wanneer gemeenten op de eilanden (of het vasteland) overgaan tot de aanleg van warmtenetten. Verder kent de warmtevraag op de eilanden sterke seizoenseffecten vanwege het toerisme, wat in principe ook ongunstig is voor geothermie. Een doublet presteert namelijk optimaal wanneer het continu produceert. Een 'uptime' van 90% (ongeveer 8000 uur per jaar) is niet uitzonderlijk. Dat betekent echter ook dat de productie in de zomer, wanneer de vraag laag is, elders aangewend of opgeslagen zou moeten worden (HTO).

Ter illustratie, een bescheiden doublet van 5 MW_{th} produceert in 8000 draaiuren ongeveer 144 terajoule (TJ). Dit is voldoende voor het dekken van de warmtevraag van ruim 2000 huishoudens (uitgaande van 1500 kubieke meter gas per jaar, en zonder rekening te houden met seizoensfluctuatie).

3 Warmte-koudeopslag

Bij warmte-koudeopslag (WKO) wordt warm en/of koud water voor kortere of langere tijd opgeslagen in de ondiepe ondergrond. Wanneer dit voor langere tijd gebeurt, is sprake van seizoensopslag. Ook kan gebruik gemaakt worden van relatief kleine temperatuurverschillen tussen boven- en ondergrond om water te verwarmen of juist te koelen. De bodem wordt dan gebruikt als warmtewisselaar in een gesloten systeem. In een open systeem wordt 's zomers relatief koel water opgepompt om bijvoorbeeld gebouwen te koelen. Het aldus opgepompte water wordt in de ondiepe ondergrond opgeslagen om 's winters te gebruiken voor verwarming.

WKO staat om een aantal redenen los van hoge-temperatuuropslag (HTO) en geothermie:

- De diepte is beperkt tot enkele honderden meters [NB HTO is in principe ook mogelijk op deze geringe diepte]
- De temperatuurverschillen zijn beperkt
- De techniek is volkomen marktrijp – WKO-systemen worden routinematig toegepast op vele plaatsen in Nederland (Figuur 3.1).

Met name om de laatste reden wordt WKO in dit rapport alleen summier beschreven. Voor meer informatie wordt verwezen naar de online WKO-tool. Onderstaande tekst is hiervan afkomstig:

‘De WKO-tool maakt gebruik van bestaande gegevens over de ondergrond om te berekenen of bedrijven of particulieren geld kunnen besparen als ze via een bodemwarmtewisselaar of open bron met warmte-koudeopslag energie winnen. Door een plek op de kaart aan te klikken en een aantal variabelen in te voeren wordt een berekening gestart met als resultaat een quickscan inclusief grafieken waarin de terugverdientijden ten opzichte van gebruik van conventionele energiebronnen staan.

In de WKO-tool worden daarnaast kaarten getoond met verbods- en aandachtsgebieden. In gebieden waar bijvoorbeeld drinkwater wordt gewonnen is het uitvoeren van grondboringen namelijk verboden.’

‘In de WKO Tool Nederland worden alleen de ondiepe bodemenergiesystemen [<500 meter diepte] doorgerekend. De diepe systemen, waaronder geothermie of aardwarmte, maken geen deel uit van de WKO Tool Nederland. Ook speciale systemen, zoals hoge temperatuuropslagsystemen (HTO), maken geen deel uit van de WKO Tool Nederland.

De ondiepe bodemenergiesystemen die in de WKO Tool Nederland worden doorgerekend zijn de open- en de gesloten bodemenergiesystemen. Andere termen die gebruikt worden voor de open bodemenergiesystemen zijn warmte-/koudeopslag (WKO), koude-/warmteopslag (KWO) en energieopslag (EOS). Andere termen die gebruikt worden voor de gesloten bodemenergiesystemen zijn bodemwarmtewisselaars (BWW) en bodemlussen.

De WKO Tool Nederland geeft een advies met betrekking tot de verticale varianten van de open- en gesloten bodemenergiesystemen. Horizontale open- en gesloten bodemenergiesystemen en bodemkorven vallen hier dus niet onder.’

‘De webapplicatie is een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Milieu en is uitgevoerd door IF Technology bv.’



Figuur 3.1 Open (bruin) en gesloten (beige) WKO-systemen in de Waddenprovincies. Bron: www.wkotool.nl

4 Hoge-temperatuuropslag

4.1 Wat is HTO

Hoge temperatuur opslag (HTO) heeft betrekking op opslag met een minimum temperatuur van 50°C (definitie Internationaal Energie Agentschap). In Nederland wordt ook wel 60°C gehanteerd. De opslag kan van korte duur zijn (zelfs een dag) of seizoensopslag betreffen. Bij seizoensopslag wordt uitgegaan van een termijn van ten minste drie maanden.

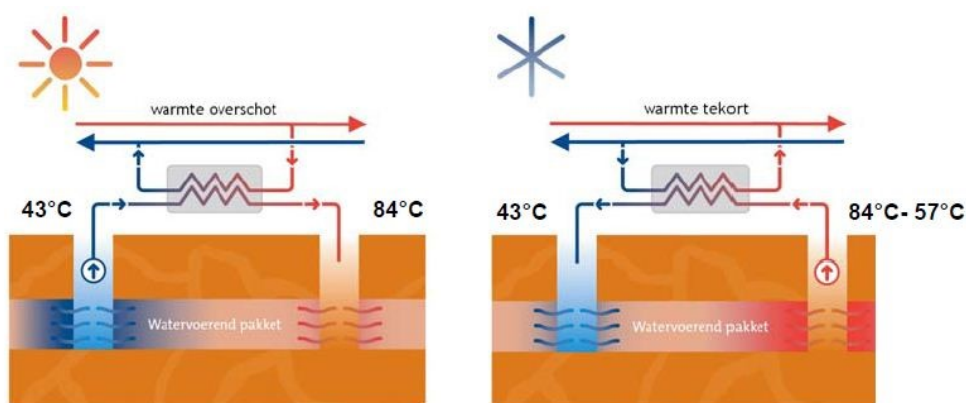
Het opslaan van warmte in de bodem (tot een diepte van 500m) is momenteel wettelijk begrensd is op 25-30°C. Uitzonderingen zijn echter mogelijk, als het bijvoorbeeld gaat om een demonstratieproject. Temperaturen tot 25°C vallen onder WKO, waarvoor ander wettelijk kader geldt.

Figuur 4.1 en Figuur 4.2 tonen het HTO-concept schematisch, als seizoensopslag of in combinatie met een geothermische bron. Het voordeel van de laatste is dat de geothermische bron het hele jaar door kan produceren. Dit verhoogt de load factor (en dus de economische rendabiliteit) aanzienlijk, en is ook beter voor de technische staat van het systeem. De overproductie in de zomer ten opzichte van de vraag kan opgeslagen worden, en in de winter ingezet wanneer de vraag groter is dan de productie van de geothermische bron. Combinaties met andere (duurzame) warmtebronnen zijn uiteraard ook mogelijk.

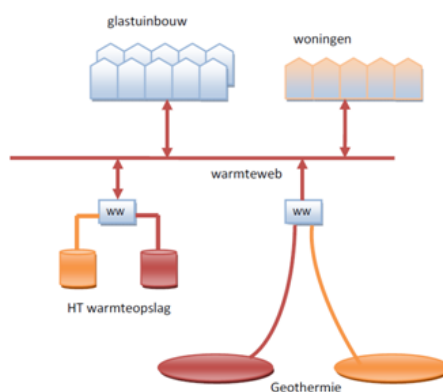
Bijna 40% van het energiegebruik in Nederland betreft warmtevoorziening. Het wordt steeds belangrijker om de productie van en vraag naar (rest-)warmte optimaal op elkaar af te stemmen. Opslag van warmte (en koude) is daarom van belang in de warmtetransitie. HTO is ook een van de goedkoopste vormen van energieopslag. WKO, in de ondiepe ondergrond, is in verschillende sectoren, waaronder de glastuinbouw, al lang een veel gebruikte techniek.

Vooralsnog wordt voornamelijk gebruik gemaakt van lage-temperatuur warmte-opslag (25 tot 30°C). Opslag bij middelhoge temperaturen ('MTO', 30 tot 60°C) en hoge temperatuur (hoger dan 60°C) biedt echter goede kansen om restwarmte vanuit de industrie beter te gebruiken, efficiënter om te gaan met energie en onze energie-infrastructuur en tegelijkertijd de baten voor marktpartijen te verhogen. De techniek kan ook een belangrijke schakel betekenen in het verduurzamen van de Nederlandse warmtenetten doordat het overschot aan warmte (en elektriciteit) van wind, zon, geothermie en industriële restwarmte in de zomer kan worden opgeslagen en gebruikt in de winter.

HTO wordt echter niet breed toegepast in de Nederlandse ondergrond. Demonstratie van de techniek, de robuustheid van de business case en het bijbehorende juridische kader zijn belangrijke punten die de implementatie ervan beïnvloeden. Reductie van onzekerheden op deze gebieden (techniek, business case, regelgeving) zal investeringen in dergelijke systemen door marktpartijen stimuleren en uitrol van HTO in Nederland stimuleren.



Figuur 4.1 Seizoensopslag met behulp van HTO; warmteopslag in de zomer (links) en warmte-productie in de winter (rechts) ⁶



Figuur 4.2 Schematische weergave HTO in combinatie met een geothermische bron (project GEOMECH4P) ⁷

Met een HTO-systeem kan meer energie per volume worden opgeslagen en teruggewonnen in vergelijking met een systeem met lage temperatuur. Het vermogen neemt ook toe bij hogere temperatuur. Dit alles kan een ook een hoger rendement opleveren, mits het systeem maar groot genoeg is (5 of 10 MW_{th} wordt genoemd als minimum). Het uiteindelijke rendement is sterk afhankelijk van de geologische condities. Onderaan de streep kunnen kosten per eenheid warmte hierdoor lager zijn dan bij lage-temperatuuropslag.

Drijver (2012) en De Zwart (2009) vatten kort samen wat de belangrijkste voordelen zijn van hoge-temperatuuropslag boven lage-temperatuuropslag:

- Het rendement kan hoger zijn, omdat de temperatuur van de bodem toeneemt met de diepte (in geval dat HTO op grotere diepte plaatsvindt).
- De inzet van de warmtepomp kan worden beperkt of zelfs overbodig worden gemaakt.

⁶ Bron: http://ro-online.robeheer.nl/svhw/09A51F05-ECD5-4185-A533-EA07CA8F9225/t_NL.IMRO.0501.geomec4p-0140_2.2.html

⁷ Bron: http://ro-online.robeheer.nl/svhw/09A51F05-ECD5-4185-A533-EA07CA8F9225/t_NL.IMRO.0501.geomec4p-0140_2.2.html

- Het temperatuurverschil tussen de warme en de koude bron is bij hoge-temperatuuropslag aanzienlijk groter dan bij lage temperatuur WKO. Bij eenzelfde waterverplaatsing kan veel meer energie worden opgeslagen en geleverd.
- Hoge-temperatuuropslag kan interessant zijn als in de zomer bronnen van (rest)warmte beschikbaar zijn, en in de winter de warmtevraag groter is dan het aanbod.

Er zijn echter ook nadelen:

- Boringen dieper dan 800 meter vragen een zwaardere booropstelling in vergelijking met ondiepe boringen. Dit leidt tot aanzienlijk hogere kosten voor het boren van de putten.
- Van de diepe ondergrond is minder gedetailleerde informatie beschikbaar dan van de ondiepe ondergrond. Daardoor zijn de geologische risico's groter dan bij ondiepe opslag. De risico's kunnen worden beperkt door het uitvoeren van gedegen vooronderzoek per locatie, eventueel ondersteund door informatie afkomstig uit proefboringen.
- Opslag op grotere diepte (>800 m) kan een lager rendement hebben door hogere wrijvingsverliezen in de put. Dit kan bijvoorbeeld opgelost worden door een grotere putdiameter.

Voor HTO is het verder van belang om onder te verdelen in diepe HTO (>500 meter onder maaiveld) en ondiepe HTO (<500 meter onder maaiveld). Dit is van belang in verband met het juridisch kader, maar ook zeker in verband met voor- en nadelen van technische aard. Om de optimale inrichting van de HTO te bepalen zijn locatie specifieke situaties altijd van groot belang. Belangrijke aspecten hierbij zijn de warmtevraag (hoge en lage temperatuur), warmte-aanbod en plaatselijke geologische condities.

Zoals bij WKO bestaan open en gesloten systemen. Open systemen hebben in vergelijking met gesloten systemen doorgaans een groter opslagvermogen en een groter debiet (50 tot 250 m³/uur).

4.2 Voorwaarden

De kansen voor HTO worden, zoals eerder vermeld, met name bepaald door techno-economische en juridische randvoorwaarden. De belangrijkste voorwaarden worden hier besproken.

4.2.1 Technisch-economische voorwaarden

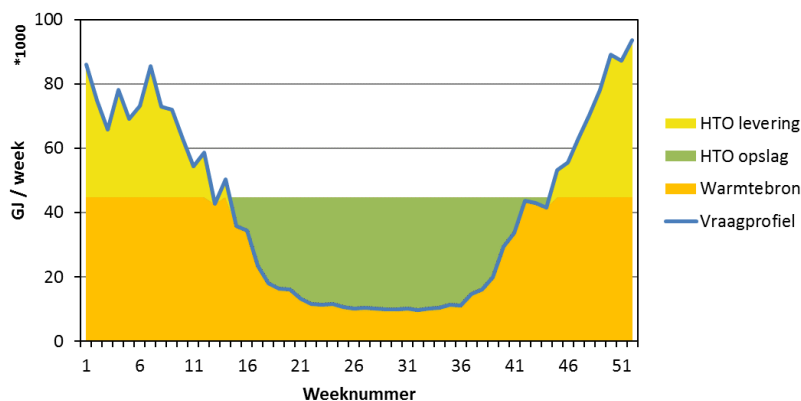
Lage marginale kosten warmte

Een HTO kent hogere investeringskosten dan een conventionele WKO. Ook treden verliezen op in ondergrond, zodat niet alle geïnjecteerde warmte kan worden teruggewonnen. Om een HTO project financieel aantrekkelijk te maken moeten een of meer warmtebronnen aanwezig zijn met lage marginale kosten, zoals restwarmte van industrie of elektriciteitsproductie, zonnewarmte of geothermie.

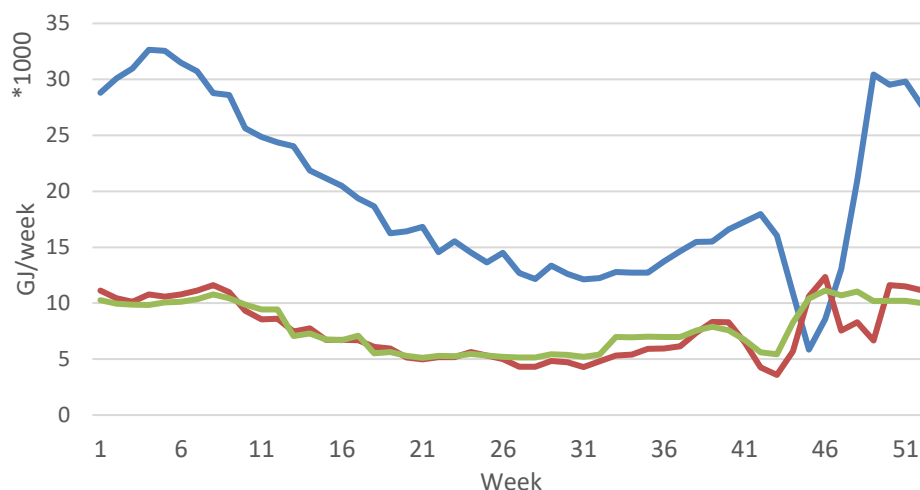
Significant seizoenseffect warmtevraag en aanbod

Een significant seizoenseffect moet aanwezig zijn voor een succesvolle business case. De HTO kan worden opgeladen in de zomer en worden gebruikt in de winter

(Figuur 4.3). De warmtevraag voor het verwarmen van huizen en gebouwen in een warmtenet heeft een typische 'badkuip' vorm; de warmtevraag is in de winter veel groter dan in de zomer. Voor tuinbouw kan het vraag- en aanbodprofiel anders zijn, afhankelijk van het geteelde gewas (Figuur 4.4).



Figuur 4.3 Typische 'badkuip'-vorm voor warmtevraag en -aanbod in een warmtenet. Schematisch is weergegeven hoe een HTO kan worden gevuld in de zomer en gebruikt in de winter voor warmtelevering.



Figuur 4.4 Voorbeelden van warmtevraag en -aanbod van drie kwekerijen.

Tabel 4.1 Eigenschappen van de belangrijkste aquifers voor HTO. Bron: KEMA, DLV Glas & Energie en IF Technology (2012)

Formatie	Debiet (m ³ /uur)	Diepte basis (m)	Netto dikte (m)	Commentaar
Formatie van Maassluis	0-150	200-500 m	0-120	Komt niet overal voor
Formatie van Oosterhout	30-100	200-700	0-100	
Formatie van Breda	0-50	300-750	0-50	
Brussel Zand	<45	300->1000	30-60	

Bodemgeschiktheid

Een geschikte aquifer is nodig waarin de warmte kan worden opgeslagen. De diepte, dikte en met name permeabiliteit bepalen de geschiktheid. De aanwezigheid van een afsluitende laag boven de aquifer verhoogt het rendement; veel grondwaterstroming verlaagt het rendement.

Voor het waddengebied lijken er vier kansrijke aquifers voor warmteopslag te zijn (Figuur 4.6). Tabel 4.1 toont de gemiddelde eigenschappen.

Temperatuur

Het temperatuurverschil tussen de geïnjecteerde warmte in de warme put en teruggevoerde temperatuur in de koude put bepaalt, samen met het debiet, het vermogen van het systeem. De geleverde temperatuur uit de HTO moet hoger zijn dan de gevraagde temperatuur om de inzet van een warmtepomp te vermijden. Een combinatie met een warmtepomp kan aantrekkelijk zijn indien de geleverde temperatuur uit de HTO lager is dan de gewenste temperatuur.

Schaal

De schaal moet groot genoeg zijn. Een vuistregel voor de vraagkant is een thermisch vermogen van minimaal 5-10 MW_{th} en 2500 draaiuren per jaar. Dit is ongeveer gelijk aan het verwarmen van minimaal 1000 woningen.

Opslagrendement

Het opslagrendement is de verhouding tussen de opgeslagen warmte en de nuttig geleverde warmte. Het opslagrendement van een gemiddeld HTO-systeem ligt tussen de 50 en 70%, maar 75 tot 80% is mogelijk. Het rendement neemt doorgaans toe gedurende de eerste paar cycli van opslag en terugwinning van warmte doordat het reservoir opwarmt.

4.2.2 Juridische voorwaarden

Ondiepe HTO (<500 m diepte) is mogelijk binnen het bestaande juridisch kader; al is het op basis van uitzondering (onderzoeksproject). Het bevoegd gezag stelt wel eisen aan onderzoek en monitoring om mogelijk nadelige effecten van hogere injectietemperatuur en het warmteoverschot beter in kaart te brengen en te mitigeren.

In het AMvB wordt helder toegelicht dat het altijd nodig blijft maatwerk te leveren voor open bodemenergiesystemen, HTO is daar een goed voorbeeld van. De Waterwet, Waterbesluit en Waterregeling bevatten de wettelijke eisen die aan een vergunning worden gesteld. De aanvullende voorschriften volgen dan vanuit Gedeputeerde Staten van de provincie die zal putten uit de BUM⁸ provinciale taken. Dit levert een set van toetsingscriteria op voor HTO-systemen.

De belangrijkste aandachtspunten voor ondiepe HTO-systemen zijn:

- de hogere temperatuur en mogelijke effecten
- de hoeveelheid opgeslagen warmte, het overschot en de mogelijke effecten
- het verwachte en gerealiseerde energierendement

4.3 Kansen in de ondergrond van de Waddenprovincies

Het is mogelijk om de kansen voor HTO projecten in de Waddenprovincies te schatten door technische en economische voorwaarden zoals besproken in de vorige

⁸ Besluitvormings Uitvoerings Methode

sectie toe te passen. Kansrijke gebieden worden allereerst bepaald door de warmtevraag. De volgende typen warmtevragers zijn geïdentificeerd waar naar verwachting voldoende vraag is die ook een seizoenseffect (kunnen) hebben:

- Warmtenetten
- Glastuinbouwgebieden
- Grote industriële warmtevragers

Verschillende kaarten zijn geraadpleegd die relevante informatie bevatten over zowel de vraag naar warmte en het aanbod ervan (restwarmte, geothermie). Ook zijn kaarten geraadpleegd die de geschiktheid van de ondergrond aangeeft voor HTO-toepassing. Op basis hiervan zijn voorlopige **HoTspOts** geïdentificeerd.



Figuur 4.5 Hotspots voor HTO

4.3.1 Warmtenetten

In het Waddengebied lijken drie warmtenetten op dit moment relevant. Twee ervan zijn operationeel (Leeuwarden en Hoogezand-Sappemeer) en een (Groningen) is in ontwikkeling.

Leeuwarden

Op dit moment zijn er ongeveer 1000 woningen, een zwembad en twee sporthallen gekoppeld aan het warmtenet in Leeuwarden. Dit net, eigendom van EnNatuurlijk, is momenteel gasgestookt, maar geothermie en gebruik van restwarmte van het nabijgelegen FrieslandCampina behoort tot de mogelijkheden voor de toekomst. In het verleden zijn er ambities uitgesproken voor uitbreiding richting 40.000 woningequivalenten. Wanneer het net zal worden uitgebreid en gevoed zal worden door aardwarmte en/of restwarmte lijken er gezien de geschiktheid van de ondergrond (formatie van Maasluis, Oosterhout of Breda) mogelijkheden te zijn voor het realiseren van een HTO. Wanneer het net gevoed blijft worden door gasgestookte centrale is dit minder gunstig voor de financiële haalbaarheid van de HTO.

Groningen

WarmteStad is een gezamenlijk initiatief van Waterbedrijf Groningen en gemeente Groningen en heeft als doel om Groningers en bedrijven van duurzame warmte en koude te voorzien.

Op dit moment wordt onderzocht of WarmteStad met het project 'Warmtenet Noordwest' op een duurzame manier meer dan 10.000 huishoudens van warmte kan voorzien. Door het boren van een geothermiebron op het Zerniketerrein, kunnen vanaf eind 2017 door middel van het warmtenet noordwest vele huizen, kantoren en bedrijven duurzaam van warmte worden voorzien. De voorziene warmtebronnen zijn een WKK centrale van ongeveer 1 MW_{th} en een geothermie doublet dat meer

verwacht wordt meer dan 10 MW_{th} te leveren. Tijdens piekvraag zullen gasgestookte piekcentrales worden ingezet. Een HTO wordt interessant op het moment dat de belangrijkste warmtebron, de aardwarmte, gedurende langere periodes in het jaar niet meer de vraag kan dekken. Deze situatie wordt niet voorzien in de eerste jaren van operatie. Bij uitbreiding van het warmtenet zal een HTO mogelijk zeer interessant zijn door de relatief lage marginale kosten van de warmte van de aardwarmte bron. De bodem lijkt ter plaatse vooralsnog geschikt (Formaties van Oosterhout of Breda, Figuur 4.6).

Hoogezand Sappemeer

De gemeente Hoogezand-Sappemeer is initiatiefnemer van het project, samen met de stichting Energy Valley en de provincie Groningen. Waterbedrijf Groningen Duurzaam is verantwoordelijk voor de realisatie en exploitatie van het warmtenet. Sinds 2016 zijn een sportcentrum en gebouwen aangesloten op het net. De gemeente en Waterbedrijf Groningen zullen samen met de provincie, wooncorporaties en Eska Graphic Board gaan verkennen hoe in de toekomst nog meer huizen van duurzame warmte kunnen worden voorzien. De restwarmte van Eska Graphic Board kan dan worden ingezet om warmte te leveren aan het net. In de huidige configuratie is het net hoogstwaarschijnlijk te klein om interessant te zijn voor een HTO. Bij toekomstige uitbreiding van het net en wanneer gevoed door restwarmte met lage marginale kosten kan een HTO financieel interessant worden. De bodem lijkt ter plaatse vooralsnog geschikt (Formatie van Oosterhout, Figuur 4.6).

4.3.2 Tuinbouw

In een eerdere studie zijn enkele tuinbouwgebieden onder de loep genomen om de potentie voor aardwarmte in kaart te brengen (KEMA, DLV Glas & Energie en IF Technology 2012). Dit levert schattingen op voor het debiet dat ter plaatse mogelijk kan worden gehaald met een HTO, bijvoorbeeld in combinatie met een geothermiebron. Op basis van die studie zijn de volgende gebieden beschouwd in dit rapport (Figuur 4.7).

- Sexbierum
- Berlikum
- Hoogezand Sappemeer
- Eemshaven (gepland)
- ECW Agriport

Tabel 4.2 Relevante eigenschappen van de Formaties van Maassluis en Oosterhout rond Sexbierum, Berlikum en Hoogezand-Sappemeer, Eemshaven en ECW Agriport. Bron: KEMA, DLV Glas & Energie en IF Technology (2012)

Locatie	Maassluis			Oosterhout			Breda		
	Debiet	Diepte	Temperatuur	Debiet	Diepte	Temperatuur	Debiet	Diepte	Temperatuur
Sexbierum	50-95	449	23,6	30-55	544	27,1		596	29,7
Berlikum	0	265	20,1	30-55	299	21,3	25-50	448	25,1
Hoogezand Sappemeer				55-100	248	17,2	0	249	18,8
Eemshaven							25-50	343	21,7
ECW Agriport							25-50	758	33,9

Eigenschappen die verder van groot belang zijn om te inventariseren voor deze gebieden is de totale warmtevraag en het profiel. Dat is niet in detail uitgezocht in deze studie. Verder is het noodzakelijk om te begrijpen in hoeverre deze tuinbouwgebieden een vraag hebben naar CO₂. Als momenteel de vraag naar CO₂ wordt gedekt door de ketel of WKK ter plaatse dan moet hier een oplossing voor te worden gevonden wanneer een gebied overschakelt op een warmtenet met HTO of geothermiebron met of zonder HTO. Een andere zaak die nadere verkenning behoeft is of deze gebieden al bedrijven hebben met een WKO. Dit lijkt het geval te zijn voor Berlikum (bron: WKO-tool) In dat geval kan de bestaande WKO mogelijk opgewaardeerd worden naar een hogere temperatuur.

4.3.3 *Grote warmtevraag industrieel*

Figuur 2.2, Figuur 4.8 en Figuur 4.9 tonen de industriële restwarmteproducenten en warmtevragers. De figuren laten mogelijk interessante locaties en clusters zien waar HTO zou kunnen worden ingepast. Een belangrijke onbekende variabele is echter het locatie-specifieke warmteprofiel, inclusief de temperatuur van vraag en aanbod. Ook het verloop van vraag en aanbod gedurende het jaar is niet uitgezocht voor deze locaties. Dit maakt het mogelijk om alleen op zeer grove manier enkele locaties en clusters te benoemen dit interessant lijken te zijn voor vervolgonderzoek.

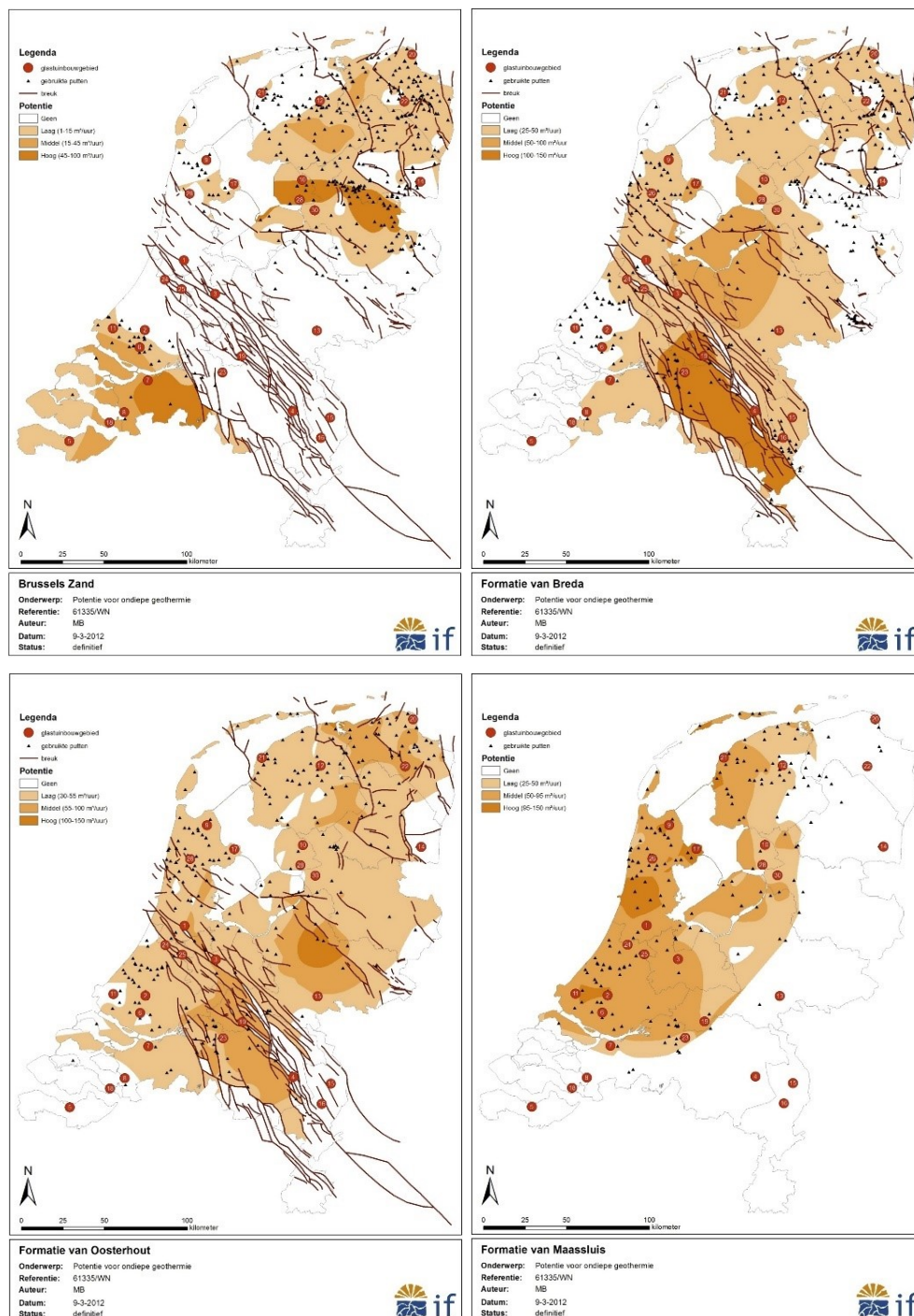
Het cluster Delfzijl lijkt zowel partijen te kennen die restwarmte hebben als partijen die een warmtevraag hebben. HTO zou een goede mogelijkheid zijn om eventuele koppeling tussen deze partijen te ondersteunen doordat opslag een mismatch in vraag en aanbod over de tijd kan overbruggen en zo de leveringszekerheid kan verbeteren.

Het cluster Eemshaven heeft veel restwarmte door de aanwezige elektriciteitsproductie faciliteiten. Grootschalige warmtevraag aldaar is vooralsnog niet bekend en ook niet onderzocht in deze studie. Het cluster lijkt interessant indien er grootschalige warmtevragers zijn of zullen worden gevestigd.

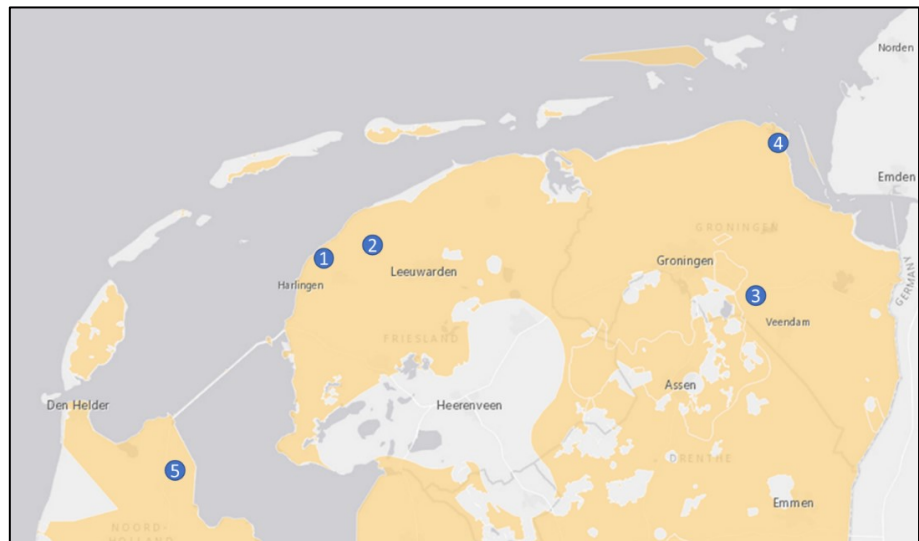
De clusters Leeuwarden, Groningen stad en Hoogezand Sappemeer zijn reeds genoemd (zie 'Warmtenetten') en komen ook naar voren als interessante clusters voor grote industriële warmtevraag.

Het cluster Harlingen is ook mogelijk interessant voor verdere bestudering daar de Reststoffen Energie Centrale reeds warmte levert aan bedrijven in de directe omgeving. Het figuur laat in de omgeving Harlingen een aantal warmtevragers zien. Uitbreiding van warmtelevering, mogelijk in combinatie met andere warmtebronnen, kan ook implementatie van HTO interessant maken. De ondergrond lijkt dit vooralsnog niet tegen te houden.

Ultradiepe geothermie in combinatie met HTO zou voor deze clusters ook mogelijk zeer interessant kunnen zijn op termijn. Om met meer zekerheid de kansen in te schatten voor deze technologie(combinatie) moeten de voorwaarden zoals geschetst in sectie 4.2 in meer detail worden uitgezocht voor deze clusters.



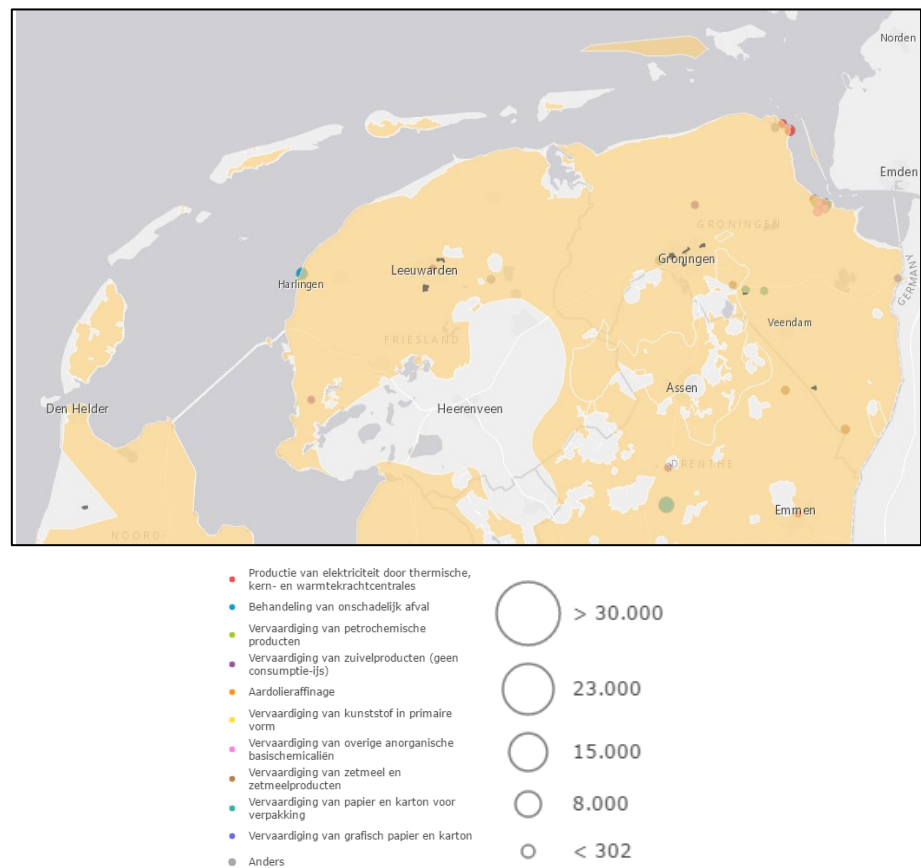
Figuur 4.6 Geschatte debieten (m^3/uur) voor de formaties van Maassluis, Oosterhout, Breda en Brussels Zand. Bron: KEMA, DLV Glas & Energie en IF Technology (2012).



Figuur 4.7 Tuinbouwgebieden in de Waddenprovincies in combinatie met geschikte ondergrond voor HTO. Uitgezonderde gebieden (grijs): natuur- of drinkwaterwingebieden.



Figuur 4.8 Warmtenetten in de Waddenprovincies in combinatie met geschikte ondergrond voor HTO. Uitgezonderde gebieden (grijs): natuur- of drinkwaterwingebieden.



Figuur 4.9 Locatie en eigenschappen (type en grootte van restwarmtebronnen) in combinatie met geschikte ondergrond voor HTO. NB. de Eemshavencentrale niet weergegeven.

5 Diepe geothermie

5.1 Wat is diepe geothermie

Diepe geothermie is een vorm van aardwarmtewinning waarbij warm water gewonnen wordt uit gesteentelagen die zich bevinden op dieptes tussen ongeveer één en drie à vier kilometer. Het kenmerk van diepe geothermie is dat deze gesteenten voldoende natuurlijke doorlatendheid hebben om het water te kunnen winnen zonder dat het reservoir gestimuleerd hoeft te worden (niet alle gesteenten tussen een en drie kilometer diepte hebben voldoende permeabiliteit voor een conventioneel doublet). Ondieper dan ongeveer een kilometer is het water relatief koel (ongeveer 40°C) en daarom voor veel toepassingen minder goed bruikbaar. De bestaande operationele systemen in Nederland produceren water met temperatuur tussen 65 en 100°C, allen voor verwarming van kassen⁹. Al naar gelang de warmtevraag is het mogelijk koeler (ondieper) of warmer (dieper) water te gebruiken. Op geringe diepte is de maximaal toegestane pompdruk kleiner, zodat het te behalen debiet ook kleiner is. Dieper dan ongeveer drie kilometer is de natuurlijke permeabiliteit van het gesteente vaak onvoldoende om water economisch te kunnen winnen.

5.2 Doublet

Diepe geothermische warmte wordt in de regel geproduceerd met behulp van twee boringen (Figuur 5.1). Warm water wordt uit het reservoir gepompt door een eerste put die de producer wordt genoemd. Warmte wordt aan het opgepompte water onttrokken in een warmtewisselaar. Het afgekoelde water wordt vervolgens in het reservoir teruggepompt door een tweede put die de injector heet.

Het vermogen van een doublet hangt af van een aantal factoren:

- Reservoir eigenschappen zoals diepte, dikte, temperatuur en permeabiliteit.
- Doublet- en pompeigenschappen zoals pompdruk en afstand tussen de putten op reservoirniveau.
- Puteigenschappen zoals diameter, ruwheid en inclinatie van de buis.

Sommige factoren zijn redelijk of zelfs goed bekend, zoals de put- en pompeigenschappen. Omtrent andere eigenschappen, met name de reservoir eigenschappen, bestaat meestal onzekerheid voordat er geboord is. Diepte, dikte en permeabiliteit zijn pas bekend, op de boorlocatie, wanneer het reservoir aangeboord is. Daarom is het vermogen van een doublet onzeker zolang de boringen niet afgerond zijn. Omdat de reservoir eigenschappen ruimtelijk variëren, bestaat zelfs na het boren nog onzekerheid – de eigenschappen op de locatie van de put kunnen verschillen van de situatie 1, 100 of 1000 meter verderop.

Aan de oppervlakte staan beide putten meestal op slechts enkele meters van elkaar. Doordat een deel van het boortraject niet verticaal maar schuin is, is de onderlinge afstand op de diepte van het reservoir meestal meer dan een kilometer.

⁹ Een doublet in Pijnacker, aangelegd om kassen te verwarmen, levert inmiddels ook warmte aan een aantal huizen

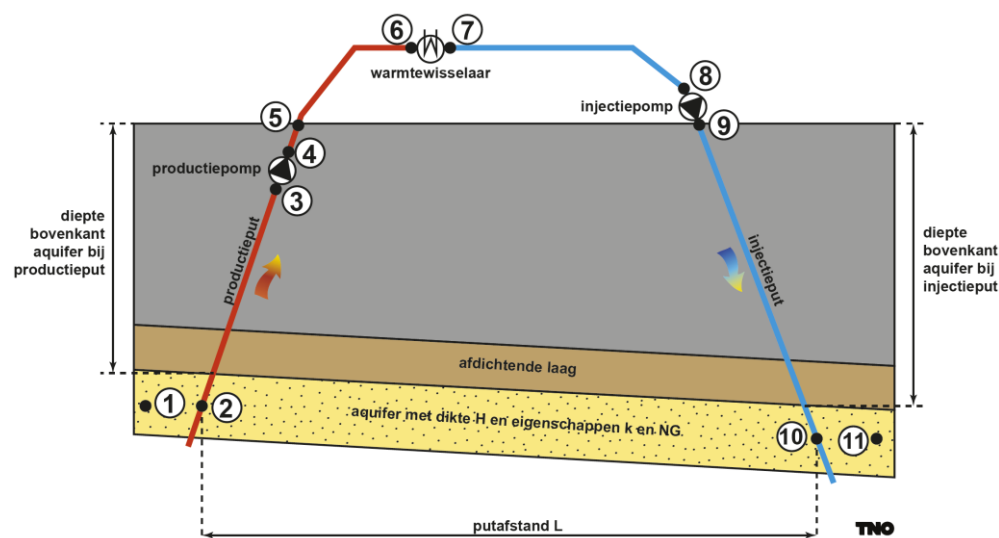
Een groter vermogen kan bovendien behaald worden als een zo groot mogelijke reservoirsectie aangeboord wordt door het reservoir schuin of zelfs (sub)horizontaal aan te boren.

5.3 One-hole warmtewisselaar

In het buitenland wordt soms ook diepe bodemwarmte geproduceerd met systemen die uit een enkele boring bestaan ('one hole'). De bodem wordt in dit geval als warmtewisselaar gebruikt. Een koude vloeistof naar beneden gepompt, waar hij door de warmte ondergrond wordt opgewarmd en vervolgens weer omhoog gepompt. Zowel gesloten als open systemen zijn mogelijk. Berekeningen laten echter zien dat de gesteenten in de Nederlandse ondergrond relatief ongeschikt zijn voor dit soort systemen – het te behalen vermogen is klein, en de ondergrond in de nabijheid van de put koelt relatief snel af waardoor het vermogen afneemt.

5.4 DoubletCalc

Om toch vòòr het boren – en dus voor het moeten doen van een grote investering – een idee te krijgen van de mogelijke opbrengst van een doublet, is de software DoubletCalc ontwikkeld (Figuur 5.2). DoubletCalc berekent een indicatief geothermisch vermogen vòòr het boren. In DoubletCalc worden de voor het vermogen belangrijke eigenschappen van de ondergrond, en die van pomp en putten ingevoerd, inclusief de onzekerheid. De eigenschappen van de ondergrond kunnen worden geschat wanneer relevant geologisch onderzoek is uitgevoerd. De eigenschappen van pomp en putten zijn ontwerpkeuzes. Door Monte-Carlo simulatie wordt vervolgens een verwachtingscurve van het vermogen berekend. In het voorbeeld van Figuur 5.3 is het verwachte vermogen bijvoorbeeld $8.33 \text{ MW}_{\text{th}}$, maar er is ook een kans van 10% dat het vermogen minder is dan 6.42 , en 10% dat het meer is dan $11.23 \text{ MW}_{\text{th}}$. In het voorbeeld is de belangrijkste onzekerheid die in de permeabiliteit, die in dit geval tussen 150 en 500 mD ligt. DoubletCalc wordt onder meer (verplicht) gebruikt voor subsidieaanvragen zoals SDE+ en het Garantiefonds (hoofdstuk 7). DoubletCalc ligt ook ten grondslag aan het ThermoGIS-model (zie paragraaf 5.5)



Figuur 5.1 Schematische weergave van een doublet.

TNO Doublet Calculator 1.4

number of simulation runs (-) 1000 Calculate! Open Scenario Save Scenario Exit Program

file: D:\doubletcalc14\example.xml

Geotechnical input

A) Aquifer properties

Property	min	median	max	Property	value
aquifer permeability (mD)	150	250	500	aquifer kh/kv ratio (-)	1
aquifer net to gross (-)	0.75	0.80	0.85	surface temperature (°C)	10
aquifer gross thickness (m)	95	105	115	geothermal gradient (°C/m)	0.031
aquifer top at producer (m TVD)	2255.0	2505	2756.0	[mid aquifer temperature producer (°C)]	0
aquifer top at injector (m TVD)	2221.0	2468	2715.0	[initial aquifer pressure at producer (bar)]	0.0
aquifer water salinity (ppm)	100000	120000	140000	[initial aquifer pressure at injector (bar)]	0.0

B) Doublet and pump properties

Property	value
exit temperature heat exchanger (°C)	35
distance wells at aquifer level (m)	1460
pump system efficiency (-)	0.61
production pump depth (m)	500
pump pressure difference (bar)	40

C) Well properties

calculation length subdivision (m) 50

Producer

outer diameter producer (inch)	6.125
skin producer (-)	0
penetration angle producer (deg)	45
skin due to penetration angle p (-)	-0.97

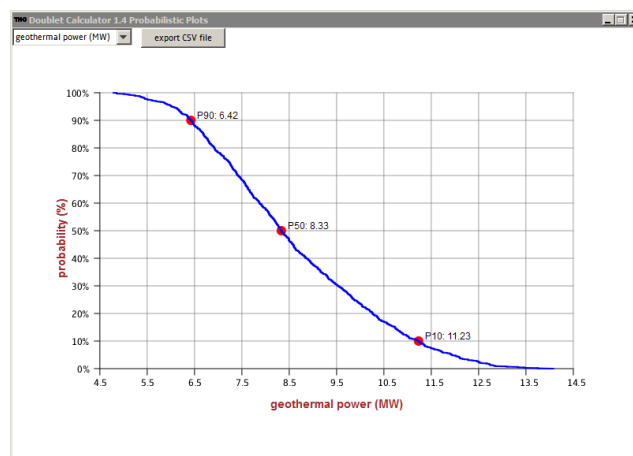
Injector

outer diameter injector (inch)	6.125
skin injector (-)	0
penetration angle injector (deg)	45
skin due to penetration angle i (-)	-0.97

Segment	pipe segment sections p (m AH)	pipe segment depth p (m TVD)	pipe inner diameter p (inch)	pipe roughness p (milli-inch)	Segment	pipe segment sections i (m AH)	pipe segment depth i (m TVD)	pipe inner diameter i (inch)	pipe roughness i (milli-inch)
1	500	500	5	1.2	1	50	50	5	1.2
2	1054	1054	12.375	1.2	2	1054	1054	12.375	1.2
3	1930	1833	8.625	1.2	3	1930	1833	8.625	1.2
4	2678	2505	6.625	1.2	4	2645	2468	6.625	1.2
5					5				
6					6				
7					7				
8					8				

[] optional

Figuur 5.2 DoubletCalc invoerscherm



Figuur 5.3 DoubletCalc uitvoerscherm van het geothermisch vermogen. Met de in Figuur 5.2 getoonde bodemeigenschappen, de opgegeven onzekerheid en doubletconfiguratie is de kans 90% op minimaal 6.42 MW_{th}, 50% op minimaal 8.33 MW_{th}, etc. De kans op minimaal 10 MW_{th} is ongeveer 25%.

5.5 ThermoGIS

ThermoGIS is een regionaal geothermisch model van geheel Nederland dat ontwikkeld is met als belangrijkste doel het bedrijfsleven en overheden te ondersteunen bij het ontwikkelen van aardwarmtewinning. Het model is te raadplegen op www.thermogis.nl. Het bevat onder meer kaarten die de geothermische potentie, thermisch vermogen, toepassingsschaal en technische potentie tonen¹⁰. De basis van het model zijn diepte- en diktekaarten van de belangrijkste reservoirs (paragraaf 1.3.3), kaarten met reservoir eigenschappen (met name permeabiliteit), en een 3D temperatuurmodel (paragraaf 1.3.4). Deze zijn gebruikt, in combinatie met een economisch model dat de kosten en baten van een doublet berekent, om de potentiekaarten te maken.

Behalve de website met het 'ThermoGIS Basic' model is er een stand alone applicatie 'ThermoGIS Expert'. In deze applicatie is het mogelijk alle kaarten te bekijken die ten grondslag liggen aan de potentiekaarten. Deze applicatie wordt momenteel niet meer ondersteund en zal in de loop van 2017 worden vervangen door extra functionaliteit van de webversie. Hij is nog wel te downloaden van de website.

Figuur 5.4 toont de ThermoGIS geothermische potentiekaart van Nederland voor gebruik in kassen¹¹, voor diepe geothermie. Bij een 'mogelijke potentie' is er sprake van 30-50% kans dat de ondergrondse gesteldheid goed genoeg is om een doublet te realiseren dat 10 MW_{th} produceert. Bij een 'goede potentie' is de kans groter dan 50%. Deze kansen zijn bepaald aan de hand van verwachtingscurves van het vermogen zoals getoond in Figuur 5.3. Deze zijn op hun beurt weer gebaseerd op probabilistische berekeningen met DoubletCalc, en berekeningen over economische rendabiliteit.

Potentie onbekend?

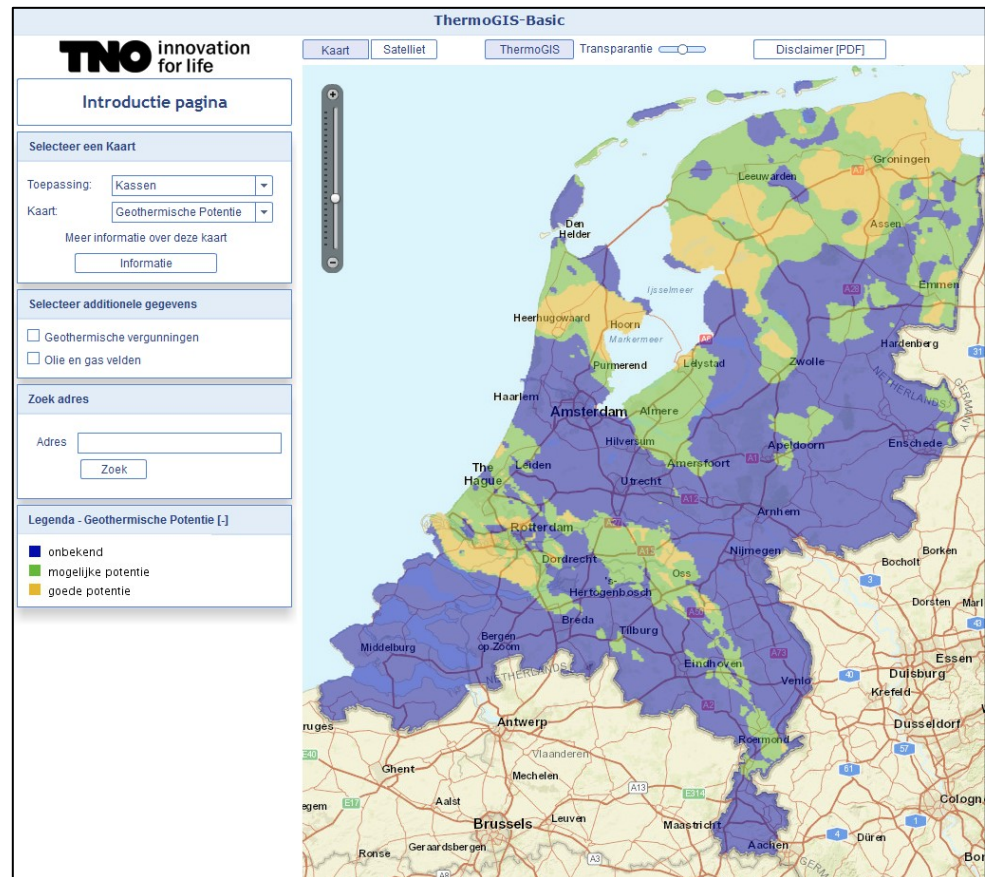
De ThermoGIS potentiekaarten bevatten de klasse 'onbekend'. Dit betekent niet dat te weinig informatie beschikbaar is om de potentie te kunnen berekenen, maar dat de kans op een 10 MW_{th} doublet kleiner dan 30% is. De oorzaak voor deze kleine kans is veelal het gebrek beschikbare informatie. In de praktijk betekent dit dat in deze gebieden geen exploratie plaats vindt omdat het risico te groot is (zie pagina 45: Ontwikkeling van geothermie in kansarme gebieden).

De permeabiliteit speelt een zeer belangrijke rol in de berekening van de potentiekaarten. Voor ieder punt op de kaart is een kansverdeling van de permeabiliteit berekend (met een pessimistische, realistische en optimistische waarde). Deze is gebruikt als invoer voor DoubletCalc (*min*, *median* en *max*). Meer details over de berekeningswijze worden besproken in publicaties over ThermoGIS (Pluymaekers et al., Kramers et al., Van Wees et al. 2012). De figuur laat duidelijk zien dat de grootste potentie voor geothermie in Nederland te vinden is in Groningen, Friesland en de

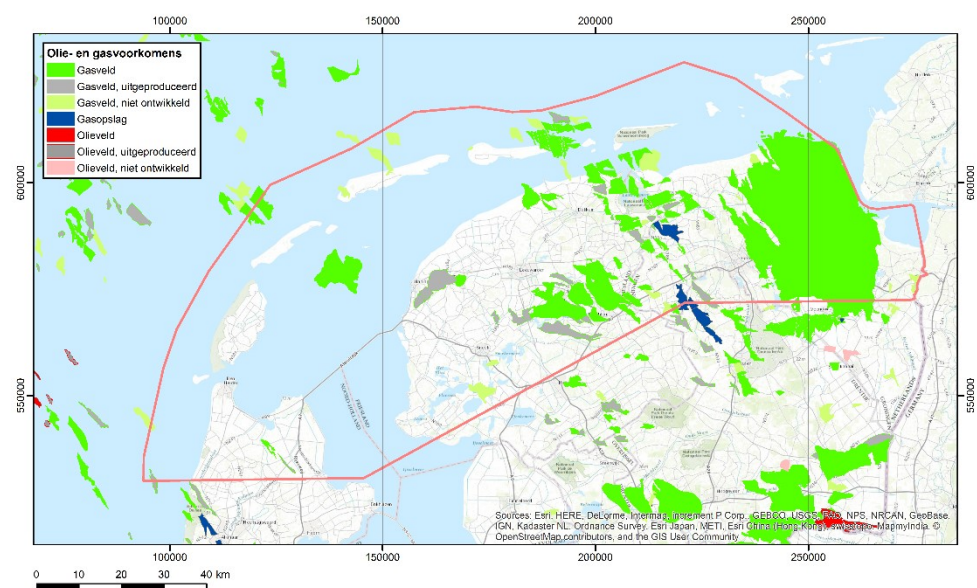
¹⁰ <http://thermogis.nl/basic.html#Potentiekaarten>

¹¹ Het verschil tussen de potentiekaarten voor huizen en kassen wordt veroorzaakt door de benodigde minimum-temperatuur (productie en injectie), en de toepassingsschaal. Voor beide is een energiebehoefte aangenomen. De toepassingsschaal-kaarten laten zien hoeveel hectare kassen of hoeveel duizend huizen verwarmd zouden kunnen worden met 1 doublet.

kop van Noord-Holland. Het is daarom opmerkelijk dat in dit gebied, met uitzondering van Middenmeer, nog geen doubletten zijn gerealiseerd. Dit heeft onder meer te maken met de aanwezigheid van het Groningen gasveld en andere gasvelden in het gebied, hetgeen belemmerend werkt. Er moet echter ook geconcludeerd worden dat er aanzienlijke potentie bestaat die nog niet wordt benut.



Figuur 5.4 ThermoGIS Basis potentiekaart (kassen).



Figuur 5.5 Gasvelden in Noord-Nederland

5.6 Relatie met olie- en gaswinning

In Noord-Nederland bevinden zich veel gasvelden, sommige nog in productie zoals het Groningen gasveld, sommige uitgeproduceerd en in gebruik als aardgasbuffer, zoals Grijpskerk en Norg, en sommige helemaal uitgeproduceerd zoals Harlingen (UC) en Roden (Figuur 5.5). In Noord-Holland, Friesland en Groningen bevinden zich geen (ontwikkelde) olievelden. De relatie met gaswinning is voor geothermie belangrijk, omdat beide activiteiten voor een deel aan dezelfde eis moeten voldoen, namelijk de aanwezigheid van permeabele gesteenten. Ook de optimale diepte voor (diepe) geothermie en gaswinning is vergelijkbaar. Dat betekent in principe dat waar gasvelden voorkomen, er mogelijkheden voor geothermie zijn. Een positief neveneffect voor Nederland is, dat de gunstige reservoirs de afgelopen decennia uitgebreid zijn bestudeerd door de Olie- en Gasindustrie, waardoor zeer veel informatie beschikbaar is. Er zijn uiteraard ook grote verschillen. Zo is het bij geothermie bijvoorbeeld niet nodig dat er boven het reservoir een afsluitende laag aanwezig is, of onder het reservoir een gasmoedergesteente. Dit betekent dat geothermie op veel meer plaatsen mogelijk is dan gaswinning.

De aanwezigheid van een uitgeproduceerd gasveld is echter niet altijd gunstig voor geothermie. Wanneer gas uit een reservoir wordt geproduceerd, zal slechts een klein deel van de vrijgekomen ruimte ingenomen worden door water (dat immers overal in poreus gesteente aanwezig is bij afwezigheid van olie of gas). De vrijgekomen ruimte zal vooral ingenomen worden door expansie (en dus drukdaling) van het overblijvende gas. Na afloop van de gaswinning zal de druk zich weliswaar herstellen tot natuurlijk niveau door instromend water, maar dit is op geologische tijdschaal, met andere woorden, dit duurt zeer lang. Omdat de druk in de poriën van het gesteente van het gasveld na de gaswinning laag is, kost het veel energie om water uit het reservoir te pompen. Dit brengt ook risico's met zich mee (zie bijvoorbeeld het voorbeeld van het project Warmtestad Groningen in relatie tot gaswinning uit het Groningen gasveld in Daniilidis et al. 2016). Injectie is wel makkelijker wanneer de reservoirdruk laag is, maar het risico bestaat dat het water zo snel het reservoir in stroomt, dat de put vacuüm wordt getrokken.

De aanwezigheid van gas in de ondergrond, zoals het geval is in Noord-Holland, Friesland en Groningen, betekent ook dat tijdens het boren veiligheidsmaatregelen moeten worden genomen, zoals het gebruik van een blowout-preventer (BOP). In Nederland is het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) verantwoordelijk voor veilige winning van delfstoffen. SodM heeft in 2017 een kritisch rapport geschreven over de staat van de geothermie-sector (zie hoofdstuk 8).

Gas kan in de ondergrond voorkomen als 'vrij gas' (zoals het geval is in alle Nederlandse gasvelden), of opgelost in water (onder het gas-water-contact in gasvelden; in alle doubletten in West- en Noord-Nederland komt opgelost gas voor). Wanneer de kans groot is dat kleinere of grotere hoeveelheden gas samen met het water voorkomen, verbetert dat de financiële randvoorwaarden van het doublet ('double play', zie Van Wees et al. 2013). Wanneer er veel (vrij) gas voorkomt, dan kan dat apart gewonnen worden (dit valt dan overigens toe aan de houder van de gas-productievergunning wanneer het in economisch winbare hoeveelheden wordt aangetroffen). Wanneer er weinig (opgelost) gas voorkomt, kan het samen met het water worden gewonnen, en aan de oppervlakte gescheiden. Het ontgaste water wordt afgekoeld weer geïnjecteerd, en het gas gebruikt. De Rotliegend-doubletten in Heemskerk, Middenmeer en Koekoekspolder produceren ongeveer 0.3 m³ opgelost

gas per 1 m³ water. Voor een gemiddeld debiet van 200 m³/uur en 8000 draaiuren per jaar is dat 480,000 m³ gas (!).

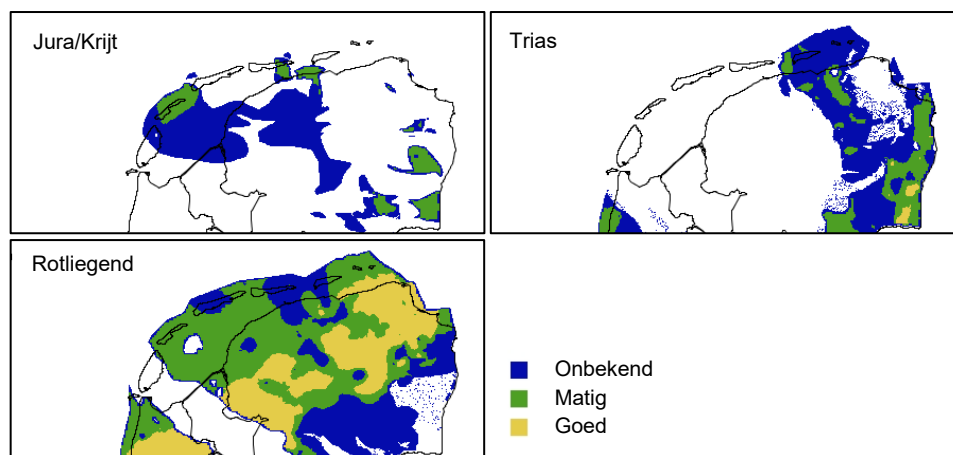
Ameland, dat heeft aangegeven zelfstandig te worden op energiegebied, werkt samen met onder meer de NAM, om te onderzoeken of oude gasputten hergebruikt kunnen worden als geothermieput, waarbij de warmte in een warmtenet gebruikt kan worden. Ook in de aardwarmtevergunning Middenmeer is sprake van mogelijk hergebruik van een oude gasput.

5.7 Kansen in de ondergrond van Noord-Nederland

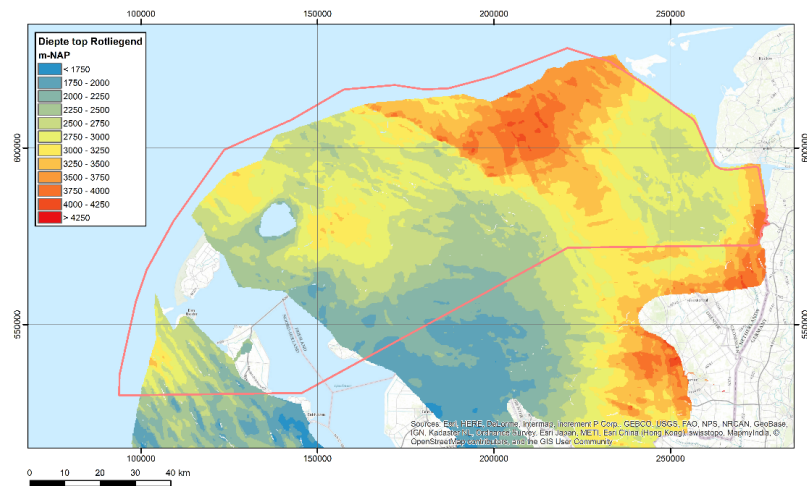
Beste kansen op groot vermogen in het Rotliegend

Groningen, de zuidelijke helft van Friesland en een deel van de kop van Noord-Holland zijn de beste gebieden voor geothermie uit het Rotliegend vanuit het perspectief van de ondergrond (Figuur 5.6, Figuur 1.7, Tabel 1.3). In vrijwel het hele studiegebied is de potentie gematigd tot goed. Het SER Noord Nederland rapport 'Ondergrond – kansen voor Noord-Nederland' (2016) concludeert wel dat Groningen minder geschikt is vanwege de gaswinning, maar stelt dat Friesland zeer geschikt is voor het winnen van aardwarmte. De oostelijke helft van het gebied dat goede potentie biedt in Groningen wordt inderdaad gedomineerd door het Groningen gasveld, waardoor de grote warmtevragers rond Delfzijl moeilijk bediend kunnen worden. Ten westen van de stad Groningen is de potentie echter ook goed en zijn veel minder gasvelden.

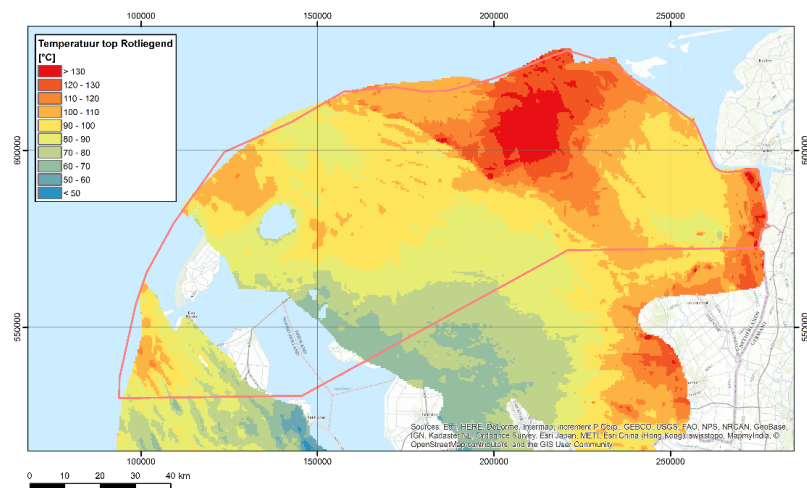
De potentie wordt voor een groot deel bepaald door diepte en temperatuur (Figuur 5.7, Figuur 5.8). De overeenkomsten tussen deze figuren en Figuur 5.9 zijn duidelijk, maar er zijn ook belangrijke verschillen die met name te wijten zijn de permeabiliteit.



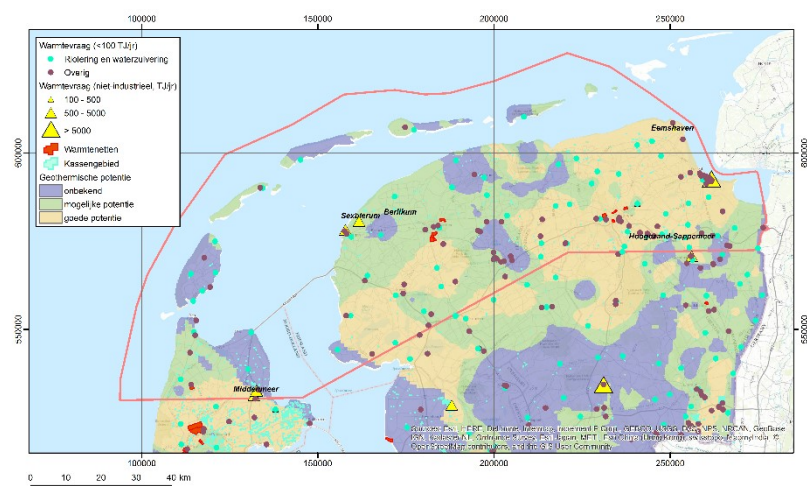
Figuur 5.6 Potentieel voor diepe geothermie voor Jura / Krijt, Trias en Rotliegend. Het Rotliegend is verreweg het belangrijkste reservoir voor de Waddenprovincies, maar de beide andere reservoirs zijn in delen van het gebied ook interessant. Wel is hier de kans op een groot vermogen kleiner dan in het Rotliegend. Matig: 30-50% kans op realisatie van een doublet van 10 MW_{th}. Goed: >50%. Onbekend: <30%.



Figuur 5.7 Diepte van de bovenzijde van het Rotliegend reservoir. Dieper dan ongeveer 3 km (oranje en rode kleuren) is de permeabiliteit laag.



Figuur 5.8 Temperatuur van de bovenzijde van het Rotliegend reservoir.



Figuur 5.9 Potentiekaart voor diepe geothermie gecombineerd met relevante gegevens van de Warmte-atlas en de (gelabelde) kassengebieden. Bron: ThermoGIS, Warmte-atlas, Top10Vector.

Kleinere kansen / vermogens in Jura/Krijt en Trias

In het Oosten van het gebied (Oost- en West-Groningen, Schiermonnikoog) is ook de Trias lokaal mogelijk prospectief voor geothermie (Figuur 5.6). Ook gesteenten van Jura- en Krijt-ouderdom komen voor (vooral in Friesland, mogelijke potentie met name onder Vlieland en Ameland). De gebieden waarin de prospectiviteit voor geothermie goed is (groene en gele kleur), zijn voor deze reservoirs echter klein in vergelijking met het Rotliegend. Gesteenten van de Tertiaire Noordzeegroep liggen te ondiep (<1 km) om een goede kans te bieden voor een doublet met een aanzienlijk vermogen (Figuur 4.6 geeft een overzicht van de meeste geschikte ondiepe reservoirs).

Warmtevragers – groot vermogen

De huidige generatie doubletten in Nederland heeft een gemiddeld vermogen van ongeveer 10 MW_{th}, wat zeer geschikt is voor gebruik in kassen of voor warmtenetten. Grote warmtevragers met relatief lage temperatuur (<100 °C) zijn met name het kassengebied bij Sexbierum (en mogelijk het geplande kassengebied bij de Eemshaven), en de regio Delfzijl (van de laatste zijn echter de gevraagde temperaturen niet bekend). De overige grote niet-industriële warmtevragers zijn Royal Pride Holland, Kesgro, Kwekerij de Wieringermeer (afnemers van de geothermiedoubletten ECW Middenmeer), de Reststoffen Energie Centrale (Harlingen), en Nedmag Industries Mining & Manufacturing (Veendam) en E.ON Energy from Waste (Delfzijl).

Het Rotliegend biedt ook kansen voor stadsverwarming zoals in het project Warmtestad Groningen. Ook de stadsverwarming in Leeuwarden is een mogelijkheid, hoewel die zich bevindt in een gebied van 'mogelijke potentie', maar wel net ten noorden van het gebied met 'goede potentie'. Hoewel het aantal warmtenetten in het gebied (nog) beperkt is, voorziet het Nationaal Warmtenet Trendrapport van Eneco et al. (2017) een grote groei van het aantal warmtenetten, en ook van het aandeel van geothermie daarin. Hiermee komen in principe alle gemeenten van enige grootte in aanmerking (van zeer kleine warmtenetten is de totale vraag te klein om de investeringskosten van een doublet terug te verdienen).

Warmtevragers – klein vermogen

Figuur 5.9 laat zien dat er in het gebied veel warmtevragers zijn met een vraag van minder dan 100 TJ / jaar. Deze groep is zeer heterogeen en omvat onder meer veel rioolwaterzuiveringen en diverse maakindustrieën (aluminium, consumentenelektronica, papier en karton, keramische producten, kunststoffen, zuivel, basischemicaliën, veevoeders etc.). 100 TJ / jaar is een vermogen dat, op jaarbasis, ongeveer geleverd kan worden door een klein doublet van 3 MW_{th}. Uiteraard is de hoogte van de gevraagde temperatuur hier mede belangrijk om te kunnen bepalen of diepe geothermie interessant is, maar deze informatie is niet beschikbaar in de Warmte-atlas.

Doubletten met een laag thermisch vermogen (relatief ondiep en dus koel, of relatief diep maar met matige reservoirkwaliteit en dus een beperkt debiet) kunnen mogelijk deze kleinere warmtevragers bedienen. Een ondiep doublet is goedkoop en daarmee aantrekkelijk. Een diep doublet is in principe duur, en heeft in principe een relatief groot vermogen. Het is daarmee alleen rendabel wanneer het complete vermogen optimaal gebruikt kan worden. De investeringen voor een doublet op 2 of 3 km diepte van 3 MW_{th} (slechte reservoirkwaliteit) zijn ongeveer even groot als die

voor een doublet op gelijke diepte van 10 MW_{th} (goede reservoirkwaliteit), maar met een groter vermogen is de terugverdiëntijd veel kleiner. Eventueel kan wel bespaard kan worden op de kosten van een laag vermogen diep doublet wanneer de diameter van het te boren gat beperkt kan blijven voor een gering debiet. Wanneer de vraag van verschillende nabijgelegen kleine vragers gecombineerd kan worden, is het mogelijk meerdere ervan te bedienen met een enkel groter doublet. Ook speelt het warmteprofiel een belangrijke rol (zie hoofdstuk 4) – kan er door het hele jaar heen efficiënt gebruik gemaakt worden van de geproduceerde warmte, en / of is het noodzakelijk dat in periodes van beperkte vraag (zomermaanden) warmte opgeslagen wordt, of zijn er mogelijke alternatieve afnemers zoals warmtenetten, zwembaden, kassen, etc., die alleen of samen de restwarmte kunnen afnemen.

Het regionale kaartbeeld van ThermoGIS is overigens onvoldoende om een business case uit te rekenen. De reden is dat ThermoGIS is gebaseerd op globale aannames voor wat betreft vereist vermogen, doublet-architectuur en in- en uitvoertemperatuur. Om nauwkeuriger uitspraken te kunnen doen is het bijvoorbeeld nodig te weten wat precies de in- en uitvoertemperatuur zijn, wat het warmteprofiel door het jaar heen is, en of er mogelijkheden zijn voor cascadering en/of HTO.

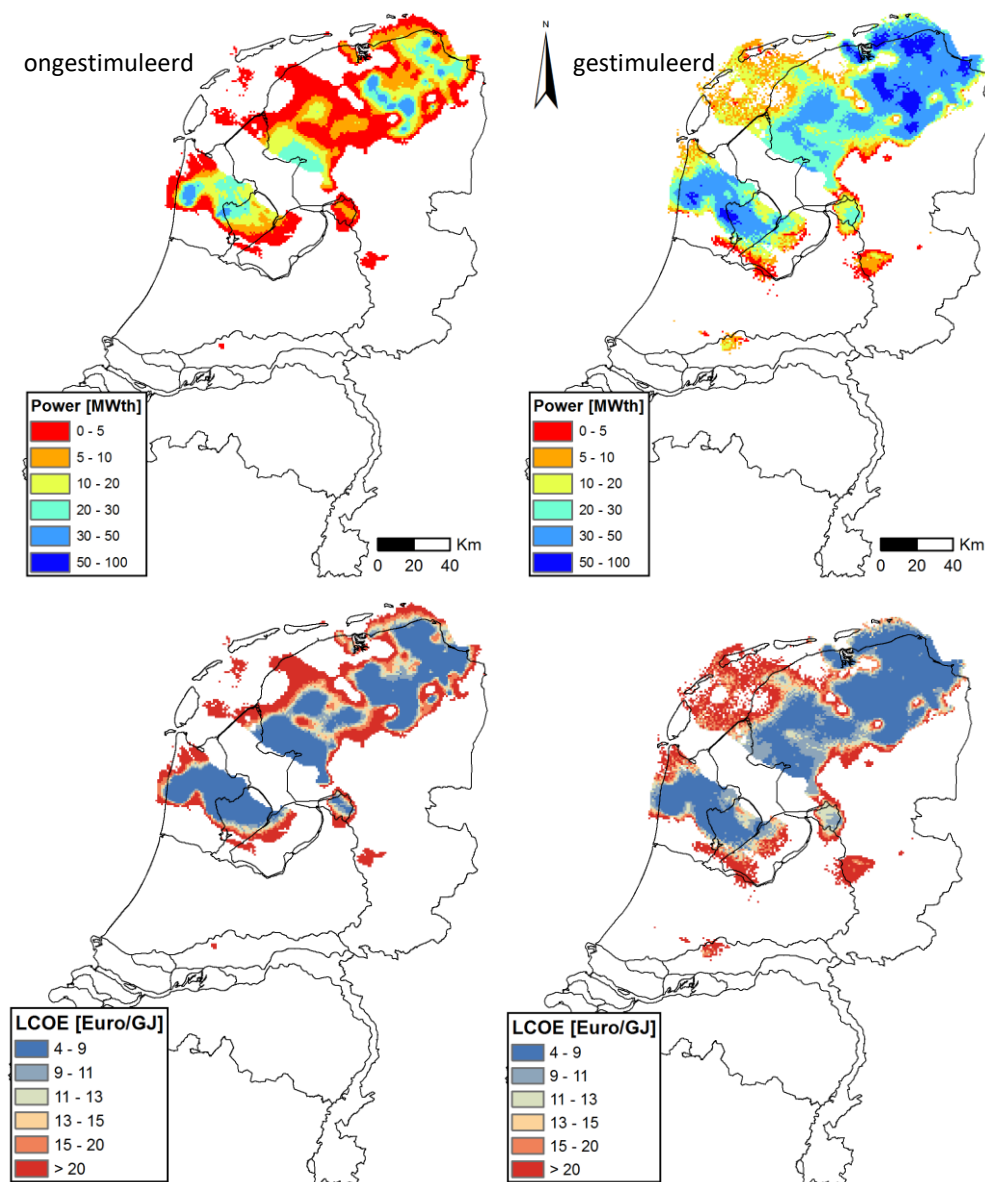
De aanwezigheid van grote hoeveelheden oude gasputten in het gebied biedt mogelijk kansen voor hergebruik als geothermieput.

Effect van stimulering op vermogen en kosten

De potentiekaarten van Figuur 5.6 laten de gebieden zien waar de kans dat een doublet 10 MW_{th} zal produceren <30 (blauw), 30-50 (groen) of >50% (geel) is. Gebieden met een kans van minder dan 30% worden momenteel in de praktijk niet of nauwelijks geëxploreerd. De reden is dat het risico op mislukking (een (te) klein vermogen) en mogelijk faillissement te groot is. Een klein initieel vermogen hoeft echter niet fataal te zijn. Het reservoir kan mogelijk gestimuleerd worden (zie ook paragraaf 1.4). In Veldkamp et al. (2014) is op generieke wijze berekend wat de toegenomen potentie van het Rotliegend zou zijn wanneer het reservoir hydraulisch gestimuleerd wordt. De conclusie is dat de potentie significant kan toenemen, bij vergelijkbare kosten per geproduceerde hoeveelheid energie (Figuur 5.10).

Ontwikkeling van geothermie in kansarme gebieden

In geothermisch relatief kansarme gebieden (de twee ongunstigste klassen van Figuur 5.6) is de kans op het realiseren van een doublet met een voldoende groot vermogen te klein om een business case rond te krijgen. Exploratie vindt vooral 'one-off' plaats. Dit betekent dat de projecten hoofdzakelijk wordt uitgevoerd door organisaties voor wie geothermische exploratie niet de hoofdwerkzaamheid is, en die meestal maar een enkel doublet willen ontwikkelen. Dergelijke organisaties missen veelal voldoende expertise, en bouwen deze ook niet op. Als een doublet wordt geboord en dit mislukt, stopt verdere exploratie. Als het wel lukt, is de missie van de organisatie voltooid en stopt de exploratie door deze organisatie ook. Ervaringen worden hierdoor minder goed dan mogelijk gedeeld met andere partijen. Voor deze organisaties is het financiële risico op misboring in een gebied met lage potentie te groot. Het gevolg is dat deze gebieden niet of langzaam worden geëxploreerd, en er kansen blijven liggen. Gezamenlijke exploratie ('portfolio aanpak') kan hiervoor een oplossing zijn. Rekenmodellen tonen aan dat het ontwikkeld vermogen op termijn groter wordt, tegen lagere kosten (zie bijvoorbeeld TNO 2016, 2017).



Figuur 5.10 Vermogen (boven) en LCOE (onder) van een doublet in het Rotliegend, ongestimuleerd (links) en gestimuleerd (rechts). Het vermogen kan door stimulering significant toenemen, bij ongeveer gelijkblijvende en concurrerende kosten. Bron: Veldkamp et al. 2014.

6 Ultradiepe geothermie

6.1 Wat is ultradiepe geothermie

Ultradiepe geothermie onderscheidt zich van diepe geothermie op het gebied van diepte, temperatuur en permeabiliteit. Diepe geothermie gaat uit van een reservoir dat voldoende natuurlijke permeabiliteit heeft om uit te kunnen produceren en injecteren. Bij ultradiepe geothermie is dit niet het geval. Met name de (primaire) permeabiliteit is zeer waarschijnlijk te laag. Mogelijk kan het reservoir secundaire (breuk-)permeabiliteit hebben. Vanwege de relatie tussen (primaire) permeabiliteit, diepte en temperatuur (Figuur 1.4, Figuur 1.8) wordt onder ultradiepe geothermie meestal geothermie op grote diepte / hoge temperatuur uit slecht permeabel gesteente verstaan.

Het gebrek aan gegevens en kennis van de ondergrond dieper dan ongeveer vier kilometer (paragraaf 1.3.2) brengt extra uitdagingen met zich mee. De onzekerheden die gepaard gaan met de schaarste van data vertalen zich direct in extra risico bij de start van een ultradiepe geothermie project. De hoge temperatuur vereist bovendien het gebruik van speciale boor- en meetapparatuur die deze temperatuur (en druk) kan weerstaan. De bij UDG behorende warmtevraag (hoofdstuk 2) is ook anders dan die bij diepe geothermie. Ultradiepe geothermie is vooral interessant voor bedrijven met een stoomvraag, zoals bijvoorbeeld de zuivel-, chemische en papierindustrie. Omdat de uitgangstemperatuur van dit soort industrie hoog is, is er veel restwarmte van nog steeds relatief hoge temperatuur. Om een dergelijk geothermiesysteem economisch rendabel te maken, is het belangrijk dat de restwarmte ook gebruikt kan worden, bijvoorbeeld in kassen of in stadsverwarming (cascadering), mogelijk met gebruik van HTO. Dat vereist dat niet alleen de bron en de primaire gebruiker, maar ook de eventuele secundaire gebruiker dicht bij elkaar gevonden worden.

Ultradiepe geothermie is een nieuw concept in Nederland. De warmtewinning vindt in principe op dezelfde wijze plaats als bij diepe geothermie, door middel van een productie- en een injectieput (doublet). Er zijn in Nederland nog geen systemen gerealiseerd. Er is de laatste jaren wel serieuze interesse van een aantal potentiële warmteafnemers. Een visie op ultradiepe geothermie is beschreven door IF, Ecofys en TNO (2011). De benodigde stappen die gezet moeten worden voor de ontwikkeling van ultradiepe geothermie zijn beschreven door TNO en EBN (2016).

Temperaturen van meer dan 100°C maken het in principe mogelijk elektriciteit te produceren. Het rendement is echter laag in het verwachte dieptebereik van ongeveer vijf tot zes kilometer (ongeveer 160 – 190°C, zie onder paragraaf 6.3). Gezien het succes van duurzame elektriciteit uit zon en wind, en het feit dat in Nederland een grote warmtevraag bestaat, roept dit de vraag op of het nodig of wenselijk is om stoom om te zetten in elektriciteit.

6.2 Hot Dry Rock en Enhanced Geothermal Systems

‘Hot Dry Rock’ (kort: HDR) en ‘Enhanced (of Engineered) Geothermal Systems’ (kort: EGS) zijn theoretisch speciale gevallen van UDG. UDG wordt gekenmerkt

door een combinatie van hoge temperatuur (~120 – 240°C) op grote diepte (ongeveer vier tot acht km), maar zegt niet zo veel over de eigenschappen van het gesteente waaruit warmte wordt geproduceerd.

HDR (heet, droog gesteente) heeft betrekking op ondoorlatend gesteente waarin zich geen water bevindt. Daarbij richt men zich op kristallijn gesteente dat van nature geen permeabiliteit heeft (bijvoorbeeld graniet of basalt). Als in het gesteente geen natuurlijke breuken voorkomen moet het gestimuleerd worden (gefrackt) alvorens het mogelijk is water te circuleren. Het gesteente fungeert hierbij als warmtewisselaar.

Bij een EGS geldt dat de natuurlijke eigenschappen van het gesteente te slecht zijn om voldoende debiet te halen, terwijl het gesteente wel water bevat. In dit geval worden de eigenschappen van de ondergrond verbeterd ('enhanced') door middel van stimulatietechnieken, zoals bijvoorbeeld hydraulische stimulatie ('fracken') of zuren. In de praktijk is gebleken dat bij hot dry rock projecten ook vaak op grote diepte (bijvoorbeeld in basement gesteentes) vloeistoffen voorkomen. Daarom wordt de term HDR niet meer gebruikt (zie bijvoorbeeld de IEA geothermal energy roadmap: (IEA, 2011)).

6.3 Ultradiep reservoir

6.3.1 Zeeland Formatie

Het voor ultradiepe geothermie meest aantrekkelijke reservoir in de Waddenprovincies wordt gevormd door gesteenten van de Zeeland Formatie. De prospectiviteit in Noord-Nederland is beschreven in Hoornveld (2013).

De twee diepste lagen die in het DGMDiep-model aanwezig zijn, dieper dan de basis van het Rotliegend, vormen het jongste deel van het Carboon ('laat' of 'boven' Carboon). De twee lagen zijn a) de gezamenlijke basis van de Caumer-, Dinkel- en Hunze-Subgroepen (DCC/DCD/DCH), en b) de basis van de Geul Subgroep (DCG). De laatste is tevens de top van de 'Carboniferous Limestone Group'. Deze is ook bekend als Zeeland Formatie (stratigrafisch - laagbeschrijving), Kolenkalk (lithologisch – het soort gesteente) of Dinantien (ouderdom) ('vroeg' of 'onder' Carboon). Omdat de basis van de Zeeland Formatie formeel niet gekarteerd is, staat deze ook niet apart vermeld in de profielen van Figuur 1.6 en Figuur 1.7.

Gesteenten uit het laat Carboon in het gebied zijn vooral schalie en steenkool (uit de laatste is het gas gegenereerd dat op veel plaatsen in Noord-Nederland wordt gewonnen). Deze gesteenten zijn in principe ongeschikt voor geothermie vanwege de zeer geringe permeabiliteit. Schaliegas wordt weliswaar ook uit schalie gewonnen, maar het is hierbij nodig het gesteente intensief te 'fracken'. Met name in het bovenste gedeelte van het Carboon komt ook her en der zandsteen voor, wat in principe gunstiger is, maar in tegenstelling tot de zandsteen uit het Rotliegend gaat het hierbij niet om een reservoir met een grote verticale of laterale continuïteit. Dit maakt het onaantrekkelijk voor geothermische toepassingen. Dit betekent dat het eerstvolgende diepere reservoir met geothermische potentie onder het Rotliegend de Zeeland Formatie is. Waar het Rotliegend in Noord-Nederland op een diepte van rond de drie kilometer ligt, is dit voor de Zeeland Formatie veel dieper, tussen vijf en zes kilometer. Dit betekent dat de temperatuur van het gesteente ook veel hoger is,

meer dan 160°C. Dit betekent dat er mogelijkheden zijn voor warmtevragers uit de zuivel-, chemische en papierindustrie.

6.3.2 Boringen

Het feit dat de gesteenten zich op grote diepte bevinden betekent ook dat er relatief weinig informatie van bekend is. In Noord-Nederland is het reservoir aangetroffen in de boringen Uithuizermeeden-2 (UHM-02) in Oost-Groningen en Luttelgeest-1 (LTG-01) in de Noordoostpolder. Dit waren beide onderzoeksboringen voor olie- en gaswinning. In Zuid-Nederland komen vergelijkbare gesteenten ondieper voor. Ze zijn daar ook vaker aangeboord, onder meer in de beide doubletten in Grubben-vorst in Limburg (Californië), en in die van Mol (België), en de gasopslag in Loenhout (België). Onder meer ten zuiden van Maastricht bij Visé, en langs de Maas bij Dinant zijn deze gesteenten goed zichtbaar aan het oppervlak. De gesteenten zijn gevormd als platformcarbonaten, vergelijkbaar met de huidige Bahama's of het Great Barrier Reef. Ze bevatten meestal grote hoeveelheden koraal- en schelpfragmenten (Figuur 6.1).



Figuur 6.1 Gesteente van Dinantien-ouderdom in de vloer van het TNO-gebouw in Utrecht, met veel schelpfragmenten. De permeabiliteit is zeer laag.

6.3.3 Seismiek

In Noord-Nederland zijn de gesteenten zichtbaar op 3D seismiek. Hierdoor is het bekend dat zowel onder Groningen als Friesland grote platformen bevinden (onder meer Van Hulten et al., 2012, Kombrink, 2008). Figuur 6.2 en Figuur 6.3 suggereren een platformstructuur, met grote breuken langs de rand van het platform ('Visean'). Ook de onderkant van het platform lijkt zichtbaar. In de diepere gedeeltes ('trough / basin' in Figuur 6.4) is dit veel minder eenduidig vast te stellen. Kombrink (2008) stelt dat ook hier carbonaten zijn gevormd ('Tournaisien'), maar deze zijn zeker anders van samenstelling en dikte dan de platformcarbonaten (zie bijvoorbeeld ook Boots 2014).

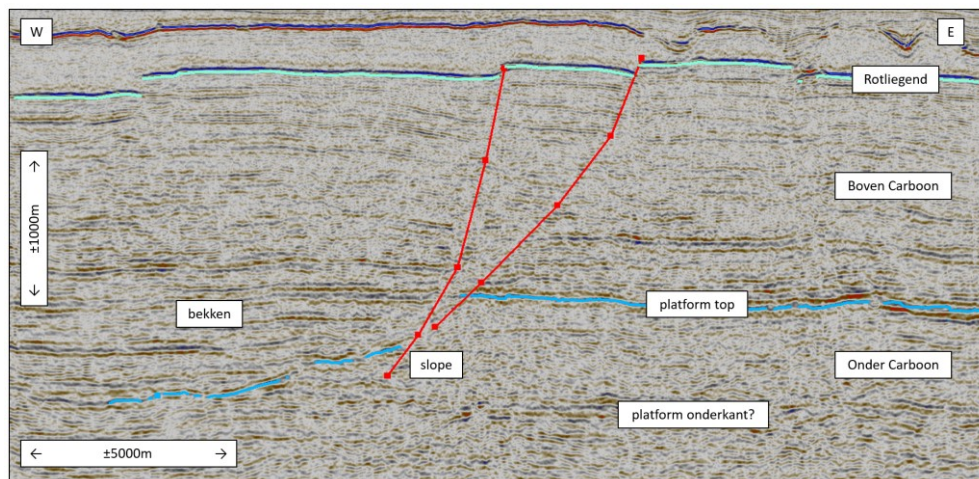
De interne structuur van de platformen, die belangrijk zou kunnen zijn voor de prospectiviteit, is op seismiek moeilijk of zelfs helemaal niet te zien. Op verschillende plaatsen, binnen en rondom het platform, kunnen door de geologische geschiedenis heen verschillende processen zijn opgetreden (lithologie, karst, diagenese, breukvorming). Dit kan hebben geleid tot permeabiliteit die van plaats tot plaats verschilt. Het is dus belangrijk de geschiedenis en architectuur van het platform te doorgronden. Wat de beste plaatsen binnen en rond het platform zijn, vanuit het

oogpunt van geothermie, is vooralsnog speculatief. Breuken lijken theoretisch het gunstigst te zijn.

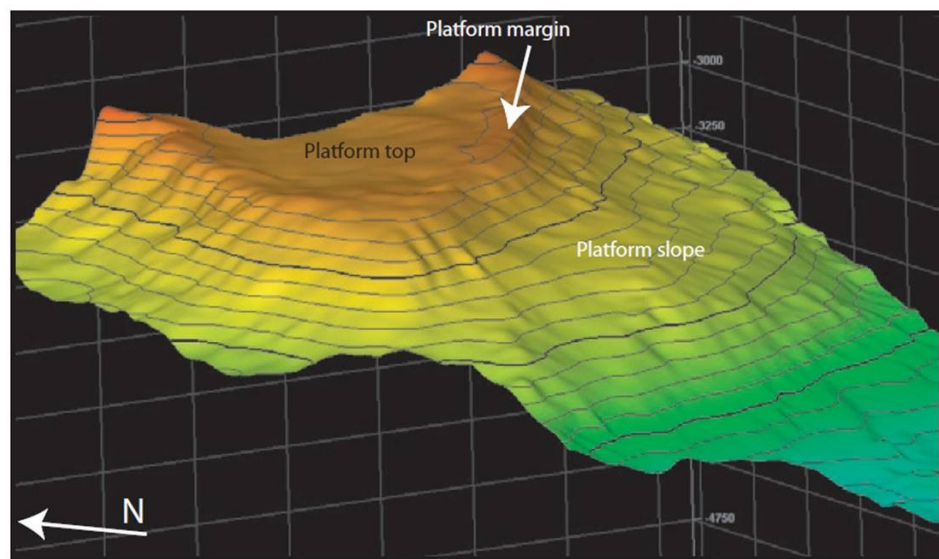
6.3.4 Permeabiliteit

Het gesteente in de boringen LTG-01 en UHM-02 was zeer slecht permeabel, in tegenstelling tot wat het geval lijkt te zijn in Zuid-Nederland en België. Toch is dit geen reden om het Dinantien als potentieel geothermie-reservoir in Noord-Nederland af te schrijven. De gesteenten, zoals beschreven in Zuid-Nederland, zijn verkast. De doubletten, voor zover bekend, produceren daar uit grote natuurlijke breukzones en netwerken van kleine natuurlijke barsten. Beide genoemde boringen in Noord-Nederland zijn niet in een breuk geplaatst. Kombrink (2008) en anderen stellen dat de grote platformen in het Noorden breukbegrensd zijn (Figuur 6.4). Dat zou betekenen dat een boring in de rand van een platform misschien betere permeabiliteit aantreft. Voor het bestaan van breuken langs de randen van de platformen zijn in de seismische data duidelijke aanwijzingen te vinden, maar de tectonische en diagenetische geschiedenis van de platformen is nog onvolledig uitgezocht. Wel is het zo dat in de boring LTG-01 aanwijzingen zijn voor een permeabiliteit van enkele tientallen milli-darcies (Van Oversteeg 2013, Lipsey et al. 2016).

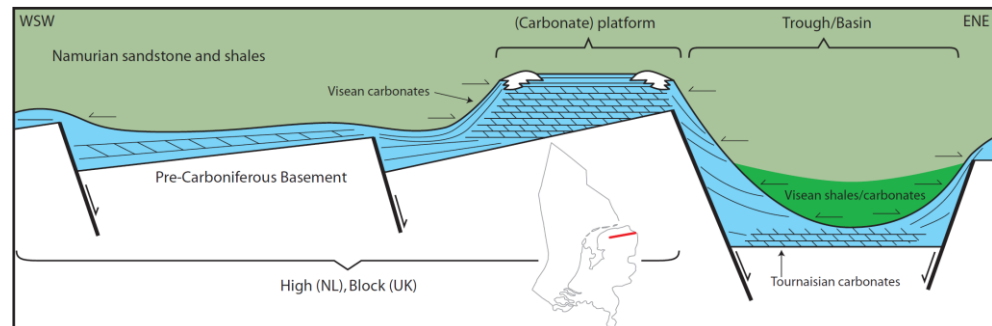
Concluderend lijken er voldoende aanwijzingen te zijn dat gesteenten van de Zeeland Formatie op plaatsen tenminste enige permeabiliteit hebben. Of dit voldoende is om een doublet te kunnen realiseren is op dit moment nog niet te zeggen. Waarschijnlijk moet het reservoir gestimuleerd worden om een economisch debiet te verkrijgen. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden (zie bijvoorbeeld TNO 2015b). Sommige hiervan kunnen leiden tot seismiteit.



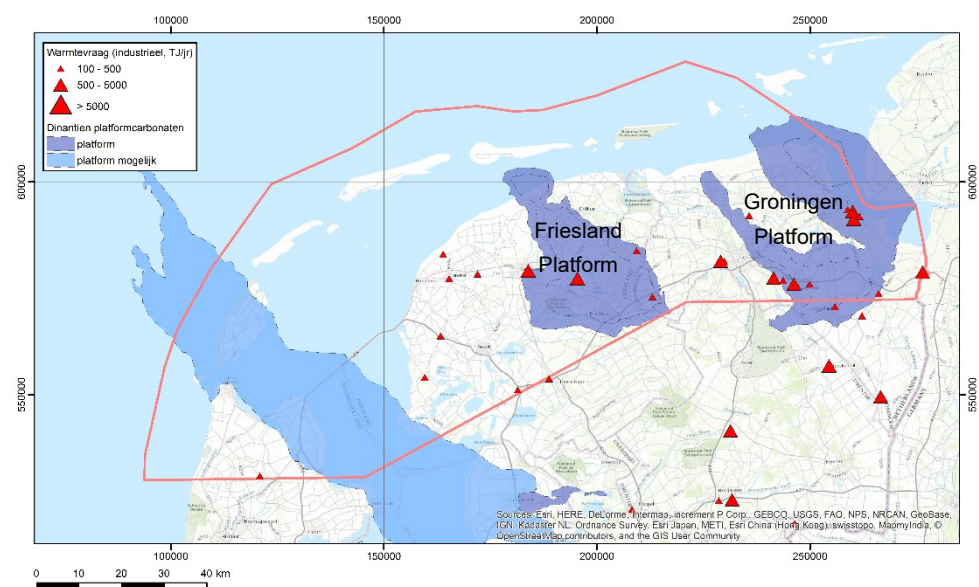
Figuur 6.2 Seismische sectie van het Friesland platform ten oosten van Leeuwarden. Op de plaats van de rand van het platform zijn ook breuken.



Figuur 6.3 Schuin aanzicht op de top van het Groningen platform waarop de structuur, met een duidelijke bovenkant ('top') en helling ('slope'). Bron: Kombrink (2008).



Figuur 6.4 Schematische dwarsdoorsnede over het Groningen-platform, die ook representatief kan zijn voor het Friesland Platform. De carbonaten uit het Tournaisien zijn 'ramps', die uit het Visean 'platforms'. Het is nog niet bekend of de Tournaisien-carbonaten prospectief zijn. Bron: Kombrink 2008.



Figuur 6.5 Locatie van bewezen en veronderstelde platformcarbonaten gecombineerd met gegevens van de Warmte-atlas (industriële warmtevrage - chemie / voeding / papier).

6.4 Kansen in de ondergrond van Noord-Nederland

De Zeeland Formatie is het meest veelbelovende reservoir

De potentie van de Zeeland Formatie als diep geothermie-reservoir is al lang onderkend (RGD 1984). Mede door de recent toegenomen interesse in (ultra-diepe) geothermie is de kennis van het ervan toegenomen (TNO 2015a, 2016).

Figuur 6.5 toont de Friesland en Groningen platformen, ruwweg tussen Leeuwarden, Drachten en Dokkum in Friesland, en in een groot deel van Groningen. Van de structuur die door Texel en het IJsselmeer loopt (het 'Texel-IJsselmeer Hoog') wordt gesuggereerd dat daar ook platformcarbonaten kunnen zijn gevormd. Deze zijn echter niet aangeboord, en ook niet afdoende zichtbaar op seismiek. Een haalbaarheidsstudie van Ecofys en IF Technology (2009) gaat in op de mogelijkheid op Texel de Zeeland Formatie te gebruiken voor de opwekking van elektriciteit.

Figuur 6.2 en Figuur 6.4 laten zien dat de overgang van de platformcarbonaten ('Visean') naar carbonaat-'ramps' (Tournaisien) niet zeer duidelijk is. Ook is het niet goed bekend of de Tournaisien-gesteenten mogelijkheden bieden voor geothermie, met betrekking tot permeabiliteit en dikte. Dat betekent dat het voor de potentiële warmte-afnemers (Figuur 6.5) nog onduidelijk is waar ze precies naar toe zouden moeten boren om gunstig gesteente aan te treffen. Als het Tournaisien, met een grote laterale verbreiding gunstig is, kan waarschijnlijk verticaal worden geboord. Voor het Visean is het waarschijnlijker dat gedeveerd moet worden geboord.

In het ongunstigste (maar waarschijnlijke) geval is het nodig dat het reservoir gestimuleerd wordt. Meer onderzoek is nodig om de onzekerheden te verkleinen. De onzekerheid kan verkleind worden door het verzamelen van meer informatie, bijvoorbeeld uit seismiek of door magneto-tellurische of gravimetrische metingen, of door het bestuderen van analogen waar de gesteenten beter bekend zijn zoals in België, Engeland, Ierland etc.. In 2017 is een programma 'Ultradiepe Geothermie' gestart, in een samenwerkingsverband ('green deal') tussen het Ministerie van Economische Zaken, EBN, TNO en een aantal warmtevragers. In dit programma zal sterke nadruk liggen op het verwerven van gegevens van de diepte ondergrond, met name de Zeeland Formatie, met het oog op het realiseren van een tot drie ultradiepe geothermieboringen binnen drie jaar na aanvang van het programma.

Warmtevragers

In Friesland hebben FrieslandCampina en Royal Aware interesse in ultradiepe geothermie (zie TNO 2015a). FrieslandCampina is onder meer gevestigd in Leeuwarden, precies op de westelijke begrenzing van het Friesland platform (Figuur 6.5). Royal Aware is gevestigd in Heerenveen, waar het Dinantien waarschijnlijk minder gunstig is. Figuur 6.5 suggereert dat er binnen bereik van de platformen een aantal industriële (hoge-temperatuur) warmtevragers zijn die mogelijk baat kunnen hebben bij ultradiepe geothermie. Dit zijn behalve FrieslandCampina (Leeuwarden), Sonac (Burgum), Suiker Unie (Vierverlaten), PPG Industries Fiber Glass (Westerbroek), ESKA Graphic Board (Hoogezand), Smurfit Kappa Solid Board (Nieuweschen), BioMethanol Chemie Nederland (Farmsum) en ESD-SIC (Farmsum).

Om met zekerheid te kunnen zeggen wat de mogelijkheden zijn, is het nodig dat de warmte- of stoomvraag precies bekend is (volume en temperatuur, door het jaar heen). Ook is het belangrijk dat er afnemers zijn van de restwarmte, zoals warmtenetten etc.

7 Subsidieregelingen

Geothermie is een van de goedkoopste vormen van energie (zie Figuur 1.1, Tabel 1.2). Toch blijkt de financiering in de praktijk de voornaamste oorzaak van de relatief langzame ontwikkeling van geothermie in Nederland. Dit heeft de aan de ondergrond gerelateerde onzekerheid als oorzaak. Deze onzekerheid komt tot uiting in het grote verschil tussen het vermogen dat in principe verwacht wordt (de P50), en het vermogen dat behaald wordt in een ongunstig geval (de P90, zie Figuur 5.3). Een ongunstig geval kan bijvoorbeeld realiteit worden als de permeabiliteit of temperatuur minder is dan verwacht, het reservoir minder dik, etc.. De overheid heeft daarom een aantal regelingen in het leven geroepen om de ontwikkeling van geothermie te versnellen. Deze worden uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). De belangrijkste worden hieronder kort toegelicht. Meer informatie kan gevonden worden op de website van RVO: www.rvo.nl

7.1 Risico's dekken voor Aardwarmte (RNES)

De Regeling nationale EZ-subsidies voor Aardwarmte staat ook bekend onder de naam 'Garantiefonds'. De regeling is een verzekering tegen de financiële risico's van misboring bij een aardwarmteproject. Voor de verzekering is een premie verschuldigd. De regeling keert uit als een boring een tegenvallend resultaat heeft.

Voor het uitvoeren van de boring wordt een inschatting gemaakt van het verwachte vermogen met behulp van de DoubletCalc software (Figuur 5.2). Modelleren van de ondergrond maakt hiervan een belangrijk deel uit. Hieruit volgt een vermogenverwachtingscurve (Figuur 5.3). Het resultaat van de boring wordt als tegenvallend beschouwd als het behaalde geothermisch vermogen minder is dan de P90. Het behaalde geothermisch vermogen moet vastgesteld worden met behulp van een puttest.

Website: <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/risicos-dekken-voor-aardwarmte-2017>

7.2 Stimulering Duurzame Energie (SDE+)

SDE+ is een subsidie die de productie van duurzame energie stimuleert. De kostprijs van duurzame ('groene') energie is (nog) hoger die van dan energie uit conventionele ('grijze') bronnen. De SDE+ compenseert het verschil tussen beide.

Het *basisbedrag*, de kostprijs, wordt door het Ministerie van Economische Zaken in samenwerking met ECN bepaald uit de investerings- en exploitatiekosten en een redelijke winstmarge, gedeeld door de hoeveelheid geproduceerde energie. Het *correctiebedrag* is de marktwaarde van de geleverde energie. Dit is de gemiddelde werkelijke energieprijis per kWh. De SDE+-bijdrage is het verschil tussen beide, uitgedrukt in euro's per geproduceerde hoeveelheid energie.

Analoog aan de RNES-regeling is het voor het verkrijgen van SDE+-subsidie nodig vooraf een inschatting van het geothermisch vermogen te maken met behulp van DoubletCalc. Het gaat hierbij echter om het verwachte vermogen (P50).

Voor verschillende vormen van geothermie bestaan binnen de SDE+ aparte regelingen. De hoeveelheid subsidie is gemaximeerd op 7000 vollasturen per jaar.

Website: <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/sde/geothermie>

7.3 Green deal UDG

De geologische en financiële onzekerheid voor ultradiepe geothermieprojecten is tot op heden zo groot gebleken dat er nog geen projecten zijn uitgevoerd. Daarom werkt het Ministerie van Economische Zaken, in samenwerking met Energiebeheer Nederland en TNO, aan een 'green deal' Ultradiepe Geothermie. De precieze inhoud van deze green deal is op het moment van publicatie van dit rapport nog niet bekend. Het is wel bekend dat de overheid 50% van de exploratiekosten voor zijn rekening zal nemen. Naar verwachting zal de Green Deal in Juni 2017 door de deelnemende partijen getekend worden. Hieronder zijn ook in de Waddenprovincies Friesland/Campina in Leeuwarden en Royal Aware in Heerenveen.

8 Risico's van aardwarmtewinning

8.1 Rapport 'De Staat van de Sector Geothermie'

In Juli 2017 publiceerde de toezichthouder Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) het rapport 'De Staat van de Sector Geothermie'. In dit rapport wordt kritiek op de geothermiesector geleverd. Zo zou er onvoldoende transparantie zijn, te weinig oog voor veiligheid, en zouden milieu- en veiligheidsrisico's onvoldoende herkend en beheerd worden, en wetten onvoldoende nageleefd. Er zou minder dan noodzakelijk kennisdeling plaats vinden, wat voor een nog jonge en onervaren Sector ongewenst is. Opschaling zou bij kunnen dragen aan betere kennisdeling. De Sector zou bovendien te weinig financieel draagkrachtig zijn, waardoor inferieure materialen worden gebruikt en/of ondeskundig personeel ingezet om tot kostenbesparing te komen. In geval van tegenvallers zou daarom onvoldoende gedaan kunnen worden. Ook wordt opgemerkt dat geothermie momenteel toegestaan wordt in aardbevingsgevoelige gebieden zoals Limburg (natuurlijke aardbevingsgevoeligheid) en Groningen (gaswinning). Het Staatstoezicht ziet als belangrijkste aandachtspunten:

- terughoudendheid in gebieden waar aardbevingen voorkomen
- onverwacht aanboren van olie of gas
- bodem- of drinkwaterverontreiniging
- bedrijfsongevallen.

De Sector heeft op het rapport van SodM gereageerd via de Dutch Association of Geothermal Operators (DAGO), en via het Platform Geothermie¹². De twee volgende paragrafen zijn een korte samenvatting van beider reacties. Uitgebreide reacties staan op de websites van beide organisaties.

8.2 Reactie van DAGO

DAGO erkent het belang van onafhankelijk toezicht door SodM, en de waarde van het op regelmatige basis evalueren van de staat van de sector, maar vindt een aantal van de beweringen van SodM te generaliserend. DAGO stelt dat veel aanbevelingen van SodM al worden opgepakt in de eigen agenda, en in de Kennisagenda Aardwarmte¹³. DAGO stelt ook dat er op het gebied van professionalisering, kennisdeling en standaardisering grote stappen zijn en worden gemaakt, onder meer door het sluiten van een aantal Green Deals (naast UDG) waarin ook kennis wordt ingebracht door vertegenwoordigers van de Olie- en Gassector. DAGO stelt nadrukkelijk zich niet te herkennen in de opmerkingen van het Staatstoezicht over de onvoldoende financiële draagkracht van de deelnemers.

¹² 'Het Platform Geothermie is 'een non-profit organisatie gericht op de bevordering van de verantwoorde toepassing van (diepe) geothermie of aardwarmte in Nederland'

¹³ De vraaggestuurde Kennisagenda Aardwarmte financiert onderzoek naar de ontwikkeling van aardwarmte. Zie [hier](#) voor informatie over de Kennisagenda Aardwarmte.

8.3 Reactie van Platform Geothermie

Ook het Platform Geothermie neemt in een reactie de aanbevelingen van SodM zeer serieus, en erkent dat verdere opschaling en professionalisering belangrijk is. Het Platform ziet, evenals DAGO, dat dit in de praktijk al plaats vindt, onder meer door het feit dat, in tegenstelling tot de eerste projecten, een aantal ondernemingen is opgestaan die meer dan één installatie beheren. Het onafhankelijke Platform Geothermie stelt zich blijvend te willen inzetten 'voor een constructieve dialoog om geothermie op een veilige en verantwoorde wijze in te zetten in de Nederlandse energietransitie'.

Daarnaast constateren Platform en DAGO dat 'toezicht, handhaving en beleid niet goed aansluiten op de geothermische praktijk, omdat de wetgeving ontworpen is voor olie en gas; een technologie met andere karakteristieken (andere energiedrager, hogere drukken en andere fysische eigenschappen en andere risico's)'.

Naar aanleiding van de publicatie van het SodM-rapport zijn Kamervragen gesteld (zie de referentie onder hoofdstuk 10 voor de vragen aan en de antwoorden van de Minister). De Minister antwoordt onder meer dat sinds de tweede helft 2016 wordt gewerkt aan het 'verbeterplan geothermie' [...] 'waarin bekeken wordt hoe geothermie kan uitgroeien tot een veilige en volwassen technologie die een belangrijke bijdrage kan leveren aan de energietransitie'.

8.4 Aardwarmtewinning in gebieden met seismisch risico

In Nederland bestaan verschillende soorten gebieden waar aardbevingen op kunnen treden. In het Zuiden van Nederland komen van nature aardbevingen voor. De bekendste in het recente verleden was die van Roermond in 1992. In Noord-Nederland komen aardbevingen voor als gevolg van aardgaswinning. Een aardwarmte-operator moet voorafgaand aan een project een seismische risicoanalyse indienen in bij het Staatstoezicht op de Mijnen waarin aangegeven wordt hoe het risico op aardbevingen is bepaald, hoe het ontwerp van het project de kans op optreden van aardbevingen minimaliseert, hoe de juiste uitvoering wordt gecontroleerd, en hoe eventuele effecten worden geminimaliseerd.

In Zuid-Nederland wordt door twee doubletten aardwarmte gewonnen, uit een breukzone bij Grubbenvorst. Water wordt *uit* de breukzone geproduceerd en *buiten* de breukzone geïnjecteerd. Hierdoor blijft de natuurlijke druk op de breuk gehandhaafd en is de kans op geïnduceerde seismiciteit zo laag dat het Staatstoezicht de winning momenteel veilig acht. Toch wordt deze winning op last van het Staatstoezicht 'real time' seismisch gemonitord zodat tijdig ingegrepen kan worden als de veiligheid eventueel in het geding zou komen.

De situatie in Noord-Nederland is anders. Behalve in Middenmeer zijn hier (nog) geen werkende doubletten. Wel is het Warmtestad Groningen-project van plan te gaan boren naar aardwarmte. Een logische vraag is, of aardwarmtewinning, net zoals aardgaswinning, tot aardbevingen kan leiden. In Basel is bij het aanboren van een geothermisch reservoir in 2009 een aardbeving opgetreden. De geologische situatie van Basel is echter onvergelykbaar met de Nederlandse. Er bestaat een belangrijk verschil tussen gaswinning en aardwarmtewinning in Nederland, namelijk dat bij gaswinning de druk in het reservoir daalt. Dit is (indirect) de oorzaak van het optreden van aardbevingen. Bij aardwarmtewinning wordt het gewonnen water

weer in de bodem geïnjecteerd. Ook is de hoeveelheid gewonnen delfstof erg verschillend. Een zeer klein gasveld in Nederland bevat ongeveer 1 *miljard* kubieke meter gas, terwijl een doublet op jaarbasis ongeveer (bij 200 m³/hr) op jaarbasis minder dan 2 *miljoen* kubieke meter warm water produceert en koud water injecteert. Hierdoor is de drukdaling onvergelijkbaar veel kleiner dan bij gaswinning¹⁴, en de kans op aardbevingen ook. Wel is het belangrijk dat tijdens het boren en de productiefase seismische monitoring plaats vindt in een gebied waar aardbevingen optreden ('traffic light system'). Hier ziet SodM op toe.

Op de website van het Platform Geothermie kan een factsheet worden gedownload over geothermie en aardbevingen.

¹⁴ Een bepaald gewicht warm water neemt iets meer volume in dan hetzelfde gewicht water in koude toestand.

9 Conclusies

9.1 WKO / Ondiepe geothermie

Warmte-koudeopslag is een bewezen en volledig marktrijpe techniek, die in de gehele Waddenprovincies, vooral als open systemen, al zeer veel is toegepast voor verwarming en koelen van voornamelijk kantoren en glastuinbouw, met relatief kleine vermogens.

9.2 HTO

Geschikte reservoirs voor ondiepe geothermie, en daarmee HTO, komen voor in grote delen van de Waddenprovincies. Twee operationele warmtenetten (Leeuwarden en Hoogezand-Sappemeer) en een (Groningen) in ontwikkeling zijn mogelijk interessant voor HTO, evenals de glastuinbouwgebieden in Sexbierum, Berlikum, Hoogezand-Sappemeer, Middenmeer en de (mogelijk aan te leggen kassen in de) Eemshaven. De verwachting is dat het aantal warmtenetten dat gevoed kan worden door aardwarmte dankzij de Energietransitie van fossiel naar duurzaam zal toenemen.

(ultra-)Diepe geothermie-systemen worden een deel van het jaar vaak niet of minder gebruikt omdat de warmtevraag beperkt is. HTO is een kansrijke mogelijkheid om de business case hiervan te vergroten, door het verhogen van het aantal vol-lasturen. Een eerste overzicht laat een aantal interessante clusters zien voor HTO in combinatie met industriële warmtevraag en aanbod van industriële restwarmte. Op dit moment mist er echter inzicht in de locatie-specifieke warmteprofielen van zowel vraag als aanbod.

9.3 Diepe geothermie

Diepe geothermie is interessant wanneer de benodigde temperatuur ongeveer tussen 60 en 100 °C ligt. Dit is in Nederland tussen ongeveer 2 en 3 km diepte. De warmte op deze diepte is bijvoorbeeld goed bruikbaar voor kassen (bijvoorbeeld rond Sexbierum en nabij de Eemshaven) en stadsverwarming (bijvoorbeeld Leeuwarden en Warmtestad Groningen ('Warmtenet Noordwest')). De Energietransitie voorziet een grote toename van het aantal warmtenetten, en het aandeel van geothermie hierin. Ook hiervoor biedt diepe geothermie in de Waddenprovincies goede mogelijkheden. Warmtenetten kunnen in principe overal aangelegd worden waar een reservoir met gunstige reservoir-eigenschappen en van de juiste temperatuur aanwezig is. Het is belangrijk een overzicht te hebben van plaatsen waar warmtenetten gepland zijn, wat de benodigde invoertemperatuur is, en wat de plaatselijke condities van de ondergrond zijn.

Het belangrijkste gesteentereservoir met gunstige condities in de Waddenprovincies is de Slochteren Formatie (ook bekend als 'Rotliegend'). In een zeer groot deel van de Waddenprovincies is deze Formatie zeer geschikt als geothermie-reservoir. Omdat veel gasvelden in de Waddenprovincies produceren uit ditzelfde reservoir, kan interferentie voorkomen en is voorzichtigheid dus geboden.

Jongere gesteenten van Trias-, Jura- of Krijt-ouderdom zijn lokaal ook mogelijk geschikt als geothermie-reservoir, onder meer onder Vlieland, Ameland en Schiermonnikoog, maar de potentie is veel minder dan die in het Rotliegend.

De business case van diepe geothermie kan op een aantal manieren verbeterd worden. Hergebruik van oude gasputten, waarvan er in Noord-Nederland zeer veel zijn, kan een belangrijke bijdrage leveren aan de ontwikkeling. Dit levert een grote besparing op in de boorkosten. Verder kan het Rotliegend reservoir gestimuleerd worden, zodat meer warmte geproduceerd kan worden tegen vergelijkbare kosten. Tot slot is de economie van een geothermisch doublet mogelijk te verbeteren door in de zomer, wanneer de warmtevraag laag is, geproduceerde warmte in ondiepe lagen op te slaan (HTO), en deze 's winters te gebruiken. Hierdoor neemt het aantal uren dat het geothermie-systeem nuttig gebruikt wordt (vollast-uren), toe.

Van een grote hoeveelheid kleine warmtevragers in de Waddenprovincies, zoals bijvoorbeeld waterzuiveringen, is de warmtevraag te klein om een doublet economisch te maken. Koppeling van verschillende warmtevragers aan een doublet kan interessant zijn. Om een goede koppeling te kunnen maken moet het warmteprofiel beter bekend worden.

9.4 Ultradiepe geothermie

Ultradiepe geothermie is interessant wanneer de benodigde temperatuur zeer hoog is. Dit is op grote diepte het geval ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, diepte $> 4\text{ km}$). Op deze diepte kan mogelijk stoom gewonnen worden, wat bijvoorbeeld interessant is voor de zuivel- en voedingsmiddelenindustrie (FrieslandCampina, Royal Aardvark, SuikerUnie), de papierindustrie (Smurfit Kappa, ESKA Graphic Board) en de chemische industrie (BioMethanol Chemie Nederland, ESD-SIC). Ook hier is het belangrijk dat de aard van de warmte- of stoomvraag bekend is (temperatuur, druk, jaarprofiel).

Het reservoir waar genoemde omstandigheden in de Waddenprovincies gelden is de Zeeland Formatie (ook bekend als 'Dinantien' en 'Kolenkalk'). Deze is mogelijk geschikt voor ultradiepe geothermie in twee gebieden, ten oosten van Leeuwarden en in een groot deel van Groningen. De geschiktheid van de overige gebieden is nog zeer onzeker. Mogelijk komt hetzelfde reservoir voor onder Texel. De diepte van het reservoir is ongeveer 5 km, en de temperatuur meer dan $160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vanwege de grote diepte is van het Dinantien-reservoir weinig informatie beschikbaar. Daarom is een schatting van het vermogen dat een doublet in dit reservoir kan halen zeer onzeker. De onzekerheid kan verkleind worden door het verzamelen van meer informatie, bijvoorbeeld uit seismiek of door magneto-tellurische metingen, door het bestuderen van analogen, en door modellering van de geologische geschiedenis. Dit gebeurt momenteel in de Green Deal UDG, waar FrieslandCampina en Royal Aardvark (samen met Vermilion) aan deelnemen. Waarschijnlijk is de doorlatendheid van het gesteente te laag om voldoende uit te kunnen produceren. In dat geval zal het gesteente gestimuleerd moeten worden. Hiervoor zijn verschillende technieken. Sommige hiervan kunnen leiden tot seismiteit.

Wanneer stoom wordt gebruikt, direct of om elektriciteit van te maken, blijft stoom of water van hoge temperatuur over. Om de business case beter te maken is het wenselijk dat deze restwarmte ook wordt gebruikt (cascadering, bijvoorbeeld voor stadsverwarming). Het is in dit geval belangrijk dat de gebruikers van de stoom en

de restwarmte zich op geringe afstand van elkaar bevinden. Evenals bij diepe geothermie is een combinatie met HTO mogelijk interessant om de business case beter te maken.

9.5 Staat van de Sector Geothermie

Het Staatstoezicht op de Mijnen is verantwoordelijk voor veilige winning van delfstoffen. In een recent verschenen rapport is het Staatstoezicht kritisch op de geothermiesector en doet een aantal aanbevelingen voor verbetering, onder meer op het gebied van veiligheid, risicobeheersing en kennisontwikkeling en -deling. De Sector erkent dat de industrie jong is en nog veel moet leren, maar stelt dat veel aanbevelingen al in de praktijk zijn gebracht. Veel kennis wordt ontwikkeld en gedeeld in bijvoorbeeld de Kennisagenda en door het Verbeterplan Geothermie.

10 Referenties en websites

- Bonté D., Wees J.-D. van, 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.
- Boots R. (2014). Regional context of a potential Dinantian play. Master thesis, Universiteit Utrecht, 129p.
- CE Delft (2015). Denktank Energiemarkt – Industriële warmtemarkt. 41p.
- Daniilidis, A., Doddema, L., Herber, R. (2016). Risk assessment of the Groningen geothermal potential: from seismic to reservoir uncertainty using a discrete parameter analysis. *Geothermics* 64 (2016) 271-288.
- Drijver B. (2011). High temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) - water treatment in practice. 1^e Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland, 13 - 14 Oktober 2011.
- Ecofys en IF Technology (2009). Geothermische elektriciteitscentrale op Texel haalbaarheidsstudie. 20p.
- ENECO, Ennatuurlijk, Eteck (2017). Nationaal warmtenet trendrapport 2017. 68p.
- Hoorneveld N. (2013). Dinantian carbonate development and related prospectivity of the Northern Netherlands onshore. MSc thesis, Universiteit van Utrecht.
- Hulten, F. van. (2012). Devonian-carboniferous carbonate platform systems of the Netherlands. *Geologica Belgica* 15/4: 284-296.
- IF Technology, ECN (2014). Kansen voor diepe geothermie bij industriële processen. 55p.
- IF WEP, Ecofys, TNO (2011). Diepe geothermie 2050 - een visie voor 20% duurzame energie voor Nederland (No. 23.822/109143/GW).
- International Energy Agency (2011). Technology Roadmap Geothermal heat and power. 52p.
- International Energy Agency (2014). Natural Gas Information, 2014 edition.
- International Energy Agency (2016). World Energy Outlook.
- Kabat P., Bazelmans J., van Dijk J, Herman P.M.J., Speelman H., Deen N.R.J., Hutjes R.W.A. (editors) (2009). Kennis voor een duurzame toekomst van de Wadden. Integratie kennisagenda van de Waddenacademie. Waddenacademie KNAW, 2009.
- KEMA, DLV Glas & Energie en IF Technology (2012). Kansen voor Ondiepe Geothermie voor de glastuinbouw. 126p.
- Kombrink, H. (2008). The Carboniferous of the Netherlands and surrounding areas; a basin analysis. PhD thesis, Universiteit Utrecht. 184p.
- Kramers L., van Wees J.-D., Pluymaekers M.P.D., Kronimus A., Boxem T. (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.
- Lipsey L., Pluymaekers M., Goldberg T., Van Oversteeg K., Ghazaryan L., Cloetingh S., Wees J.-D. van (2016). Numerical modelling of thermal convection in the Luttelgeest carbonate platform, the Netherlands. *Geothermics* 54 (2016), 135-151.
- Ministerie van Economische Zaken (2016). Energierapport Transitie naar duurzaam. 148p.
- Oversteeg, K. van. (2013). Thermal convection related to fracture permeability in a Dinantian Carbonate platform encountered at well Luttelgeest-01, Noordoostpolder, The Netherlands. Master thesis, Universiteit Utrecht.

- Planbureau voor de Leefomgeving (2017). Toekomstbeeld klimaatneutrale warmtenetten in Nederland. 78p.
- Pluymaekers M.P.D., Kramers L., van Wees J.-D., Kronimus A., Nelskamp S., Boxem T., Bonté D. (2012). Reservoir characterisation of aquifers for direct heat production: Methodology and screening of the potential reservoirs for the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw*, 91–4, 621-636.
- RGD (1984), auteurs Montfrans H. van, Prins S., Rooijen P. van. An appraisal of the Paleozoic limestone (Dinantian) and the Chalk Group (Cretaceous – Early Paleocene) in the Netherlands in connection with the exploitation of geothermal energy; heat-flow maps and temperature maps; the quantity of geothermal energy present and its potential for exploitation. Rijks Geologische Dienst report 84KAR16EX, 50p.
- RGD (1985), auteurs Doorn T.H.M. van, Leyzers Vis C.I., Salomons N., Dalfsen W. van, Speelman H., Zijl W. Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen. Rijksgeologische Dienst, Haarlem. Rapport 85KAR02EX, 143p. *Dit rapport is een compilatie van 9 rapporten van RGD en DGV/TNO over aardwarmtewinning en -opslag in Kwartaire en Tertiaire reservoirs.*
- Staatstoezicht op de Mijnen (2017). Staat van de Sector Geothermie. 25p.
- SER Noord Nederland (2016). Ondergrond – kansen voor Noord-Nederland
- TNO (2013), auteurs Pluymaekers M.P.D., Van Wees J.-D. van, Van der Kuip, M., Vandeweyer V. HTO - Hoge temperatuur opslag in de ondiepe ondergrond. TNO rapport R11694, 51p.
- TNO (2015a), auteurs Boxem T., Veldkamp J.G., Carpentier S., Goldberg T., Lipsey L. Ultradiepe geothermie in Nederland. Eindrapport, TNO rapport R11617, 136p.
- TNO (2015b), auteurs Veldkamp J.G., Boxem T.. Sector Outlook: Geothermal power increase in the Netherlands by enhancing the capacity. TNO rapport R11618, 89p.
- TNO (2016), auteurs Boxem T., Veldkamp J.G., van Wees, J.-D. Ultra-diepe geothermie: Overzicht, inzicht & to-do ondergrond. TNO rapport R1080, 53p.
- TNO (2017, in prep.), auteurs Veldkamp J.G., van Wees, J.-D. Versnelling van geothermie door portfolio-aanpak: een analyse van nationale potentie. TNO rapport R11011.
- US Energy Information Administration (2017). Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2017. 21p.
- Veldkamp J.G., Pluymaekers M., Wees, J.-D. van (2014). Extended geothermal potential of clastic aquifers by hydraulic stimulation. 76th EAGE Conference and exhibition 2014.
- Wees J.-D. van, Kramers L., Mijnlieff H., De Jong S., Scheffers B. (2013). Geothermal and hydrocarbon exploration: the double play synergy. 76th EAGE Conference and exhibition 2014.
- Wees J.-D. van, Kronimus A., van Putten M., Pluymaekers M.P.D., Mijnlieff H., Hooff P. van, Obdam A., Kramers L. (2012). Geothermal aquifer performance assessment for direct heat production – Methodology and application to Rotliegend aquifers. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw*, 91–4, 651-665.
- Zwart, de (2009). Haalbaarheidsonderzoek warmteopslag glastuinbouw Vierpolders, MEC-V fase 2a, Provincie Zuid-Holland. IF WEP, Agrimaco.

Websites:

[DAGO: Dutch Association of Geothermal Operators](#)
[Dinoloket.nl: Ondergrondmodellen](#)
[Duurzaamameland.nl: Aardwarmte is ongeloofelijk interessant](#)
[Ennatuurlijk.nl: Nieuwe duurzame warmteopwekinstallatie in Leeuwarden](#)
[Fracken en geothermie \(factsheet Platform Geothermie\)](#)
[Groenerekenkamer.nl: Quick Scan Leeuwarden](#)
[Kaart waterwingebieden en strategische waterreserves](#)
[Kamervragen over rapport Staat van de Sector Geothermie](#)
[Kennisagenda Aardwarmte](#)
[Leeuwarder Courant: Miljoenen subsidie voor Friese aardwarmte](#)
[Milieudefensie.nl: Gastransitie en warmtenetten](#)
[NLOG.nl: Netherlands Oil and Gas Portal](#)
[NOS.nl: Ameland proeftuin zonneboilers, warmtepompen en geothermie](#)
[Platform Geothermie](#)
[RVO.nl: Warmteatlas viewer](#)
[RWSleefomgeving.nl: bodemenergie](#)
[Seismiciteit en geothermie \(factsheet Platform Geothermie\)](#)
[Soilpedia.nl: Kansen voor ondiepe geothermie in de glastuinbouw](#)
[ThermoGIS.nl](#)
[Warmtenet Trendrapport](#)
[Warmtestad.nl: Noordwest Geothermie](#)
[WKOtool.nl](#)

A HTO-systemen in Nederland en buitenland

De toepassing van reguliere open bodemenergiesystemen in de bodem begon in Nederland in de jaren tachtig. In de meeste gevallen (ruim 99%) is de maximale opslagtemperatuur lager dan 25°C. Het eerste systeem dat als HTO systeem gekwalificeerd kan worden dateert uit 1976. Het eerste systeem in Nederland dateert uit 1983. In totaal zijn in 15 systemen gerealiseerd waarbij temperaturen hoger dan 25°C worden opgeslagen, waarvan 8 in Nederland (oranje in Tabel 10.1).

Tabel 10.1 Bekende MTO en HTO installaties. (MTO: Middelhoge temperatuur opslag, HTO: hoge temperatuur opslag)

Project	Realisatie	Type	Opslag-temperatuur	Status
Auburn University, USA	1976	HTO open	40-90°C	Gestopt
University of Minnesota, USA	1982	HTO open	90-130°C	Gestopt
SPEOS, Lausanne-Dorigny, Zwitserland	1982	HTO open	50-80°C	Gestopt
Hørsholm, Denemarken	1982	HTO open	100°C	Gestopt
Froukemaheerd Beijum	1983	HTO gesloten	60°C	Actief
Kantoorcomplex Bunnik	1985	MTO open	30°C	Nu koudeopslag
Le Plaisir, Thiverval-Grignon, Frankrijk	1987	HTO open	55-180°C	Gestopt
Lomma, Zweden	1988	HTO open	40-80°C	Gestopt
Universiteit Utrecht	1991	HTO open	90°C	Gestopt
Heuvelgalerie Eindhoven	1992	MTO open	30°C	Actief
Dolfinarium Harderwijk	1997	MTO open	40°C	Actief
Hooge Burch Zwammerdam	1998	HTO open	90°C	Gestopt
Rijksdag, Berlijn	1998	HTO open	70°C	Actief
2MW Haarlem	2002	MTO open	45°C	Actief
NIOO Wageningen	2011	MTO open	45°C	Actief
GEOMec Vierpolders	nb	HTO open	84°C	Vergund, niet gerealiseerd

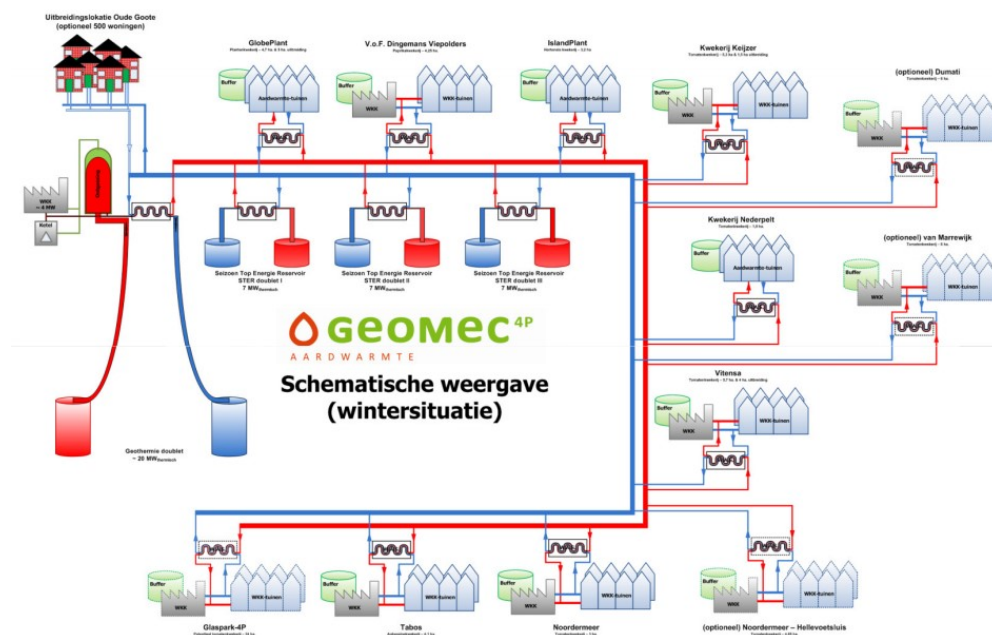
In Nederland zijn meerdere HTO-projecten gerealiseerd. Hieronder volgt een korte samenvatting van deze projecten:

Koppert Cress in Monster startte in 2011 als HTO-pilot en maakt onderdeel uit van een Green Deal. In dit project wordt water met een temperatuur van 40°C opgeslagen in de bodem via de WKO-installatie bij het bedrijf. Warmte uit de kas en van ledverlichting wordt in de zomer opgeslagen in de bodem en in de winter gewonnen

voor het verwarmen van de kas, het kantoorgebouw en bouwkavels in de nabije omgeving.¹⁵

In het Zuid-Hollandse **Vierpolders** is een project gerealiseerd dat gebruik gaat maken van een geothermische bron voor het verwarmen van negen glastuinbedrijven (~60 hectare). De bron ligt op een diepte van 2200 meter en heeft een temperatuur van ongeveer 80-85°C.

De te koppelen seizoensopslag wordt nog niet gerealiseerd. De voorgestelde opslag bevindt zich op diepte van 85 - 200 meter en is ontworpen voor het opslaan van de overtollige warmte uit de geothermische bron. De infiltratietemperatuur van het warme water zou in de zomer 84°C zijn in de warme bronnen en in de winter 43°C in de koude bronnen. De maximale capaciteit is geraamd op 600 m³ per uur. Het grondwatersysteem bestaat uit 6 putten (3 doubletten) en heeft een geschat vermogen van 20-25 MW_{th}. Het thermische rendement is berekend op ongeveer 60%.



Figuur 10.1 Schematisch overzicht GEOMEC4P. Bron: Hydreco.

¹⁵ <http://www.greendeals.nl/gd026-koppert-cress/#sthash.kU9INkm6.dpuf>

In Nederland zijn er in het verleden ook twee HTO-projecten ($>80^{\circ}\text{C}$) gerealiseerd, in Utrecht (~220m diep) en Zwammerdam (~150 m diep). In Utrecht werd het systeem gebruikt om een teveel aan warmte vanuit de WKK-installatie op te slaan en te gebruiken voor gebouwverwarming.

In Zwammerdam werd het systeem ingezet voor het verwarmen van een tehuis voor verstandelijk gehandicapten de Hooge Burch (Inmiddels heet de zorginstelling De Bruggen). De warmte werd geproduceerd door een WKK-installatie.

Beide systemen zijn momenteel niet meer in gebruik. Technisch gezien hebben beide systemen grotendeels goed gefunctioneerd. De belangrijkste reden om de systemen te sluiten waren:

Utrecht: geen goede afstemming van de installaties in het gebouw op de warmteopslag; de temperatuur van het water vanuit de gebouwen was te hoog. Hierdoor zijn de minimale vereisten voor de terugvoertemperaturen niet gehaald. De vraag naar lagere temperaturen bleek niet zo hoog te zijn als was voorzien.

Het thermisch rendement van de opslag gedurende 2 jaar was wel hoog, nl. 68% en 80%. Het gemiddeld lage opslagrendement van het hele systeem was echter maar 27% als gevolg van de (kwaliteit van de) warmtevraag uit het gebouw en niet van verliezen in de bodem. Het thermisch gedrag van de warmteopslag in de bodem heeft voldaan aan de verwachtingen alhoewel er wel problemen waren met de waterbehandelingstechniek.

Zwammerdam: de warmteopslag is vanwege financiële redenen uit bedrijf genomen. De WKK werd ingezet op basis van de elektriciteitsvraag dat tegen een gunstig tarief werd terug geleverd aan het net. De overtollige warmte die daarbij werd geproduceerd werd opgeslagen voor later gebruik. Uit monitoringgegevens is gebleken dat de terugleververgoeding voor de elektriciteitsproductie en de winst uit de warmteopslag financieel niet tegen elkaar hebben opgewogen. Daarom is destijds besloten om de WKK in draaiuren terug te brengen en de warmteopslag niet meer in te zetten. Het opslagrendement van deze HTO installatie is berekend op circa 65%. Hierbij moet worden vermeld dat de warmteopslag een relatief kleine opslag betrof en dus meer hinder ondervond door verliezen in de bodem. Bij een grotere opslag van warmte werd een hoger opslagrendement verwacht.

Wageningen: bij het Nederlands Instituut voor Oecologisch Onderzoek (NIOO) is een MTO systeem aanwezig dat gekoppeld is aan zonnecollectoren als warmtebron. De opslagtemperatuur is ca. 45°C , het ontwerpdebiet $45\text{ m}^3/\text{h}$ en de filterstelling 220-290 m diep, waarmee het in de hydrologische basis staat. Alleen het bovenste, derde deel van het filter is productief en de werkelijke capaciteit is hierdoor $25\text{ m}^3/\text{h}$. De warmteopslag werkt verder naar behoren maar de zonnecollectoren leveren minder warmte dan voorzien (Agtereek, 2013). Het MTO-project bij het NIOO

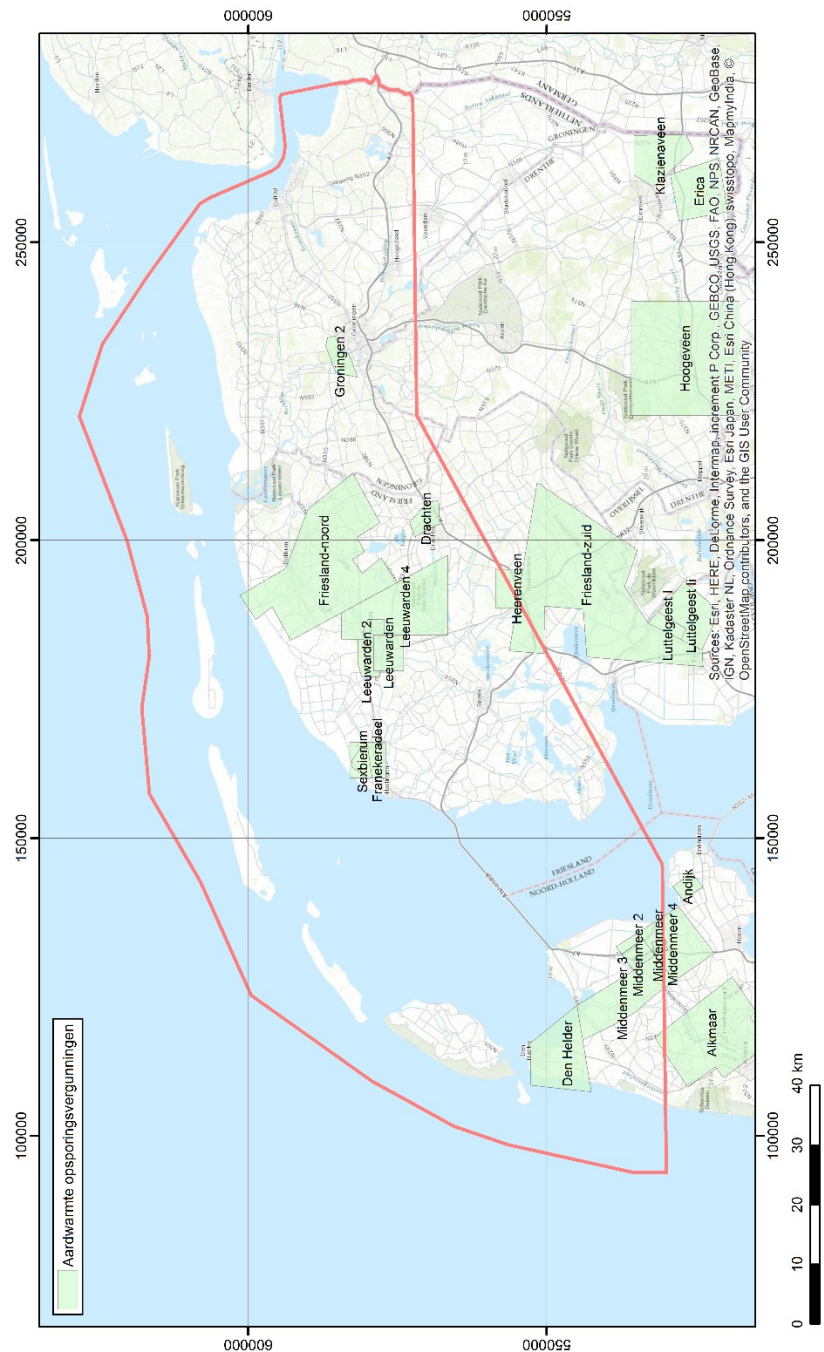
heeft laten zien dat er nog weinig kennis is over de ondergrond op enkele honderden meters diep. Zolang die kennis op regionale schaal ontbreekt is het volgens de adviseur van NIOO raadzaam om eerst een proefboring te doen voordat een MTO of HTO wordt aangelegd (AgentschapNL, 2011).

B Aardwarmtevergunningen

Om aardwarmte te kunnen winnen is het nodig eerst een opsporingsvergunning aan te vragen bij het Ministerie van Economische Zaken. Gedurende de looptijd van de opsporingsvergunning (doorgaans vier jaar) wordt onderzoek gedaan naar de ondergrond, het oppervlaktesysteem, de financiering etc. Vaak moet na twee jaar een go-no go beslissing genomen worden ('drill or drop'). Een opsporingsvergunning zal in de regel leiden tot een exploratieboring, die de aanwezigheid van economisch winbaar warm water moet bevestigen. Een winningsvergunning is nodig zodra de productie van start gaat.

Olie- en gasvergunningen kunnen overlappen met geothermievergunningen aangezien het om verschillende delfstoffen gaat. Wel is het zo dat als gas met water mee wordt gewonnen in economische hoeveelheden, dit in principe toebehoort aan de houder van de winningsvergunning voor koolwaterstoffen. In Noord-Nederland zijn dit de NAM en Vermilion. In Noord-Nederland zijn momenteel 11 opsporingsvergunningen voor geothermie. Van de opsporingsvergunningen is Friesland Noord / Friesland Zuid voor ultradiepe geothermie verleend. Deze behoort toe aan Transmark Renewables. De Nederlandse tak van dit bedrijf is echter niet meer actief. Wat opvalt is dat binnen de gebieden die volgens ThermoGIS de grootste potentie hebben voor conventionele geothermie, weinig vergunningen zijn verleend.

Website: <http://www.nlog.nl/geothermie-vergunningen>



Opsporingsvergunningen aardwarmte in het Waddengebied. De vergunningen Friesland-Noord en -Zuid zijn exclusief voor ultradiepe geothermie verleend. Bron: www.nlog.nl/vergunningen

C Verklarende woordenlijst

Afsluitende laag	Zie aquitard.
Anisotropie	De mate waarin eigenschappen van een materiaal in verschillende richtingen verschillen. De permeabiliteit van sediment of gesteente is in horizontale richting vaak veel groter dan in verticale richting. Een vloeistof kan dan makkelijk horizontaal stromen, en moeilijk verticaal.
Aquifer	Een gesteente- of sedimentlaag die goed doorlatend is.
Aquitard	Een gesteente- of sedimentlaag die slecht doorlatend is.
BOP	Blowout Preventer, apparaat dat de boring automatisch afsluit wanneer onverwacht gas met de boorspoeling naar boven komt.
Cascadering	Gebruik in een secundair proces van lagere temperatuur (rest)warmte die over is na een primair proces waarbij warmte van hoge temperatuur is gebruikt.
Doorlatendheid	Zie permeabiliteit.
Doublet	Een set van twee boringen (injector en producer) waarmee aardwarmte gewonnen kan worden.
EGS	Engineered (of Enhanced) Geothermal System. Aanduiding van een geothermisch systeem waarvan het reservoir van zichzelf onvoldoende permeabiliteit heeft om te kunnen produceren, en dat gestimuleerd (enhanced of engineered) moet worden.
Garantiefonds	Bij de overheid af te sluiten verzekering tegen een laag behaald geothermisch vermogen.
Geothermische gradiënt	De mate waarmee de temperatuur in de ondergrond toeneemt met de diepte. In Nederland is deze gemiddeld ruim 30 °C per kilometer
GJ	Gigajoule, 1×10^9 joule.
HDR	Hot Dry Rock. Aanduiding van heet gesteente dat geen significante hoeveelheid water bevat. Dit kan mogelijk gebruikt worden voor geothermie wanneer het gebroken wordt, en er water doorheen wordt gepompt dat door het hete gesteente wordt opgewarmd.
HTO	Hoge Temperatuur Opslag. Ook wel ATES (Aquifer Thermal Energy Storage).
Injector	Boring waarmee water teruggebracht kan worden in de ondergrond.
J	joule, eenheid van energie
Kernplug	Gesteentemonster, verkregen uit een boorkern, waarvan de eigenschappen als porositeit en permeabiliteit worden bepaald. Meestal ongeveer 5 centimeter lang en 2 centimeter in doorsnede.
LCOE	Levelized Cost of Energy. Gemiddelde kosten van energieproductie over de levensduur van een installatie (€/GJ).

MW	Eenheid van vermogen, 1 miljoen joule/seconde
MWh	Megawatt-uur. Hoeveelheid energie die geproduceerd wordt in 1 uur door een systeem dat een vermogen van 1 MW heeft (dus $1000000 \times 1 \text{ J/s} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \text{ GJ}$)
MW _{th}	Megawatt thermisch, het thermisch vermogen van een doublet dat gebruikt wordt om warmte te produceren.
MW _e	Megawatt elektrisch, het elektrisch vermogen van een doublet dat gebruikt wordt om elektriciteit te produceren. Het elektrisch vermogen is een fractie van het thermisch vermogen.
Load factor	Het aantal uren dat een systeem actief is als percentage van het totaal aantal uren.
Permeabiliteit	Het gemak waarin een vloeistof door een medium kan stromen. De eenheid is darcy (D) of millidarcy (mD).
PJ	Petajoule, 1×10^{15} joule
Porositeit	Gedeelte van een bulk gesteentevolume dat niet door korrels wordt ingenomen. De eenheid is fractie of percentage.
Producer	Boring waardoor water uit de ondergrond gepompt wordt
Put	Boring
Reservoir	Zie aquifer
RNES	Regeling nationale EZ-subsidies.
Schalie	Versteende (gelithificeerde) klei.
SDE+	Stimulering Duurzame Energie. Subsidieregeling voor duurzaam geproduceerde energie.
Seal	Zie aquitard.
Stimuleren	De eigenschappen van een sediment of gesteente zodanig veranderen dat het produceren of injecteren van water (of een andere vloeistof) makkelijker verloopt. In het algemeen hebben stimuleringstechnieken het vergroten van de permeabiliteit tot doel.
TJ	Terajoule, 1×10^{12} joule.
Vollasturen	Aantal uren per jaar dat een systeem actief is.
W	Watt, eenheid van vermogen, 1 joule per seconde
Warmtenet	Netwerk van (ondergrondse) leidingen waardoor warm water stroomt, dat gebruikt kan worden om kantoren en woningen te verwarmen (stadsverwarmingsnet).
Warmteprofiel	Warmtegebruik door het jaar heen. Dit heeft in de regel een piek in de winter, en een dal in de zomer.
Waterremmende laag	Zie aquitard.
Watervoerende laag	Zie aquifer.
WKO	Warmte-Koude-opslag

