

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75  
[infodesk@tno.nl](mailto:infodesk@tno.nl)

## TNO-rapport

# Regionale studie aardwarmtepotentie provincie Limburg

Datum	18 december 2012
Auteur(s)	L. Kramers, G.J. Vis, M. van den Dulk, E.J.T. Duin, N. Witmans, M. Pluymaekers, J.C. Doornenbal
Exemplaarnummer	
Oplage	5
Aantal pagina's	143 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	7
Opdrachtgever	Provincie Limburg
Projectnaam	
Projectnummer	056.01872

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Wat is aardwarmte?</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>De aardwarmtefamilie</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Het principe van aardwarmte</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Bovengrondse technieken</b> .....	<b>9</b>
5.1	Warmtewinning – Warmtewisselaars .....	9
5.2	Elektriciteitsopwekking - Warmtekrachtcentrale .....	10
<b>6</b>	<b>Randvoorwaarden ondergrond voor diepe aardwarmte</b> .....	<b>12</b>
6.1	Randvoorwaarden voor een geschikt gesteente .....	12
6.2	Breuken .....	16
6.3	Reservoirstimulatie .....	18
<b>7</b>	<b>Vermogen van een aardwarmtesysteem</b> .....	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Putten en boringen</b> .....	<b>22</b>
8.1	Boortoren .....	22
8.2	Putconstructie .....	23
8.3	Putconfiguratie .....	23
<b>9</b>	<b>Hinder en risico's</b> .....	<b>25</b>
9.1	Hinder .....	25
9.2	Risico's .....	26
9.3	Milieueffecten.....	27
<b>10</b>	<b>Van idee naar realisatie</b> .....	<b>29</b>
10.1	Wat is het gewenste geothermisch vermogen? .....	31
10.2	Haalbaarheidsonderzoek.....	32
10.3	Gedetailleerde studie en exploratieboring .....	34
10.4	Tweede boring en realisatie .....	36
<b>11</b>	<b>Toekomstige ontwikkelingen</b> .....	<b>38</b>
11.1	Ultra-diepe geothermie (EGS) .....	38
11.2	Monobronnen.....	40
<b>12</b>	<b>Gegevens van de ondergrond</b> .....	<b>42</b>
12.1	Basisgegevens ondergrond.....	42
12.2	Groeperen van aardlagen.....	44
12.3	Geologische informatie Limburg.....	46
<b>13</b>	<b>Aanpak studie ondergrond</b> .....	<b>49</b>
13.1	Voorselectie .....	49
13.2	Kartering ondergrond.....	50
13.3	Temperatuurgradiënt .....	51
13.4	Theoretische Energie Hoeveelheid kaarten (GJ/m <sup>2</sup> ) .....	51

13.5	Vermogenskaarten (MWth) .....	52
<b>14</b>	<b>Preselectie potentieel geschikte laagpakketten</b> .....	<b>55</b>
14.1	Potentieel geschikte laagpakketten ondergrond Limburg .....	55
<b>15</b>	<b>Potentieel geschikte aardwarmteregio's</b> .....	<b>58</b>
15.1	Laagpakketten in de Roerdal Slenk.....	58
15.2	Peel-Venlo en Zuid-Limburg Blokken .....	75
<b>16</b>	<b>Betrouwbaarheid resultaten</b> .....	<b>89</b>
<b>17</b>	<b>Kennisleemten en aanbevelingen</b> .....	<b>90</b>
<b>18</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>92</b>
<b>19</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>95</b>
<b>20</b>	<b>Ondertekening</b> .....	<b>98</b>

**Bijlage(n)**

- A Boringen en seismische lijnen
- B Petrofysische analyse put NDW-01
- C Dieptekaarten
- D Temperatuurkaarten
- E Vermogenskaarten bij P30
- F Vermogen indicatie Kolenkalk Groep
- G Theoretisch energie potentieel kaarten

# 1 Inleiding

Aardwarmte is een duurzame energiebron en een uitstekend alternatief om op een duurzame wijze woningen en kassen te verwarmen of elektriciteit op te wekken. Aardwarmte, ook wel geothermie genoemd, heeft veel voordelen. Het is duurzaam, nagenoeg CO<sub>2</sub>-emissie vrij, 24 uur per dag leverbaar, onafhankelijk van fluctuaties in de olieprijs en valt niet op in het straatbeeld. Aardwarmte kan daarom een goede bijdrage leveren aan de milieudoelstellingen die de provincie Limburg zich heeft gesteld.

Dat de ondergrond van de provincie Limburg kansen biedt voor aardwarmtewinning is recent bewezen door de twee aardwarmteputten die geboord zijn in het kassengebied Californië in Grubbenvorst. Hoewel het project nog niet is afgerond gedurende het schrijven van dit rapport is de informatie die via persberichten wordt verspreid bemoedigend.

De provincie heeft TNO opdracht verleend voor een project met twee primaire doelstellingen. Het eerste doel van het project is een algemene uiteenzetting van verschillende onderdelen van aardwarmte, zoals uitleg over het principe van aardwarmte, welke criteria aan de ondergrond worden gesteld, ontwikkeling van een aardwarmtesysteem en dergelijke.

Het tweede doel van dit project is een regionale inventarisatie naar potentiële diepe aardwarmtereservoirs. Het onderzoek richt zich hierbij uitsluitend op de potentie van de ondergrond. Bovengrondse vraag is in deze studie niet meegenomen. De inventarisatie is gebaseerd op vooraf opgestelde criteria voor geschikt reservoirgesteente. Hiervoor is gebruik gemaakt van publiek beschikbare gegevens van de ondergrond, zowel binnen de provincie als in de rest van Nederland en Duitsland en België.

De resultaten van het onderzoek laten zien dat vooral in het midden en noorden van de provincie laagpakketten aanwezig zijn die aan de gestelde criteria voldoen voor aardwarmtewinning. In dit project zijn deze laagpakketten gekarteerd en gemodelleerd om een inschatting te kunnen maken van de diepte, temperatuur en het verwachte vermogen. Het dient benadrukt te worden dat het hier om een eerste orde inventarisatie gaat. Er kan op basis van deze gegevens geen definitieve conclusie getrokken worden over de geschiktheid van een laagpakket. Locatie specifiek onderzoek blijft essentieel. *De resultaten in dit rapport kunnen niet ingediend worden bij een eventuele aardwarmtevergunningaanvraag.*

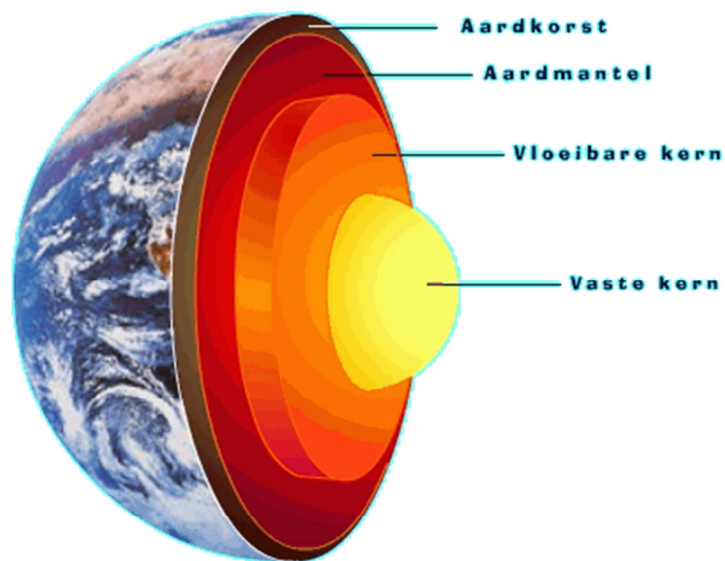
Het eerste deel van dit rapport bestaat uit een algemene, geïllustreerde beschrijving van de voor aardwarmte van belang zijnde factoren. De algemene informatie heeft als doel aardwarmte en de technische onderdelen die daarmee te maken hebben beter te kunnen doorgronden. Vanaf Hoofdstuk 13 worden de aanpak, resultaten, kennisleemten en aanbevelingen behandeld.

## 2 Wat is aardwarmte?

Aardwarmte is warmte afkomstig van de kern van de aarde. De warmte is deels het gevolg van het ontstaan van de aarde maar grotendeels afkomstig van natuurlijk radioactief verval van elementen in de aardkorst. Door geleiding bereikt de warmte vanuit de aardkern de aardkorst (Figuur 1).

De warmte wordt niet homogeen over de aardkorst verdeeld. Bij vulkanische gebieden, zoals op IJsland, worden dicht aan het oppervlak veel hogere temperaturen waargenomen dan in Nederland. Ter vergelijking, op IJsland worden al op 1000 m diepte temperaturen bereikt van meer dan 200 °C, terwijl in Nederland op een vergelijkbare diepte gemiddeld 40 °C wordt gemeten.

De toevoer van warmte vanuit de aarde is een continu proces. Afgekoeld gesteente wordt uiteindelijk van binnenuit weer verwarmd. Vandaar dat aardwarmte gezien wordt als een duurzame energiebron voor het verwarmen van huizen en kassen, elektriciteitsopwekking of andere industriële toepassingen.



Figuur 1. Vereenvoudigde weergave van het binnenste van de aarde ([www.de-aarde.com](http://www.de-aarde.com)).

### 3 De aardwarmtefamilie

Voor de winning van aardwarmte zijn meerdere exploitatievormen te onderscheiden. Men zou kunnen spreken van een aardwarmtefamilie (Figuur 2). Aardwarmte kan in twee hoofdgroepen worden onderverdeeld: ondiepe en diepe aardwarmte. Binnen deze hoofdgroepen zijn wederom onderverdelingen te maken. Het onderscheid is gebaseerd op het te behalen vermogen, de schaalgrootte (enkel gebouw tot elektriciteitscentrale) en de eigenschappen van het ondergrondse reservoir.

#### *Ondiepe aardwarmte*

Tot de ondiepe aardwarmte behoren bodemwisselaars (gesloten systemen) en Warmte en Koude Opslag (open systemen). De systemen wekken vermogen op tot een diepte van 250 m bij temperaturen van 5 °C tot ongeveer 30 °C. Hiermee kan een vermogen opgewekt worden tussen 100 kW en maximaal 10 MW. Beide toepassingen leiden tot een verhoging van het rendement bij koeling en verwarming van een huis (bodemwisselaar) en utiliteitsbouw, zoals kantoorgebouwen, ziekenhuizen, winkelcentra en dergelijke.

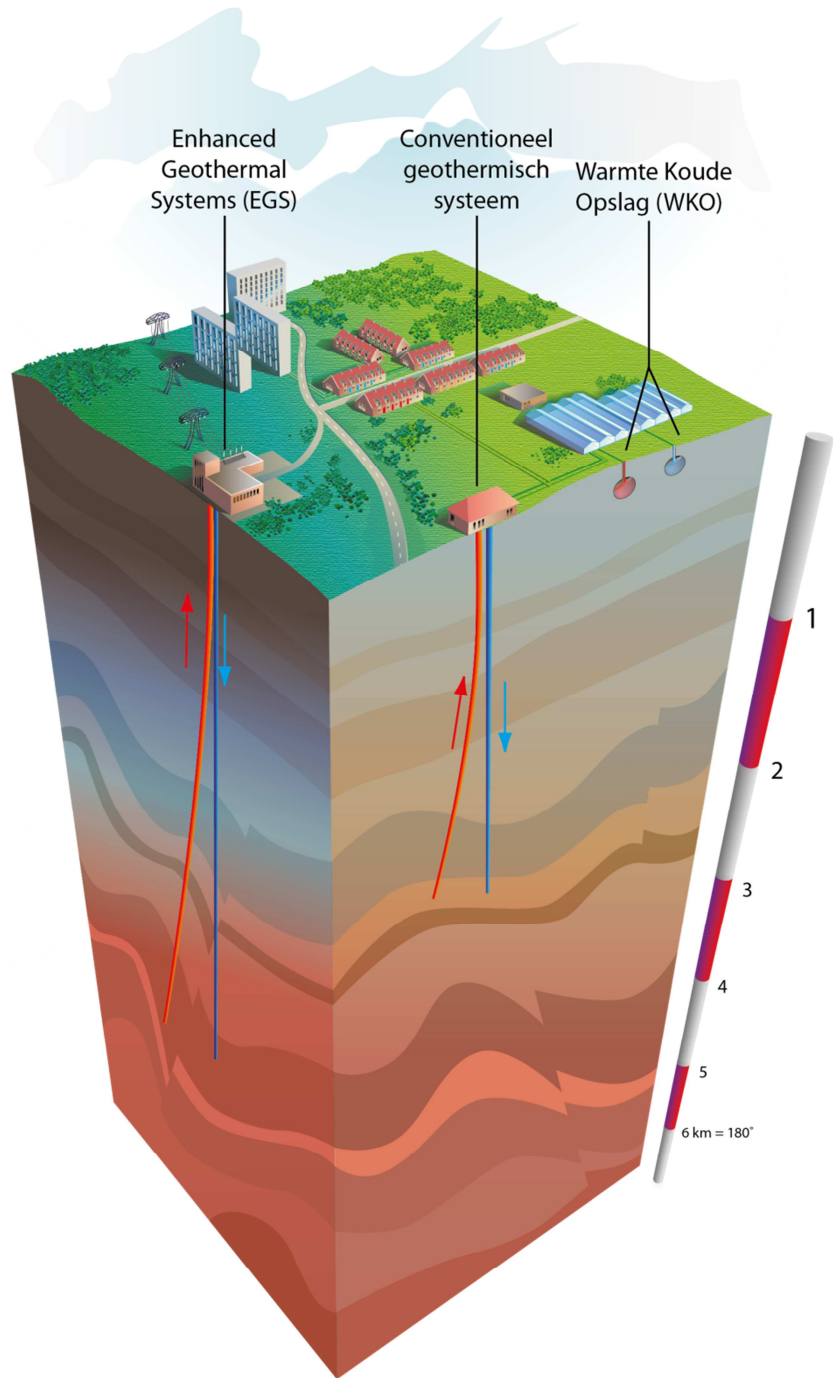
Beide toepassingen worden tot de aardwarmtetoepassingen gerekend, omdat zij warmte onttrekken aan de ondergrond. Strikt gesproken horen zij echter niet tot de aardwarmte omdat de benutte energie opgeslagen warmte uit de atmosfeer is en geen warmte is die vanuit het binnenste van de aarde komt.

#### *Diepe aardwarmte*

Voor Nederland zijn vooral de conventionele aardwarmtesystemen voor warmtewinning en Engineered (Of Enhanced) Geothermal Systems (EGS) van toepassing.

Voor warmtewinning in Nederland zijn gesteenten van 1000 m tot ongeveer 3500 m diepte geschikt. De temperatuur is dan respectievelijk ongeveer 40 °C tot 120 °C. Met aardwarmtewinning is een thermisch vermogen te behalen van meer dan 5 MW. De warmte wordt direct gebruikt voor het verwarmen van kassen, woonwijken of voor industriële toepassingen.

Vanaf 3500 m wordt gesproken over 'ultra-diepe' aardwarmte en dan doelt men vooral op EGS. Vanaf deze diepte worden temperaturen benut van meer dan 120°C. Hierdoor zijn hogere vermogens te realiseren en wordt het opwekken van elektriciteit rendabel. Elektriciteitsopwekking is een indirecte manier van aardwarmtebenutting, omdat warmte wordt gebruikt om stoom te genereren waarmee een turbine wordt aangedreven.



Figuur 2. Schematische weergave van de aardwarmtefamilie.

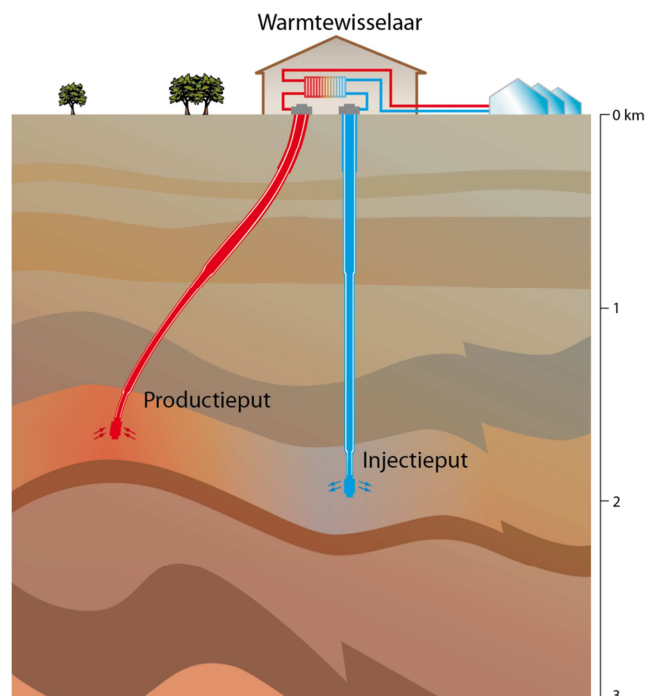
## 4 Het principe van aardwarmte

Om aardwarmte te benutten wordt warm water uit een watervoerend gesteente, of laagpakket, in de ondergrond opgepompt. Het laagpakket wordt ook watervoerend reservoir of aquifer genoemd. Een aquifer dient naast watervoerend ook goed doorlatend te zijn. Om het water te kunnen onttrekken aan een aquifer worden een productie- en injectieput geboord (Figuur 3). De productie- en injectieput worden samen doublet genoemd. Via de productieput wordt het warme water opgepompt.

Via een warmtewisselaar wordt de thermische energie benut voor verwarming of andere toepassingen. Het afgekoelde water wordt weer geïnjecteerd via de injectieput. Injectie is nodig om risico's als beving en bodemdaling te voorkomen. Daarnaast kunnen in het opgepompte water zware metalen en mineralen (zouten) aanwezig zijn. Lozing van dit water aan het oppervlak is daarom niet gewenst.

Door het koelere geïnjecteerde water ontstaat een koudefront rondom de injectieput. Over een periode van enkele tientallen jaren zal dit koudefront naar de productieput toetrekken. Zodra het contact maakt met de productieput daalt de temperatuur van het opgepompte water en zal het rendement van het systeem afnemen. Het duurt naar verwachting honderden jaren voordat de temperatuur weer op een voor de betreffende diepte normaal niveau is.

Door deze wijze van energieopwekking zijn er vrijwel geen CO<sub>2</sub>-emissies meer en worden de kosten voor gasverbruik sterk gereduceerd.



Figuur 3. Vereenvoudigde weergave van een aardwarmte doublet voor verwarming van kassen of woningen.

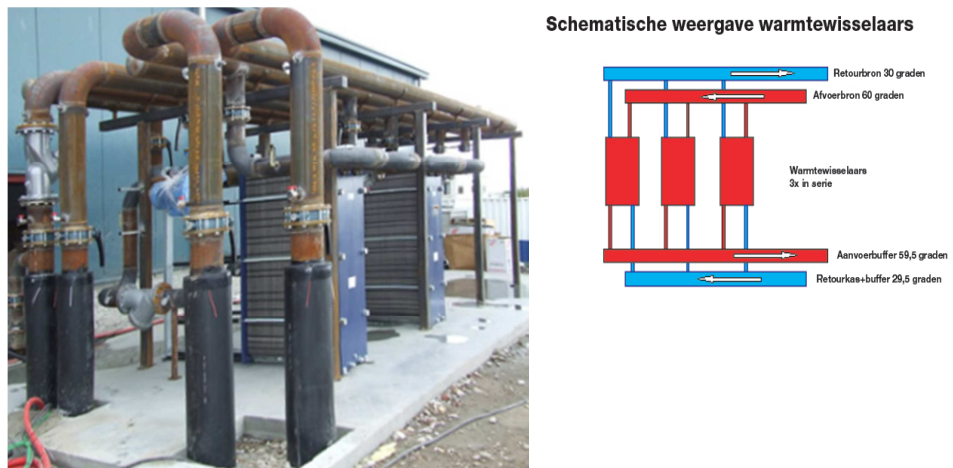


## 5 Bovengrondse technieken

### 5.1 Warmtewinning – Warmtewisselaars

Voor het verwarmen van kassen of woningen wordt een doublet aangesloten op een warmtewisselaar. De warmtewisselaar verbindt twee circuits (Figuur 4). Het primaire circuit bestaat uit de productie- en injectieput. Het secundaire circuit bestaat uit het leidingstelsel dat de warmte leidt naar de gebruikersfunctie, bijvoorbeeld het systeem voor het verwarmen van kassen.

Het warme water uit de productieput wordt door een warmtewisselaar geleid. De warmtewisselaar geeft de warmte af aan het water of ander absorptievloeistof in het secundaire circuit. Het afgekoelde water wordt teruggepompt naar het reservoir. Via het secundaire circuit wordt de warmte benut voor verwarming. Het afgekoelde water wordt vervolgens weer teruggeleid naar de warmtewisselaar waar het wederom wordt verwarmd door het primaire circuit (Figuur 4).



Figuur 4. Warmtewisselaar zoals geïnstalleerd bij A+G van den Bosch Tomaten in Bleiswijk. De oppervlakte voor de warmtewisselaars is in de orde van 4 bij 6 m; ongeveer de grootte en hoogte van een zeecontainer (Van den Bosch, R., en Flipse, B., 2010).

Het grondoppervlak van een installatie is afhankelijk van het vermogen dat men wenst en de toepassing (kassen of verwarming woonwijken). De warmtewisselaars worden vaak aangesloten op hulpketels die dienen als back-up bij onderhoud van het systeem en het bijstoken van warmte in periodes van extra vraag. Het bovengrondse gedeelte omvat een serie componenten die worden ondergebracht in een gebouw. De belangrijkste componenten zijn:

- variabele frequentieregelaar voor de elektrische onderwaterpomp die de afregeling van het putdebiet<sup>1</sup> regelt;
- warmtewisselaars waarmee de warmte van het geothermische circuit wordt overgebracht op het distributienetwerk;
- pompen voor de circulatie in het distributienetwerk;

<sup>1</sup> Debiet staat in deze situatie voor de hoeveelheid doorstromend water per tijdseenheid ( $m^3/u$ ).

- filters voor het verwijderen van zand en fijne deeltjes om verstoppingen in de injectieput te voorkomen;
- een injectiepomp en doseerinstallatie voor corrosie werende vloeistoffen (optioneel);
- eventueel een warmtekrachtcentrale (wkc of wkk), buffers en pieklastketel;
- indien gas en/of olie wordt mee gepompt is er ook een afscheider nodig.

Verder is een pomp nodig om het water terug te voeren in het reservoir. Deze pomp wordt in de injectieput gehangen en neemt daardoor geen bovengrondse ruimte in beslag. Bovengenoemde componenten verbruiken elektriciteit, maar de elektriciteitskosten zijn significant lager dan de kosten voor gasverbruik om warmte op te wekken. Gemiddeld neemt de warmtewisselaar een ruimte in beslag van ongeveer 10 bij 10 m (Figuur 4).

Voor verwarming van woningen moeten de warmtewisselaars aangesloten worden aan een distributienetwerk. In Den Haag wordt aardwarmte gebruikt voor het verwarmen van 4000 woningen, waarvoor een kleine centrale in een gebouw is ondergebracht (Figuur 5). Deze centrale herbergt de warmtewisselaars en biedt ruimte voor twee ketels. Een van de ketels is bestemd voor het aardwarmteproject, de andere ketel is ter vervanging van het E.ON ketelhuis op het naastgelegen ziekenhuisterrein (aardwarmtedenhaag.nl).



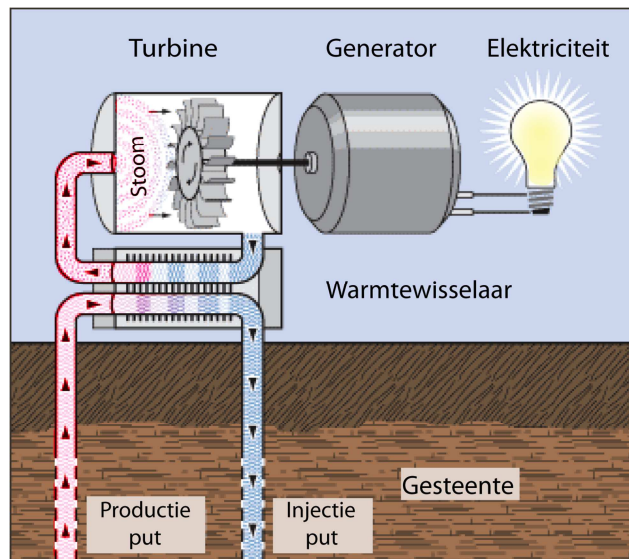
Figuur 5. Een ketelhuis met twee ketels in een woonwijk in Den Haag.

## 5.2 Elektriciteitsopwekking - Warmtekrachtcentrale

Er zijn drie systemen op de markt waarmee met hoge temperatuur elektriciteit opgewekt kan worden: binaire, flash en 'dry steam' systemen. De laatste twee systemen werken pas efficiënt bij hoge temperaturen vanaf 180°C. Voor de Nederlandse situatie is een binair systeem de meest bruikbare installatie. Wereldwijd worden door innovatie de binaire systemen steeds meer toegepast, ook bij temperaturen boven de 180°C (OECD/IEA, 2011, GEA, 2007).

Er bestaan twee typen binaire systemen, namelijk de 'Organic Rankine Cycle (ORC)' en de Kalina Cycle. Bij beide systemen verwarmt warm water uit de aarde een andere vloeistof die een lager kookpunt heeft dan water. Bij een ORC installatie wordt butaan of pentaan verwarmd. Een Kalina Cycle installatie gebruikt een

ammonia-water mengsel. De warmteoverdracht vindt plaats via een warmtewisselaar en met de stoom wordt een turbine aangedreven (Figuur 6).



Figuur 6. Versimpelde weergave van een binair systeem (fig. op basis van OECD/IEA, 2011).

Een aardwarmtekrachtcentrale heeft een redelijk grote omvang van mogelijk enkele hectaren afhankelijk van het geproduceerde vermogen. Het terrein omvat de oppervlaktelocaties van de productie- en injectieputten, de productie-/injectiepompen, warmtewisselaars en turbines voor het genereren van de elektriciteit. De centrales zijn zichtbaar in het landschap en er zijn torens waar waterdamp vrijkomt. In de EGS-demonstratielocatie in Soultz-sous-Forêts in Frankrijk wordt op het moment *netto* 1,5 MW elektriciteit opgewekt (soulz.net) (Figuur 7).



Figuur 7. EGS Warmtekrachtcentrale in Soultz-sous-Forêts (soulz.net).

## 6 Randvoorwaarden ondergrond voor diepe aardwarmte

### 6.1 Randvoorwaarden voor een geschikt gesteente

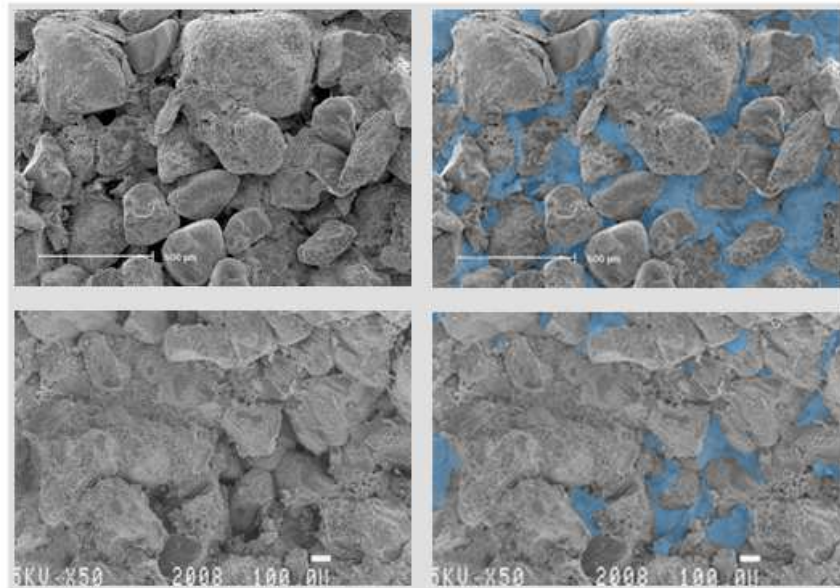
Voor een aardwarmtesysteem is in het ideale geval een poreus en goed doorlatend gesteente nodig. Dit levert de minste complicaties op wat betreft de onttrekking van water en de veiligheidsrisico's. In 2007 is in Bleiswijk het eerste Nederlandse doublet gerealiseerd. Sindsdien zijn er meer dan 100 opsporingsvergunningen naar aardwarmte bij het Ministerie van Economische Zaken aangevraagd en zijn acht doubletten geboord, waarvan zeven doubletten in een poreus gesteente. Twee winningsvergunningen zijn inmiddels verleend en operationeel en één is in aanvraag (1 juli 2012). De overige doubletten zijn nog niet operationeel wegens injectieproblemen en gas/oliebijvangst (geothermie.nl). Op dit moment wordt hiervoor naar technische oplossingen gezocht. Een poreus watervoerend laagpakket dient aan de volgende randvoorwaarden te voldoen om in aanmerking te komen voor direct gebruik van aardwarmte.

#### *Voldoende poreus en doorlatend (permeabel)*

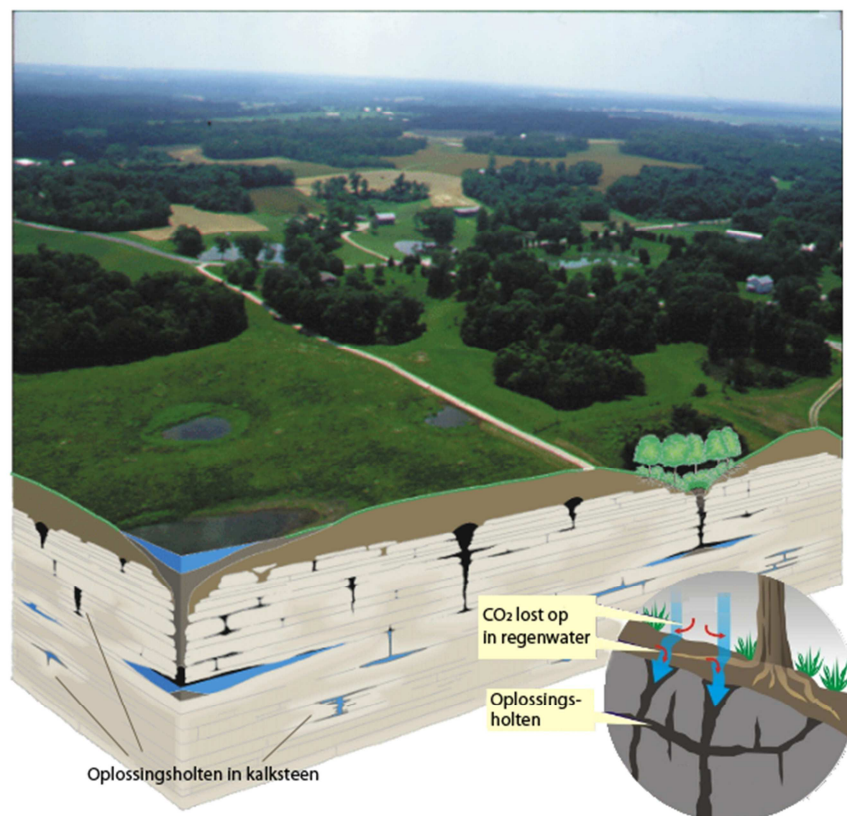
Allereerst moet er voldoende water aanwezig zijn. Dit wordt bepaald door de porositeit van het gesteente. Porositeit is een maat voor de aanwezigheid van kleine openingen (poriën) in een materiaal. Daarnaast moeten de poriën met elkaar verbonden zijn, zodat het water door het gesteente kan stromen. De maat hiervoor is permeabiliteit (doorlatendheid). Een voldoende hoge doorlatendheid van een laagpakket is doorslaggevend voor een succesvol aardwarmtesysteem (zie Hoofdstuk 7). De permeabiliteit is een materiaaleigenschap die beschrijft in welke mate een vaste stof een andere stof, zoals water, olie of gas, doorlaat.

Op Scanning Electron Microscope beelden is het verschil tussen een goed doorlatend en een slecht doorlatend gesteente waarneembaar (Figuur 8). Bij een lage porositeit en permeabiliteit zijn de open ruimtes schaars en niet met elkaar verbonden. De korrels zijn met elkaar verkit en minder goed te onderscheiden. Het aantal poriën is minder waardoor het watervolume minder is. Het water is ook ingesloten tussen de korrels en staat veel minder met elkaar in verbinding. De permeabiliteit van dit gesteente is dus lager.

Porositeit en permeabiliteit worden ook gecreëerd door natuurlijke barsten en scheuren in het gesteente. Deze barsten en scheuren zijn in het gesteente ontstaan op een moment na verstening, zodat het gesteente breekbaar was. Bij kalksteen komt daarnaast verkarsting voor. Verkarsting treedt op ten tijde van relatief lage zeespiegelstand, waarbij de kalksteen gedeeltelijk boven water ligt. Vervolgens ontstaan door oplossing van kalk permeabele zones in het kalksteen (Figuur 9). In beide situaties spreekt men over secundaire porositeit en permeabiliteit, omdat deze in een latere fase in de geologische geschiedenis zijn ontstaan.



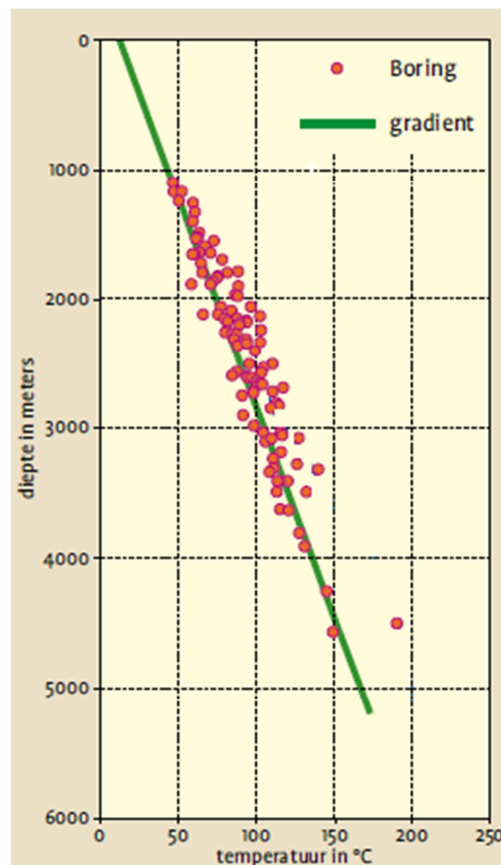
Figuur 8. Scanning Electron Microscope beelden van zandsteen. Boven een zandsteen met duidelijk zichtbare zandkorrels en met elkaar verbonden poriën (blauw). Onder een zandsteen waarvan de korrels verkit zijn en waarin veel minder en minder goed verbonden poriën aanwezig zijn (BRON).



Figuur 9. Weergave van verkarsting in de ondergrond. Wanneer kalksteen dicht aan het oppervlak ligt lost het gedeeltelijk op door zuur grondwater. Hierdoor ontstaan oplossingsholten in de kalk op plaatsen waar het water in de ondergrond kan infiltreren (Samengesteld uit figuren van web.viu.ca en isgs.uiuc.edu).

### *Voldoende hoge temperatuur*

Als gevolg van de uitstraling van warmte van de aardkern naar de aardkorst neemt de temperatuur met de diepte toe. In vaktermen spreekt men van een temperatuurgradiënt. Gemiddeld is de temperatuurgradiënt in Nederland 31 °C per kilometer, ofwel 0,031 °C per meter (Figuur 10). Afhankelijk van de geologische situatie en onderling verschil in thermische geleidbaarheid van aardlagen kan de gradiënt per regio verschillen. Hoe hoog de temperatuur moet zijn, hangt van de bovengrondse warmtevraag af. Het is mogelijk dat er geen laagpakket in de ondergrond aanwezig is met de gewenste temperatuur én dat aan de juiste randvoorwaarden voldoet.



Figuur 10. Temperatuurgradiënt op basis van gasboringen in Nederland (op basis van figuur Bosatlas, 2009).

### *Aaneengesloten laagpakket*

Een goede doorstroming binnen een reservoir is gebaat bij zo weinig mogelijk barrières. Dit houdt in dat zich tussen de productie- en injectieput geen breuken bevinden die waterstromingen in horizontale richting blokkeren. Breuken kunnen namelijk door klei en andere mineralen ondoorlatend worden. Bovendien kan een laagpakket zodanig langs een breuk verschoven zijn dat het niet meer aaneengesloten is (Figuur 11). Hierdoor kan een goed doorlatende laag tegenover een minder doorlatende laag zijn komen te liggen. Het aanboren van het reservoir aan weerszijden van de breuk heeft dan geen nut, omdat het laagpakket niet meer aaneengesloten is en water niet kan stromen.



Figuur 11. Een kleine breuk in Montana (foto: [en.wikipedia.org/wiki/Fault\\_\(geology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fault_(geology))). Deze breuken zijn talrijk óók in de Nederlandse ondergrond. Duidelijk zichtbaar is het verschuiven van aardlagen langs het breukvlak (schuifrichting aangegeven met pijlen), waardoor aardlagen niet meer doorlopen.

Een aquifer kan klein zijn en ingebed zijn in minder goed doorlatende afzettingen, waardoor de doorstroming beperkt wordt (Figuur 12). In Figuur 12 zijn drie verschillende zandige rivierbeddingen in een kleilig laagpakket zichtbaar. De drie rivierbeddingen staan niet met elkaar in verbinding in het ontsloten vlak. Loodrecht op deze gesteentewand zullen de zandlichamen wel doorlopen en elkaar mogelijk raken. Des te meer de zandlichamen met elkaar verbonden zijn (connectiviteit), des te groter is de netto grootte van het reservoir. Vaak zijn dit soort zandlichamen te klein zodat ze als gevolg van de resolutie van seismiek op grote diepte, met behulp van seismiek<sup>2</sup> moeilijk te karteren zijn. In theorie kan het voorkomen dat één van de twee putten van een doublet zich in een dergelijk smal aquifer bevindt, terwijl de ander in het slecht doorlatende materiaal is geboord. Daarom is dit type laagpakketten minder geschikt voor aardwarmtesystemen, omdat er een verhoogd risico is dat de doorstroming tussen de putten belemmerd wordt.

#### *Een laag dient homogeen zijn*

Het is belangrijk dat de samenstelling en eigenschappen van een laagpakket zoveel mogelijk gelijk zijn. De doorstroming kan sterk beperkt worden indien er tussen de putten minder goed doorlatende lagen in een pakket zitten. Daarnaast kunnen lateraal variërende eigenschappen van een laagpakket de doorstroming ook beperken.

<sup>2</sup> Een geofysische methode om een beeld te krijgen van de ondergrond met behulp van kunstmatig opgewekte seismische golven (zie voor meer uitleg paragraaf 12.1).



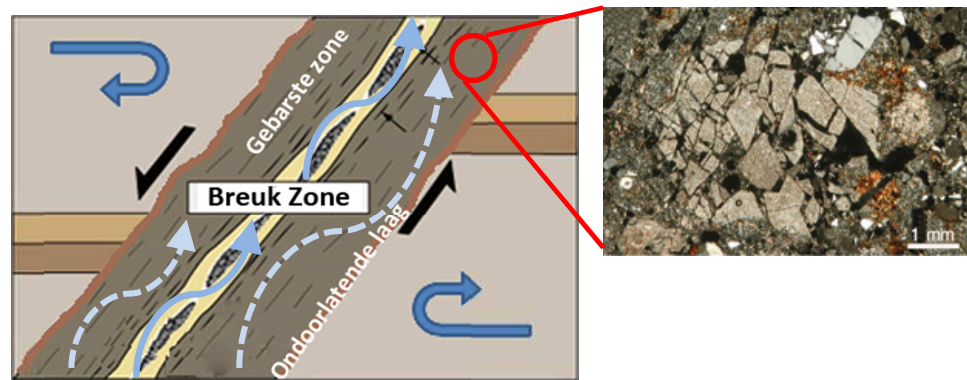
Figuur 12. In deze groeve zijn drie zandlichamen ingebed in een hoofdzakelijk kleiige afzetting. De zandlichamen zijn oude rivierbeddingen (gebaseerd op een foto van searchanddiscovery.com).

## 6.2 Breuken

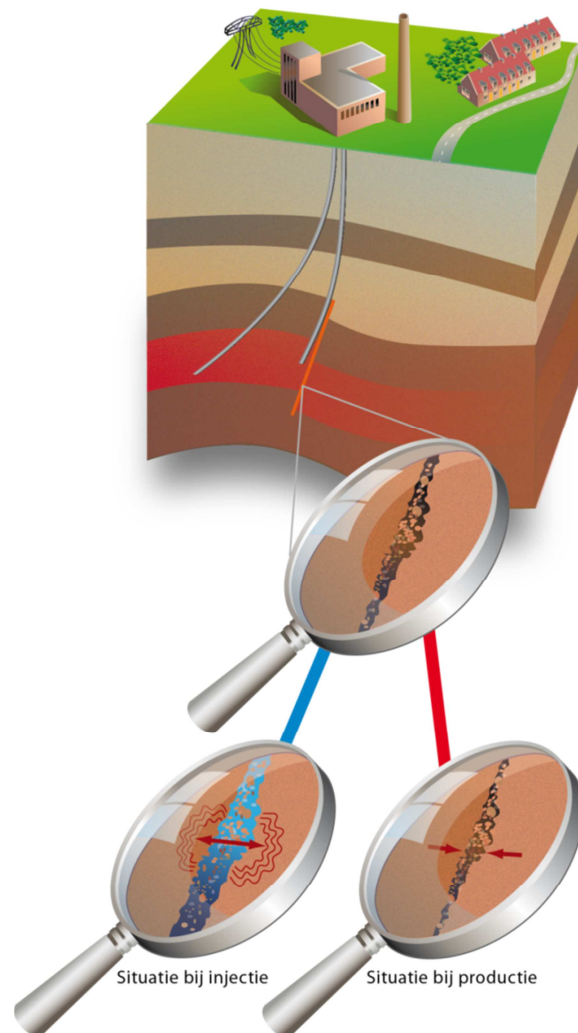
Een breuk is een vlakvormige discontinuïteit in een gesteente, waarlangs verplaatsing van de gesteentemassa's plaats vindt of heeft plaatsgevonden. Rondom een breuk kan, afhankelijk van het type gesteente een zone van barsten en spleten aanwezig zijn (Figuur 13). Zoals in paragraaf 6.1 is beschreven kunnen breuken een barrière zijn voor de doorstroming van water. Door beweging langs een breuk kan het gesteente namelijk vermalen worden en zo kan een ondoorlatende laag langs het breukvlak ontstaan (Figuur 13). Ook kan de beweging langs een breuk voor zoveel verschuiving zorgen, dat een doorlatend pakket tegen een ondoorlatend pakket komt te liggen (Figuur 11). De doorlatendheid van een breuk is het gevolg van een complexe samenloop van factoren, en is daarom moeilijk op voorhand te voorspellen. Als een eerste orde benadering kan wel gesteld worden dat actieve breuken over het algemeen een grotere kans hebben om doorlatend te zijn dan niet actieve breuken. Actief betekent op een geologische tijdschaal actief. De activiteit, of seismiciteit, kan worden geregistreerd en gevoeld aan het oppervlak.

Het onttrekken en injecteren van water in de buurt van breuken vraagt om extra aandacht en dus onderzoek, want het brengt risico's met zich mee. Weerstand langs het breukvlak zorgt ervoor dat beweging van de breuk wordt geremd. Een spanningsevenwicht buffert verdere beweging langs de breuk. Zodra via een injectieput water wordt geïnjecteerd in een breuk kan dit evenwicht verstoord worden (Figuur 14). Door waterinjectie in de breuk, neemt de waterdruk in de breuk toe en wordt de breuk iets uit elkaar gedrukt (microschaal). Dat verstoort het evenwicht, wat de kans op trillingen vergroot. Bij wateronttrekking uit de breuk kan het tegenoverstelde gebeuren en neemt de kans op trilling juist af (Figuur 14). Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is verantwoordelijk voor toezicht op de veiligheid bij o.a. booractiviteiten en ziet erop toe dat in dit soort situaties extra onderzoek en monitoring worden uitgevoerd.





Figuur 13. Schematische weergave van waterstroming door een breuk. Door verschuiving langs de breuk kan een ondoorlatende zone ontstaan, maar een gearbsten zone rondom de breuk kan toch doordlatend zijn en vloeistofstroming toelaten.



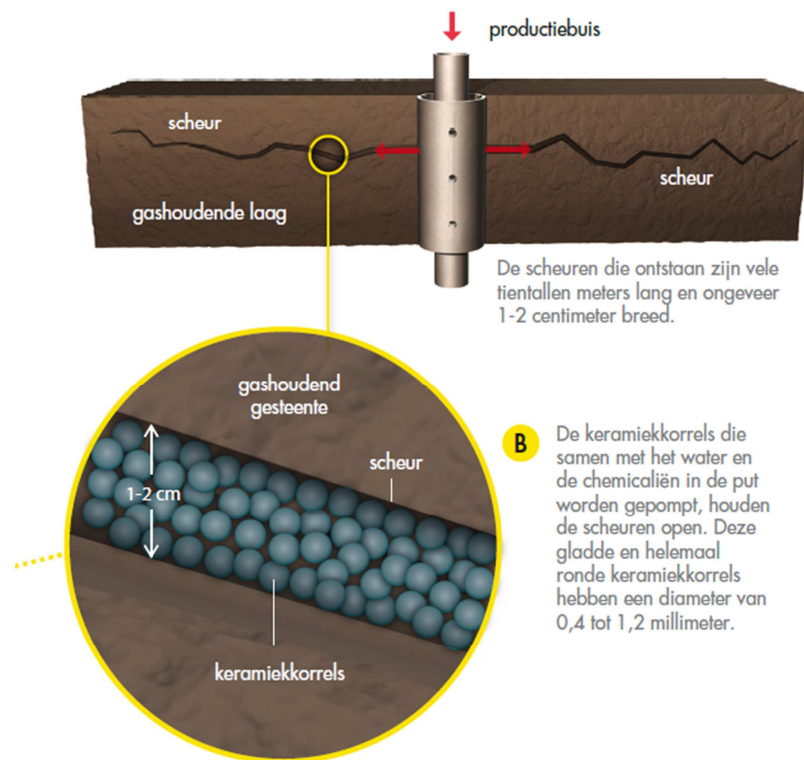
Figuur 14. Vereenvoudigde weergave van een situatie waarbij water wordt geïnjecteerd (vergrootglas linksonder) en geproduceerd uit een breukvlak. **Let op: weergave is niet op schaal.**

### 6.3 Reservoirstimulatie

Indien het gesteente van zichzelf niet doorlatend genoeg is, kan worden besloten om reservoirstimulatie toe te passen. Er zijn drie vormen van stimulatie te onderscheiden;

1. **Thermische stimulatie:** hierbij wordt koud water onder druk in zeer warm gesteente geïnjecteerd waardoor een scheurnetwerk ontstaat als gevolg van de plotselinge afkoeling. Hierdoor neemt de doorlatendheid toe. Deze techniek wordt o.a. bij EGS toegepast (zie Hoofdstuk 11).
2. **Chemische stimulatie:** door het oplossen van mineralen met chemische vloeistoffen, zoals bijvoorbeeld zuur, kunnen dichtgeslibde poriën en/of scheuren weer doorlatend gemaakt worden. Het voordeel van chemische stimulatie is dat er geen seismiciteit wordt veroorzaakt. Het slagen van een chemische stimulatie hangt af van hoe ver de vloeistof het gesteente inkomt vanaf het boorgat. Chemische stimulatie wordt voornamelijk toegepast om de doorlatendheid rondom een put te optimaliseren.
3. **Hydraulische stimulatie:** hierbij worden via het boorgat onder hoge druk barsten en scheuren in een gesteentelaag gecreëerd (Engels: fraccen). Er worden vloeistoffen met kleine korreltjes (b.v. zand of keramiek) geïnjecteerd die de scheuren open houden na het verlagen van de druk (Figuur 15). Via dit netwerk van scheuren en barsten kan water of gas toestromen naar het boorgat. Fraccen werkt overigens alleen goed indien het gesteente qua eigenschappen (samenstelling) geschikt is voor de vorming van scheuren en barsten (breekgedrag). Zandsteen en kalksteen bezitten doorgaans deze eigenschappen.

Fraccen is veilig mits het goed wordt uitgevoerd. De lengte van de scheuren als gevolg van fraccen is afhankelijk van factoren zoals gesteentetype, ondergronds spanningsveld en boorrichting. Over het algemeen zijn de aangebrachte scheuren verticaal. De lengte is variabel, maar bedraagt over het algemeen enkele honderden meters het gesteente in (loodrecht op het boorgat). De gesteentelaag waarin wordt gefract bevindt zich doorgaans op enkele kilometers diepte en de laag is vaak enkele tientallen meters dik. De driedubbele verbuizing in het bovenste traject van het boorgat en de afdichtingen in de put voorkomen dat vloeistoffen naar andere aquifers weglekken. In Nederland zijn in de afgelopen 40 jaar meer dan 200 boringen gefract waarbij tot nu toe geen problemen zijn opgetreden.



Figuur 15. Een schematische weergave van de techniek van fraccen (static.shell.com).

Afhankelijk van het type reservoirstimulatie is soms een groter boorterrein nodig dan bij standaard boringen, omdat trucks of tanks met injectievloeistoffen op het terrein moeten staan. De stimulatie zelf duurt in de regel slechts enkele dagen. In deze periode is er sprake van meer vrachtverkeer voor aan- en afvoer van vloeistoffen.

Reservoirstimulatie brengt extra kosten met zich mee. Daarom is een natuurlijk poreus gesteente het meest economisch rendabel. Bij reservoirstimulatie kunnen er kleine bevingen aan het maaiveld gevoeld worden. Om optimale fraccing resultaten te verkrijgen moet in veel gevallen de putconfiguratie aangepast worden (zie ook paragraaf 8.3). Dit is nodig omdat de boring loodrecht op het grootste spanningsveld georiënteerd moet worden. Dit komt niet altijd overeen met de optimale putconfiguratie om in de opsporingsvergunning te passen. Ook kan het nodig zijn dat de productie- en injectieput dicht bij elkaar geplaatst moeten worden. Soms is een extra injectieput nodig of wordt een deel van het puttraject horizontaal geboord voor een groter contactoppervlak tussen gesteente en put. Indien er vooraf indicaties zijn dat er een verhoogde kans bestaat op een slecht doorlatend laagpakket, dan zijn een goede planning en extra onderzoek naar de mogelijkheden van reservoirstimulatie nodig.

## 7 Vermogen van een aardwarmtesysteem

Het vermogen van een aardwarmtesysteem is sterk afhankelijk van de eigenschappen van de aquifer waaruit het warme water onttrokken wordt. De permeabiliteit, dikte en temperatuur van een laagpakket hebben een sterke invloed op het vermogen en dienen daarom zo nauwkeurig mogelijk bepaald te worden bij de ontwikkeling van een aardwarmtesysteem. Deze afhankelijkheid kan nader toegelicht worden door in meer detail te kijken naar de verscheidene parameters die van invloed zijn op het vermogen.

De hoeveelheid thermisch vermogen ( $E$ ) die met aardwarmte gegenereerd kan worden is het product van het debiet ( $Q$ ), de mate van uitkoeling ( $\Delta T$ ) en de warmtecapaciteit van het water ( $C_p$ ). In formulevorm:

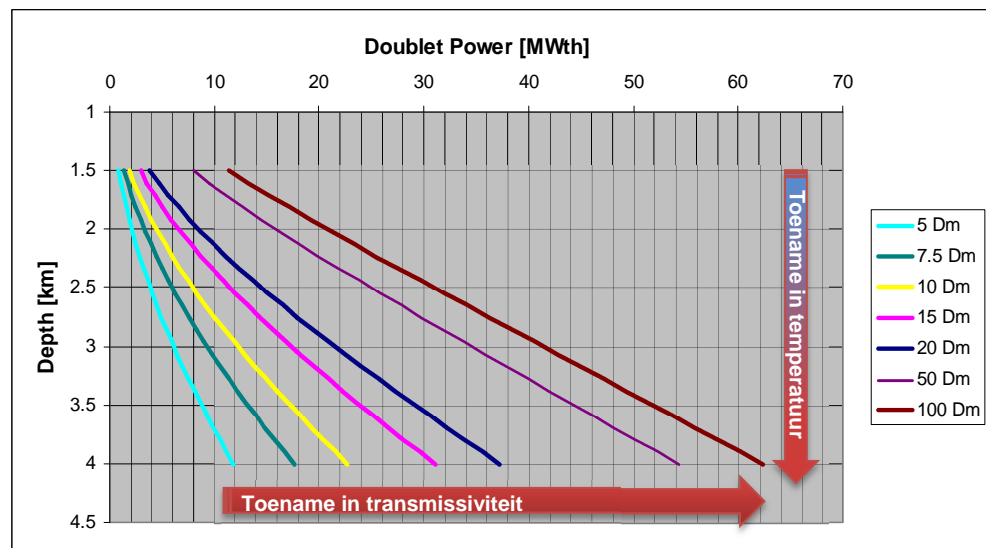
$$E = Q \times \Delta T \times C_p \quad (\text{vergelijking 1})$$

met  $E$  in  $W_{th}$ ,  $Q$  in  $m^3/s$ ,  $\Delta T$  in  $^{\circ}C$ ,  $C_p$  in  $J/m^3 \text{ } ^{\circ}C$ .

De mate van uitkoeling wordt bepaald door de temperatuur van het opgepompte water en de hoeveelheid warmte die bij de warmtewisselaar overgedragen wordt. Hoe groter het verschil tussen productie- en injectietemperatuur, des te groter de opbrengst aan warmte. De warmtecapaciteit van water ( $C_p$ ) heeft een constante waarde ( $1,2 \times 10^3 \text{ J/m}^3 \text{ } ^{\circ}C$ ). Het debiet ( $Q$ ) is de hoeveelheid water die per tijdseenheid uit de ondergrond opgepompt kan worden. Het debiet  $Q$  is verder uit te schrijven:

$$Q = \Delta P \frac{2\pi kH}{\mu \left( \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) - S \right)} \quad (\text{vergelijking 2})$$

Het debiet ( $Q$ ) is een functie van het drukverschil tussen de putten van het doublet ( $\Delta P$ ), viscositeit van het water ( $\mu$ ) en puteigenschappen ( $L$ ,  $r_w$  en  $S$ ). Deze parameters zijn min of meer constant (beperkte variaties) en hebben daardoor een relatief beperkte invloed op het debiet. Het product van permeabiliteit en dikte ( $k \times H$ ) heet transmissiviteit. Transmissiviteit wordt uitgedrukt in Darcy-meter ( $Dm$ ). De reservoir eigenschappen transmissiviteit en temperatuur zijn doorslaggevend voor het thermisch vermogen. Dit wordt duidelijk zodra de permeabiliteit ( $k$ ), diepte ( $H$ ) en vermogen ( $E$ ) in een grafiek worden weergegeven (Figuur 16).



Figuur 16. De invloed van transmissiviteit en diepte (of indirect de toename in temperatuur) op het thermisch vermogen.

Het vermogen neemt toe bij een toenemende diepte (Figuur 16). Het effect wordt echter nog sterker beïnvloed door een toename van de transmissiviteit. Op bijvoorbeeld 4 kilometer diepte neemt het vermogen met een factor 6 toe bij een 20x zo hoge transmissiviteit<sup>3</sup>.

Om voldoende water (100-250 m<sup>3</sup>/u) te kunnen produceren (en injecteren) zonder dat daarvoor te veel pompenergie nodig is, dient de transmissiviteit van het te exploiteren watervoerende laagpakket minstens 15 Dm te bedragen.

<sup>3</sup> Bij deze weergave zijn vaste waarden aangenomen voor de overige parameters, omdat hier minder variaties in zijn.

## 8 Putten en boringen

Er wordt onderscheid gemaakt tussen boringen en putten. Een boring is het gat dat in de ondergrond geboord wordt zonder enige afwerking. Een put bestaat uit een zogenaamde verbuizing (metalen pijp, casing in het Engels) die ingebed is in cement. Het cement wordt tussen de verbuizing en het gesteente gegoten, zodat de pijp vast ligt in de ondergrond. De verbuizing en het cement zorgen ervoor dat er geen uitwisseling van vloeistoffen tussen de put en de aardlagen kan plaatsvinden.

### 8.1 Boortoren

Aardwarmteboringen zijn vergelijkbaar met boringen voor olie- of gaswinning of zoutwinning. Afhankelijk van de diepte, kan met zwaardere of lichtere torens worden geboord. Het werkterrein is ca. 0,5 tot 1 ha groot en de toren heeft een hoogte van ca. 50 m (Figuur 17). Een aardwarmteboring neemt, afhankelijk van de totale diepte, enkele maanden in beslag.

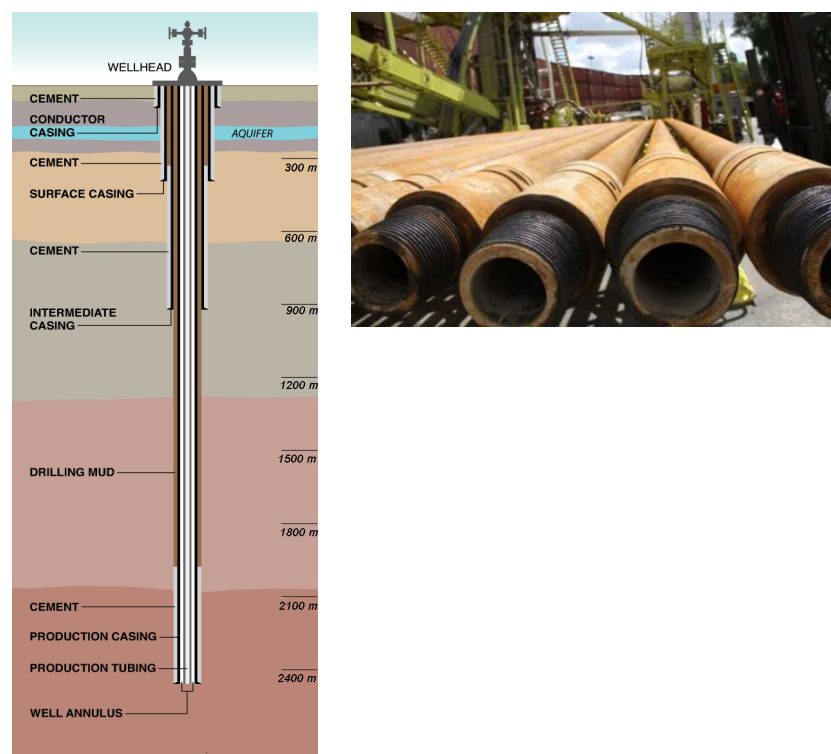
Het plaatsen van een boring is in Nederland aan regels gebonden. Er is een omgevingsvergunning nodig, er dient een BARM-melding gedaan te worden en er zijn verplichtingen volgend uit de mijnbouw- en Arbowetgeving. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) ziet toe op de milieu- en veiligheidstechnische aspecten van de boring, zoals de putintegriteit.



Figuur 17. Boortoren voor de aardwarmteboring in Honselersdijk.

## 8.2 Putconstructie

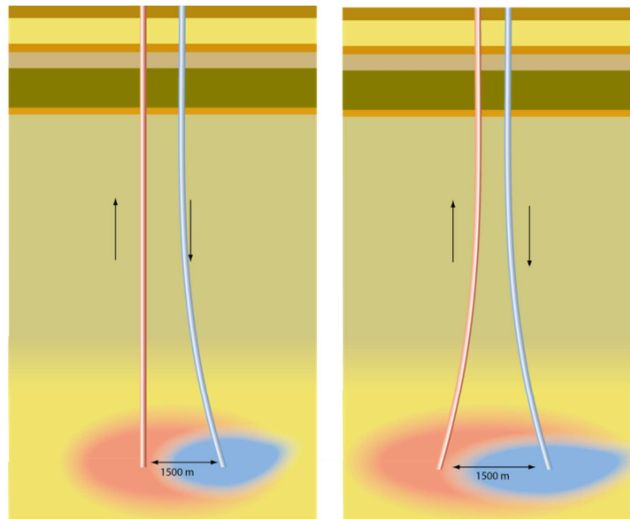
Aardwarmte maakt gebruik van de ruime ervaring in putconstructies die opgedaan is in de olie- en gasindustrie. Een boorgat is uit segmenten met een verschillende diameter opgebouwd. Met de diepte neemt de diameter per segment af (Figuur 18). Zodra een segment tot een bepaalde diepte is geboord wordt een stalen verbuizing aangebracht en de ruimte tussen de verbuizing en de ondergrond wordt opgevuld met cement (Figuur 18). Vervolgens wordt het volgende segment geboord. De diameter van de productie- en injectieput op het niveau van de aquifer is meestal 7 3/8 of 9 5/8 inch (17,8 cm en 24,5 cm). De constructie van de boorput voorkomt dat vloeistof en gas langs de buizen vanuit het watervoerende laagpakket omhoog kunnen komen en zich vermengen met bijvoorbeeld zoet grondwater in bovenliggende aardlagen.



Figuur 18. Links: een vereenvoudigde weergave van een put. Rechts: boorstangen van elk 10 m lang die gedurende het boren aan elkaar worden gekoppeld. De boorstangen zijn hol, zodat boorvloeistof (mud) naar beneden gespoten kan worden voor o.a. koeling en afvoer van boorgruis.

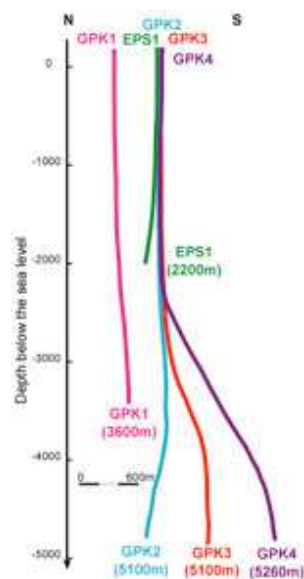
## 8.3 Putconfiguratie

Voor een aardwarmtesysteem worden twee gaten geboord naar hetzelfde watervoerende laagpakket. De productie- en injectieput delen dezelfde oppervlaktelocatie en liggen aan het oppervlak enkele meters van elkaar. Dit heeft als voordeel dat de boortoren niet veel verplaatst hoeft te worden en zo min mogelijk warmteverlies zal optreden, omdat de putten direct aangesloten kunnen worden aan de warmtewisselaar. Het werkterrein van de boortoren is ca. 0,5 - 1 ha groot.



Figuur 19. Gebruikelijke putconfiguraties voor aardwarmtewinning. De boven- en ondergrondse afstand zijn gelijk.

Het is technisch mogelijk om een boring te sturen en daarmee een boorgat met een hoek te boren (deviëren). Om een afstand tussen de uiteinden van de putten te realiseren zal minstens een van de boorgaten gedeviëerd geboord moeten worden. De afstand tussen de uiteinden van beide boorgaten bedraagt gemiddeld 1500 m (Figuur 19). De putconfiguratie is afhankelijk van de geologische situatie en men dient hiermee al rekening te houden bij de vergunningsaanvraag. Bij reservoirstimulatie en EGS kunnen de configuraties afwijken van de conventionele putconfiguraties. Zo zijn in Sultz-sous-Forêts twee gaten geboord met een onderlinge afstand van 450 m. De injectieput is ruwweg halverwege de diepte vertakt in drie gedeviëerde putten, zogenaamde sidetracks (Figuur 20). Ook kan het einde van een boorgat horizontaal geboord worden, opdat er een groter contactoppervlak ontstaat tussen de gecreëerde barsten en spleten rondom de put.



Figuur 20. Putconfiguratie bij de EGS-centrale in Sultz-sous-Forêts.



## 9 Hinder en risico's

### 9.1 Hinder

Een van de grote voordelen van aardwarmte is dat de impact op milieu en omgeving gering is. Bij andere vormen van duurzame energieopwekking wordt horizonvervuiling als hinderlijk ervaren. Bij traditionele aardwarmte is dit niet het geval en dit kan als bijkomend voordeel worden beschouwd.

Hinder is voornamelijk tijdelijk en zal vooral ondervonden worden tijdens het boren naar het reservoir, en gedurende de constructie van gebouwen en installaties. De mate van hinder is afhankelijk van de locatie. In een industriële omgeving buiten de bebouwde kom zal de hinder minder zijn dan midden in een stad of dorp. Daarbij kan gedacht worden aan:

- Aan- en afvoer van boortoren en materialen.
- Eventueel plaatselijke en tijdelijke milieuschade vanwege het bouwterrein.
- Geluidshinder tijdens de booractiviteiten, veroorzaakt door het verplaatsen van metalen pijpen, compressors en generatoren. Er kan ook hinder ondervonden worden van bouwlicht, omdat booractiviteiten doorgaans dag en nacht worden uitgevoerd. Vooral binnen de bebouwde kom kan dit als hinderlijk ervaren worden (zoals bij een aardwarmteproject midden in de stad Den Haag).
- Overlast tijdens het schieten van seismiek. Hiervoor worden òf dynamiet òf vibro-trucks gebruikt (Figuur 21) om geluidsgolven de ondergrond in te sturen en op te meten. Vooral trucks kunnen hinder opleveren omdat wegen tijdelijk afgesloten moeten worden.
- Bij elektriciteitsopwekking wordt een turbine aangedreven die geluidsoverlast kan veroorzaken. Geluidshinder kan door goede isolatie van de gebouwen tot een minimum beperkt worden.



Figuur 21. Met vibro-trucks worden via een plaat op de bodem drukgolven door de ondergrond gestuurd. Er zijn meerdere trucks nodig.

## 9.2 Risico's

Net als bij elk ander project zijn er ook bij aardwarmteprojecten risico's aanwezig. Deze zijn zowel van financiële als technische aard:

- Tegenvallende opbrengst aquifer

Gedegen geologisch onderzoek is erop gericht om het risico op tegenvallende aquifer-prestaties zoveel mogelijk te beperken. Vooraf kan nooit met zekerheid vastgesteld worden hoe een put in een aquifer zal presteren. Het grootste risico is hierbij een tegenvallende doorlatendheid en daardoor een laag debiet. De kosten voor het boren zijn dan al gemaakt waardoor de financiële schade in de miljoenen euro's kan lopen (boorkosten zijn ruwweg 1000-1500 euro per meter, afhankelijk van beschikbaarheid van boorplatformen, de economische situatie van het project e.d.).

Dit risico is verzekeraar via een particuliere verzekeraar of via de garantieregeling van het Ministerie van Economische Zaken. Meer informatie over de garantieregeling wordt gegeven in paragraaf 0.

Op lange termijn is het mogelijk dat een aquifer minder gaat presteren. Dit kan veroorzaakt worden door een onvoorziene blokkade (breuk) in het laagpakket die de connectiviteit tussen de putten beperkt of door dichtslibben van de poriënruimte, bijvoorbeeld door mineraalvorming. Door spoeling van de aquifer en/of put met oplosmiddelen kan de doorstroming weer op gang gebracht worden.

- Risico's tijdens het boren

Bij het boren kan een boorkop in de ondergrond vastlopen. Indien het boorgat niet meer te herstellen is wordt er een nieuw boorgat geboord, waarbij, indien mogelijk, een deel van het reeds geboorde boorgat wordt benut. Er wordt dan een zogenaamde sidetrack geboord.

Ook kan als gevolg van het indringen van boorvloeistof in de poriën de porositeit van een laagpakket gereduceerd worden. Hierdoor neemt ook de doorlatendheid van het laagpakket bij de putuitgang af. Er zijn technische oplossingen om dit probleem te verhelpen. In het uiterste geval is het boorgat echter verloren en dient (deels) opnieuw geboord te worden.

Voor beide situaties moeten er extra kosten gemaakt worden voor onder andere het langer gebruiken van boortoren en personeel. Wie het financiële risico hiervoor draagt wordt tijdens de contractbespreking bepaald. Bovenstaande risico's kunnen met een goed vooraf opgesteld boorplan zoveel mogelijk worden voorkomen.

- Olie- of gasbijvangst

In de hele Nederlandse ondergrond is de kans aanwezig dat olie en/of gas worden aangeboord. Er is daarom een reële kans op olie- of gasbijvangst bij het produceren van aardwarmte. Voor het oppompen van deze koolwaterstoffen gelden strengere veiligheidseisen, zowel tijdens de booractiviteiten als tijdens de winning van warm water.

Gasbijvangst lijkt een bijkomend voordeel, maar kan toch vervelend zijn als hier vooraf geen rekening mee gehouden is. Door gasbellen in het systeem kunnen pompen doorslaan en daardoor kapot gaan. Olie kan ervoor zorgen dat de kanalen in een warmtewisselaar dicht komen te zitten. De bijvangst moet gescheiden worden van het water om technische problemen aan de installaties te voorkomen. Dit brengt extra kosten met zich mee. Daar staat tegenover dat het gas verkocht kan worden mits er afnemers zijn en rendabele volumes olie of gas worden gewonnen.

- Bodemdaling

Bij de winning van aardwarmte is geen of nauwelijks bodemdaling te verwachten. Netto worden er geen stoffen onttrokken of geïnjecteerd waardoor er geen sprake is van volume/drukafname.

- Aardbevingen

De kans op aardbevingen bij traditionele aardwarmte is zeer gering. Er is geen sprake van significante drukverandering of veranderingen in de ondergrond die tot lokale spanningen kunnen leiden. Bij injectie van water in actieve breuken of bij reservoirstimulatie kunnen mogelijk wel bevingen optreden (zie paragraaf 6.2).

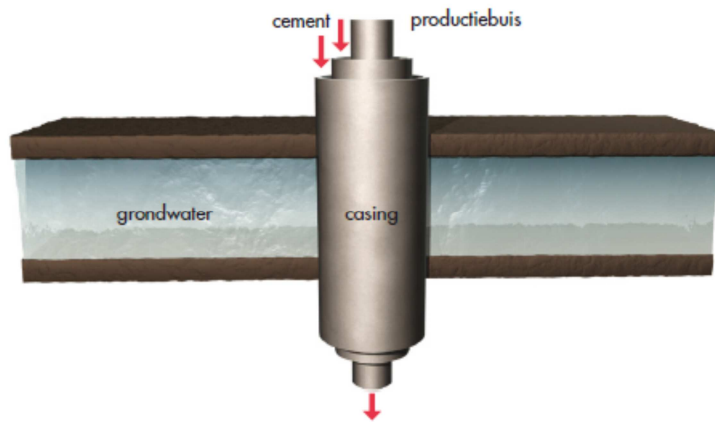
Bij EGS bestaat een kans op aardbevingen indien dit wordt uitgevoerd in een gebied met actieve breuken. De stimulatie zelf kan zeer lichte (niet voelbare) trillingen veroorzaken. Grotere bevingen kunnen wel optreden als door stimulatie de spanningstoestand bij de breuk verandert en daardoor bestaande (actieve) breuken gereactiveerd worden. In gebieden met natuurlijke aardbevingen, zoals Limburg, kan EGS in een ongunstig geval aardbevingen op tektonische breuken 'triggeren'. De magnitude van deze bevingen kan in principe hoger zijn dan de magnitudes van bevingen die tot nu toe zijn opgetreden bij gaswinning (tot magnitude ~3.5) in gebieden met lagere natuurlijke seismiteit, zoals Groningen. De magnitude en frequentie van bevingen hangt af van de natuurlijke spanningen die in de ondergrond en rond de breuk heersen. Met een zorgvuldige analyse kan de spanningsverandering op een breuk bepaald worden en kunnen randvoorwaarden voor stimulatie en putconfiguratie zodanig worden vastgesteld dat de kans op bevingen klein is.

### 9.3 Milieueffecten

Aardwarmtewinning heeft over het algemeen zeer beperkte gevolgen voor het milieu. Risico's worden goed afgedekt door wettelijke regelingen waaraan het boren en het produceren van aardwarmte moeten voldoen. Een aantal onderwerpen die daarbij een rol spelen zijn:

- Goed afsluiten van de doorboorde lagen en het afwerken van de put (verbuizing, cementering) opdat lekkage naar of aantasting van omliggende gesteentelagen wordt voorkomen (Figuur 22).
- Minimaliseren van emissies. Het gaat hierbij om bijvoorbeeld emissie van eventueel geproduceerde koolwaterstoffen.
- Nemen van maatregelen om activiteiten zo veilig mogelijk uit te voeren. Bijvoorbeeld maatregelen om spontane gasexplosies te voorkomen bij het

onverwacht aanboren van gas (blow-out) of monitoring van seismische activiteit. Staatstoezicht op de Mijnen houdt toezicht op de veiligheid rondom booractiviteiten.



Figuur 22. De constructie van de boorput zorgt voor een goede bescherming van de diverse bodemlagen. Staal en cement zorgen ervoor dat er geen contact is tussen de productie/injectiebuis en de bodemlagen. In de ondiepe grondlagen en bij het grondwater zijn extra beschermlagen aangebracht ([static.shell.com](http://static.shell.com)).

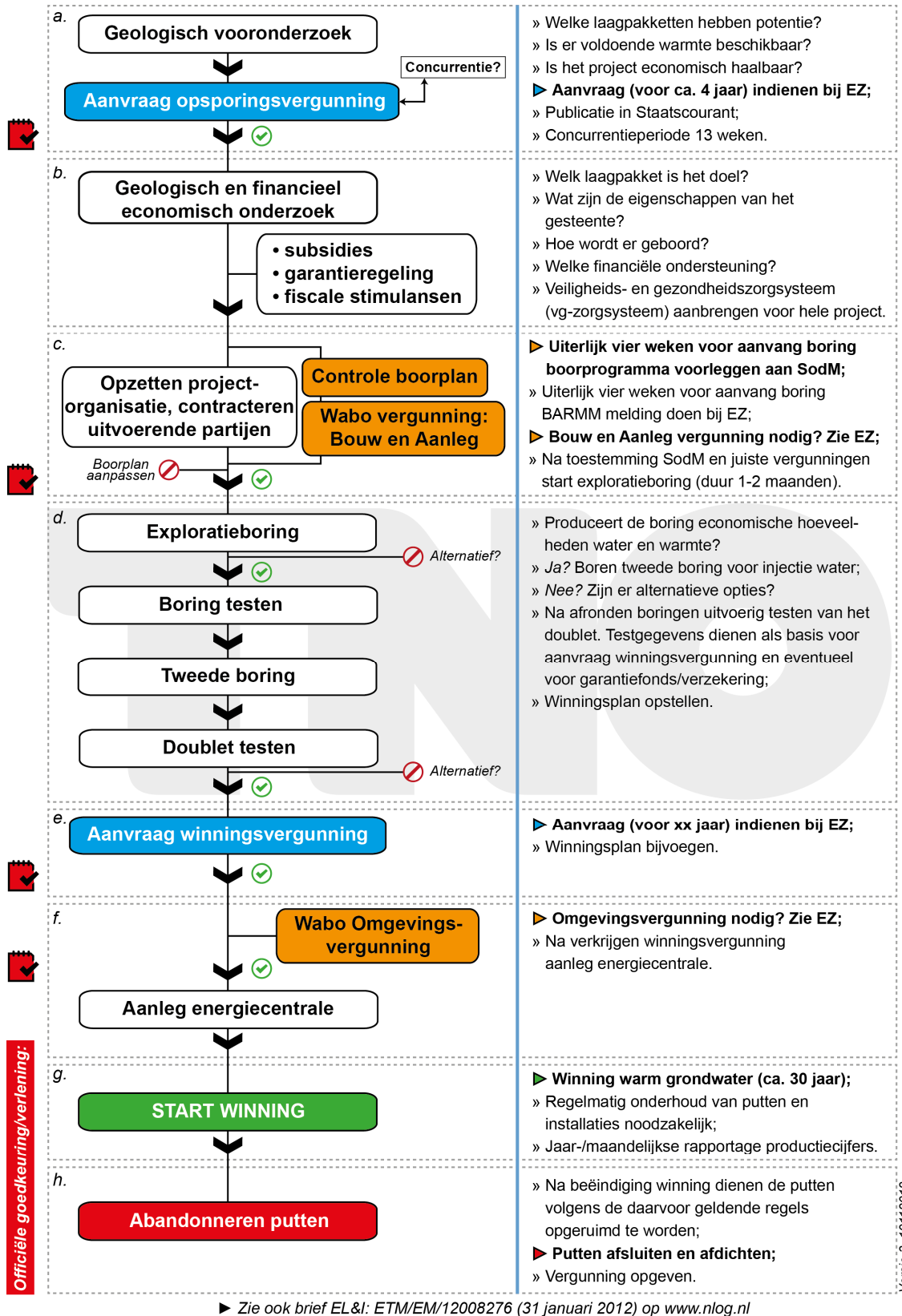
## 10 Van idee naar realisatie

Diepe aardwarmte is een aantrekkelijk alternatief om energie op een duurzame wijze te winnen. Tussen het idee om warmte uit de aarde te gebruiken als energiebron en de daadwerkelijke realisatie van warmtewinning liggen enkele jaren. Het realiseren van een aardwarmtesysteem vereist een gedegen geologisch onderzoek. Dit onderzoek is nodig om aan te tonen dat er op een specifieke locatie een geschikt watervoerend pakket in de ondergrond aanwezig is dat het gewenste vermogen kan leveren en de grote investering rechtvaardigt.

De geologische zoektocht naar een geschikt watervoerend pakket omvat verschillende aspecten en de uitkomst zorgt slechts voor een beperking van de onzekerheid over de geologische situatie in de ondergrond. Een garantie op het aantreffen van een geschikte laag kan nooit worden gegeven. De mate van zekerheid over de geologische situatie hangt af van de hoeveelheid beschikbare gegevens en de kwaliteit en betrouwbaarheid daarvan. Zekerheid over de aanwezigheid en geschiktheid van een laagpakket wordt verkregen door het boren van een gat naar een diepte van enkele kilometers.

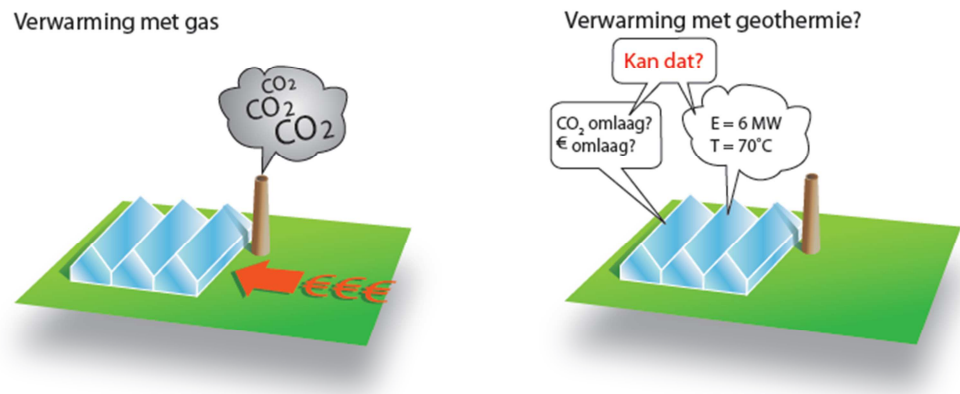
Het maken van boorgaten is de grootste kostenpost bij een aardwarmteproject. Voor een financieel gezond en succesvol project is het daarom belangrijk om geologische onzekerheden zoveel mogelijk te beperken. Een beperking van de technische risico's tijdens het boren draagt hier eveneens aan bij. Het geologisch onderzoek is er dus vooral op gericht om de kans op een succesvol aardwarmtesysteem te vergroten en de technische en financiële risico's te beperken.

Voor het hele traject van idee naar realisatie is een aantal vergunningen vereist. De opsporing en winning van aardwarmte dieper dan 500 m vallen onder de Mijnbouwwet waarbij het Ministerie van Economische Zaken het bevoegd gezag is en de vergunningen verleent. Ook zijn er milieu- en veiligheidsvergunningen nodig van gemeente en/of provincie. De vergunningen en de stappen tussen idee en realisatie van een aardwarmteproject worden hierna nader toegelicht en in Figuur 23 samengevat.



Figuur 23. Samenvattend overzicht van de verschillende fasen die in een aardwarmteproject doorlopen worden. EZ = Ministerie van Economische Zaken.

## 10.1 Wat is het gewenste geothermisch vermogen?



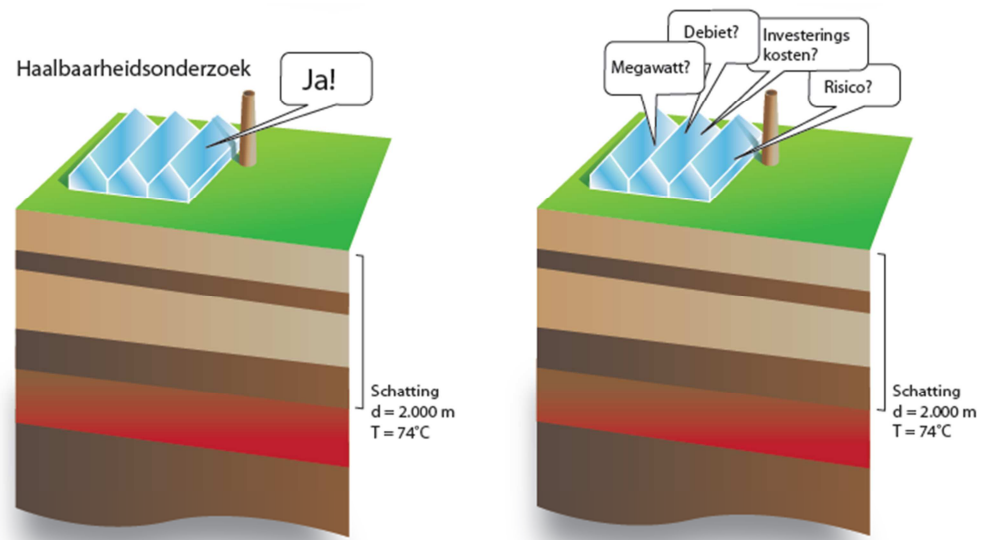
Figuur 24. De eerste stap op weg naar een aardwarmteproject is het verkennend onderzoek. Er wordt gekeken welke eisen er aan het systeem gesteld worden en of de ondergrond onder de projectlocatie de benodigde doorlatende laagpakketten bevat.

De eigenaar van een met aardgas verwarmd kassencomplex kan er voor kiezen om de hoge inkoopkosten van gas te reduceren door aardwarmte te gaan gebruiken (Figuur 24). Daarnaast kunnen gemeentes en provincies doelstellingen gesteld hebben die erop gericht zijn nieuwe kassengebieden of woonwijken te ontwikkelen met een zo laag mogelijke CO<sub>2</sub>-uitstoot.

In beide situaties staat de vraag centraal of er in de ondergrond watervoerende laagpakketten zijn, die een gewenst vermogen kunnen leveren. Voordat een geologisch onderzoek wordt gestart, is het van belang om de bovengrondse warmtevraag (vermogen) te kennen. Als de bovengrondse wensen bekend zijn kan gericht gezocht worden naar potentieel geschikte laagpakketten.

In de meeste gevallen dient een verkennend geologisch onderzoek (quickscan) uitgevoerd te worden om na te gaan of zich geschikte lagen onder de projectlocatie bevinden. Hiervoor kan een geologisch adviesbureau ingeschakeld worden of men kan [www.thermogis.nl](http://www.thermogis.nl) raadplegen waar het regionaal aardwarmtepotentieel in Nederland in kaart is gebracht.

## 10.2 Haalbaarheidsonderzoek



Figuur 25. Het haalbaarheidsonderzoek omvat een geologisch onderzoek om het meest geschikte laagpakket en de eigenschappen daarvan te bepalen. Ook wordt hierbij gekeken naar de economische haalbaarheid. Bij goede verwachtingen wordt een opsporingsvergunning aangevraagd.

Zodra de eisen aan het aardwarmtesysteem duidelijk zijn, kunnen er randvoorwaarden opgesteld worden waaraan de laagpakketten minimaal moeten voldoen, zoals benodigde minimumtemperatuur, gewenst vermogen en debiet. Het haalbaarheidsonderzoek is erop gericht om de ondergrond op de projectlocatie te analyseren (Figuur 25). Bij het onderzoek wordt op regionale schaal gekeken of er geschikte lagen in de ondergrond aanwezig zijn die aan de gewenste warmtevraag zouden kunnen voldoen. De laag moet water bevatten dat warm genoeg is ( $>40^{\circ}\text{C}$ ) en het water moet gemakkelijk uit de laag te halen zijn (goede doorlatendheid). Bij het haalbaarheidsonderzoek hoort ook een economische analyse. Daarbij wordt een ruwe inschatting gemaakt van de investeringskosten, zoals boorkosten en bovengrondse installaties op basis van het vermogen dat men verwacht te kunnen produceren met aardwarmte.

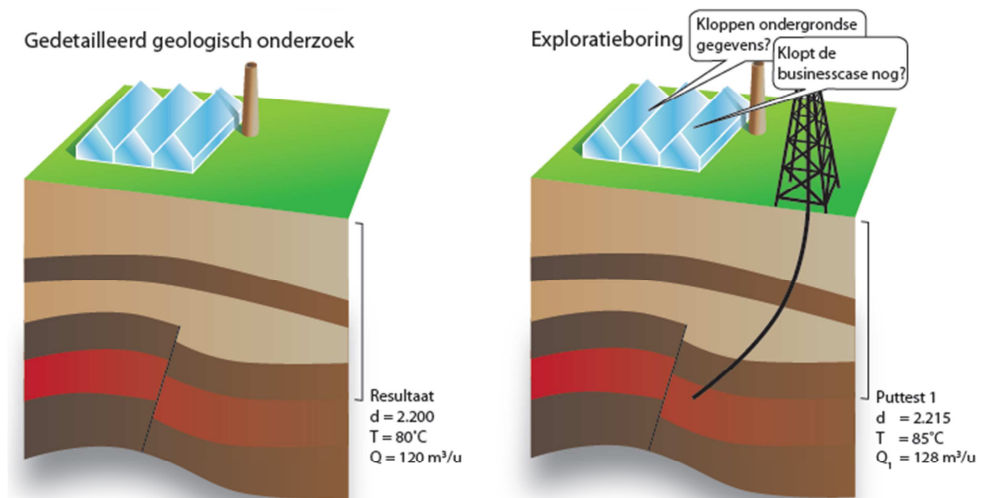
Tijdens het onderzoek kan ook gekeken worden naar kennisleemtes, waarna extra onderzoeksvragen opgesteld kunnen worden. Zijn er bijvoorbeeld additionele investeringen nodig in nieuwe seismiek of is de publiek beschikbare seismiek al voldoende? Zijn er op voorhand al risico's te identificeren, zoals het voorkomen van olie en gas of het risico op bevingen en vergt dit dus additioneel onderzoek?

Als de verwachtingen positief zijn, kan een opsporingsvergunning aangevraagd worden, met een gemiddelde geldigheid van vier jaar (Figuur 23a). Hierbij wordt een gebied als opsporingsgebied aangevraagd en ingediend bij EZ. De aanvraag wordt gedurende 13 weken gepubliceerd in de Staatscourant, andere partijen kunnen dan een concurrerende aanvraag indienen. Hierna wordt de aanvraag behandeld door SodM voor de technische- en veiligheidsaspecten en door de Advies Groep Economische Zaken van TNO (TNO-AGE). Op basis van de adviezen van beide partijen en de adviezen van de Mijnraad en de betreffende



provincie, neemt EZ een besluit over de aanvraag. Een opsporingsvergunning aardwarmte geeft de aanvrager het recht om exploratieboringen te plaatsen binnen het verleende vergunningsgebied. De aanvrager dient vooraf aan te geven hoeveel exploratieboringen gepland zijn en wanneer.

### 10.3 Gedetailleerde studie en exploratieboring



Figuur 26. Nadat de opsporingsvergunning is verleend, wordt geologisch, financieel en economisch onderzoek uitgevoerd. Indien de uitkomsten positief zijn kan vervolgens een exploratieboring gezet worden.

Gedetailleerd geologisch onderzoek kan al worden uitgevoerd voordat de opsporingsvergunning verleend is. Er bestaat dan echter wel het risico dat de vergunning aan een concurrerende partij in hetzelfde gebied verleend wordt. Daarom start het gedetailleerd geologisch onderzoek doorgaans wanneer de opsporingsvergunning verleend is (Figuur 26). In deze fase wordt bepaald welk laagpakket de meeste potentie heeft voor aardwarmtewinning (Figuur 23b). Hiervoor worden openbaar beschikbare gegevens gebruikt die over het algemeen voor olie- en gaswinning zijn verzameld; het gaat hierbij vooral om boringen en seismiek die via [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl) verkregen kunnen worden. Naast een gedetailleerde behandeling van de geologie wordt onderzocht wat de beste putconfiguratie is van het doublet. Ook een financieel economisch onderzoek naar de haalbaarheid van het project hoort in deze fase uitgevoerd te worden, waarin eventuele subsidies, fiscale stimulansen en de garantieregeling worden meegenomen.

De garantieregeling van de overheid is opgezet om het risico van misboring te verzekeren. De officiële benaming van de regeling is SEI (Subsidieregeling Energie en Innovatie) Risico's dekken voor aardwarmte. De regeling heeft als doel het grotendeels afdekken van het geologisch risico. Deze regeling is bedoeld voor mensen die gevorderde plannen hebben voor het uitvoeren van een aardwarmteproject en minimaal 2 MW aan energie willen produceren. Meer informatie over deze regeling: [www.agentschapnl.nl/nieuws/regeling-sei-ricos-dekken-voor-aardwarmte-start-1-oktober](http://www.agentschapnl.nl/nieuws/regeling-sei-ricos-dekken-voor-aardwarmte-start-1-oktober).

Het doel van het onderzoek is om de geologie op de beoogde locatie gedetailleerd in kaart te brengen en de eigenschappen van het laagpakket zo nauwkeurig mogelijk in te schatten. Het onderzoek bestaat over het algemeen uit meerdere deelonderzoeken, waarbij de ondergrond in steeds meer detail wordt uitgewerkt. De opzet van een gedetailleerd onderzoek verschilt per locatie en is onder andere afhankelijk van de beschikbare gegevens en geologische omstandigheden. Het is

mogelijk dat tijdens het onderzoek nieuwe onderzoeksvragen ontstaan die voor een succesvolle realisatie beantwoord moeten worden.

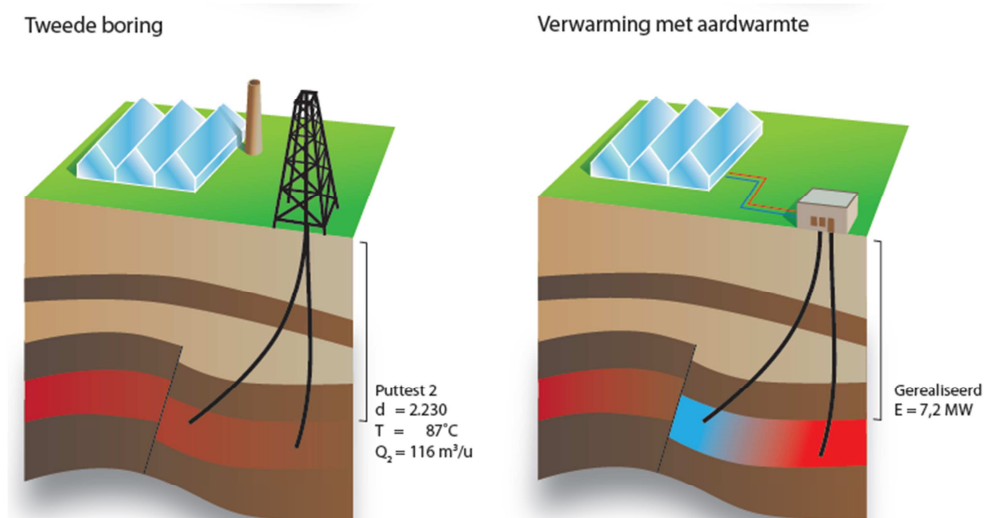
Een gedetailleerd onderzoek bestaat over het algemeen uit de volgende onderdelen:

1. **Karteren van laagpakket en breuken:** bepalen van exacte diepte, dikte en continuïteit van het laagpakket.
2. **Petrofysische analyse:** op basis van beschikbare putmetingen in de omgeving de laagpakkeiteigenschappen zoals porositeit, permeabiliteit, temperatuur en debiet bepalen.
3. **Onzekerheidsanalyse:** onzekerheden bepalen van de interpretaties. Hoe groot is de kans dat de berekende waarden daadwerkelijk op de plek worden aangetroffen? Binnen welke bandbreedtes vallen de berekende waarden?
4. **Risicoanalyse:** bestaat er kans op bevingen door geothermische activiteit? Zijn er actieve breuken in de omgeving? Is er kans op bijvangst van olie en/of gas?
5. **Putconfiguratie:** bepalen van optimale plek voor de productie- en injectieput.
6. **Economische haalbaarheidsanalyse:** investeringskosten bepalen aan de hand van geologische resultaten. Zijn er additionele investeringskosten te verwachten, zoals een scheidingsinstallatie bij bijvangst van olie of gas? Wat zijn de opbrengsten? Terugverdiensijd?

Zodra duidelijk is dat het project doorgang kan vinden, moet een projectorganisatie opgezet worden en moeten de uitvoerende partijen gecontracteerd worden (Figuur 23c). Voordat geboord kan worden, moet het boorplan uiterlijk vier weken voor aanvang van de boring aan SodM worden voorgelegd. Conform het Besluit Algemene Regels Milieu Mijnbouw (BARMM) dient uiterlijk vier weken voorafgaande aan de boring ook een melding aan het Ministerie van Economische Zaken gedaan te worden. Hierin wordt omschreven en onderbouwd, hoe tijdens de boor- en testfase aan de milieuregels zal worden voldaan ten aanzien van bodem, lucht, licht, geluid en externe veiligheid. Verder moet door de aardwarmte exploitant tijdig bij het Ministerie van Economische Zaken een Wabo vergunning voor Bouw en Aanleg aangevraagd en toegekend worden.

De eerste boring (exploratieboring; Figuur 23d) is meestal de productieboring, hoewel dit afhankelijk van de geologische omstandigheden later nog veranderd kan worden. Deze eerste boring is cruciaal voor het project, want deze geeft informatie over de aanwezigheid, dikte en eigenschappen van het laagpakket. Met behulp van een puttest wordt gekeken of de benodigde hoeveelheid warmte geproduceerd kan worden. Mogelijk moeten de verwachtingen bijgesteld worden door minder of meer vermogen dan verwacht als gevolg van slechtere of betere prestaties. In uitzonderlijke gevallen kan een boring als mislukt beschouwd worden. Bij tegenvallende resultaten kan nog nagegaan worden of het mogelijk is de eigenschappen van een laagpakket te verbeteren door toepassing van bijvoorbeeld reservoirstimulatie.

## 10.4 Tweede boring en realisatie



Figuur 27. Nadat de eerste put van het aardwarmtedoublet succesvol is gebleken, wordt de tweede put geboord en wordt het doublet getest. Na aanvraag en verlening van de winningsvergunning kan de aardwarmtewinning van start gaan.

Indien na de eerste putttests blijkt dat voldoende water opgepompt kan worden (ca. 100-150 m<sup>3</sup>/uur), wordt besloten het tweede boorgat te boren. Bij aardwarmte exploratie boort men de tweede put direct nadat de exploratieboring is afgerond. De tweede boring dient dan wel in de aanvraag opsporingsvergunning aangegeven te zijn. Na afronding van de tweede boring wordt het doublet uitvoerig getest. De testgegevens dienen als basis voor de aanvraag van een winningsvergunning en indien aangevraagd ook voor het garantiefonds of de verzekering voor tegenvallende resultaten.

Wanneer beide putten gerealiseerd zijn wordt het doublet aangesloten op bovengrondse warmtewisselaars en wordt het secundaire systeem geïnstalleerd (Hoofdstuk 5). Voordat men aardwarmte kan gaan winnen dient echter een winningsvergunning aangevraagd te worden bij het Ministerie van Economische Zaken. Belangrijk voor verlening van een winningsvergunning is dat bij productie geen water van buiten de vergunning wordt gewonnen of geïnjecteerd. Indien hier wel kans op bestaat gedurende de levensloop van het doublet, moeten vooraf *unitisatie* afspraken met de burens gemaakt en gepresenteerd worden. Indien geen naastliggende vergunningen bestaan kan met een spontane winningsvergunning de winningsvergunning uitgebreid worden, zodat binnen de vergunning geproduceerd wordt. Ook moet de in het winningsplan uiteen gezette methodologie (pompdruk, debiet e.d.) aan de door SodM gestelde eisen voldoen.

Als de winningsvergunning is verleend, dient bij EZ een Wabo Omgevingsvergunning aangevraagd te worden, waarna een energiecentrale voor het verwerken van de aardwarmte gebouwd kan worden (Figuur 23f). Hierna kan de winning van aardwarmte op gang komen (Figuur 23g). Gedurende de winning dient regelmatig onderhoud plaats te vinden om productie en veiligheid op peil te houden. Ook is een jaarlijkse of maandelijks rapportage van de productiecijfers

aan de overheid vereist (details hierover worden momenteel uitgewerkt). Op het moment dat de productieput het geïnjecteerde koelere water begint te produceren, is er sprake van doorbraak. Het doublet kan dan geabandonneerd worden (Figuur 23h). De putten moeten dan volgens de daarvoor geldende regels opgeruimd worden, waarna de vergunning opgegeven kan worden.

# 11 Toekomstige ontwikkelingen

## 11.1 Ultra-diepe geothermie (EGS)

### 11.1.1 *Het principe van EGS*

In landen als IJsland, Indonesië en Nieuw-Zeeland wordt op grote schaal elektriciteit opgewekt met aardwarmte. In deze geologische regio's zijn zeer hoge temperaturen (200°C) relatief dicht aan het aardoppervlak (1000 m) aanwezig. In Nederland zijn deze temperaturen pas op grote diepte beschikbaar en daarom spreekt men over 'ultra'-diepe geothermie.

Met 'ultra'-diepe geothermie wordt bedoeld op Enhanced (of Engineered) Geothermal Systems (EGS). EGS is een nieuwe technische ontwikkeling in de aardwarmte die zich nog in een R&D fase bevindt. In Europa zijn een aantal proeflocaties opgestart in onder andere Basel, Soultz-sous-Forêts en Landau.

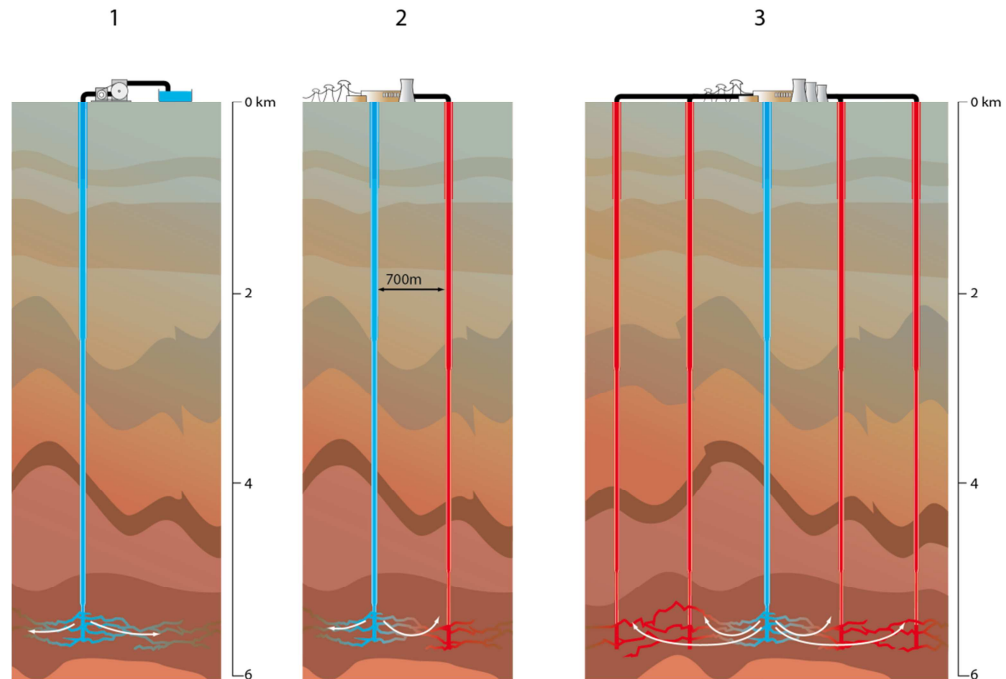
'Ultra'-diep gesteente heeft door de hoge druk van bovenliggend gesteente zijn doorlatendheid verloren. Bij EGS wordt daarom reservoirstimulatie toegepast door koud water te injecteren in een heet gesteente. Door het temperatuurverschil en de hoge injectiedruk splijt het gesteente en ontstaat er een netwerk van barsten en scheuren (Figuur 28-1). Zodra er een netwerk gecreëerd is, wordt een productieput geboord voor het oppompen van warm water (Figuur 28-2). Het netwerk van barsten en scheuren blijft in stand door de injectie van koud water en de productie van warm water. Het vermogen van een centrale kan verder worden uitgebreid door meer putten te boren.

EGS verschilt van de traditionele aardwarmte die tot nu toe beschreven is, omdat bij EGS bovengronds koel water wordt verwarmd door het gesteente waar stroompaden in gecreëerd zijn. Er wordt geen warm water dat in een laagpakket opgeslagen lag, opgepompt zoals bij traditionele aardwarmte. Bij EGS wordt als het ware een soort ondergrondse warmtewisselaar ontwikkeld.

Er worden geen strikte eisen gesteld aan gesteente voor EGS en daardoor is EGS overal toepasbaar. Toch zijn kalksteen en zandsteen beter geschikt omdat deze makkelijker en controleerbaarder splijten. Omdat de kosten voor boren naar grote dieptes hoog zijn wordt bij EGS vooral gebruikt in regio's met een verhoogde lokale temperatuurgradiënt, opdat er minder diep geboord hoeft te worden om gesteente met hoge temperaturen te gebruiken.

### 11.1.2 *Uitdagingen EGS*

Elektriciteit opwekken met aardwarmte wordt meer dan 50 jaar toegepast. Er is dan ook ruime kennis opgedaan in bovengrondse technieken. Doorontwikkeling van deze installaties zal tot steeds meer efficiëntie en rendement leiden. De grootste uitdagingen in EGS zijn dan ook het reduceren van de kosten en het beperken van de geologische risico's. Het zijn vooral boortechnische en geologische drempels die genomen moeten worden om EGS succesvol te maken.



Figuur 28. Schematische weergave van een ontwikkeling van een EGS-centrale. 1) onder hoge druk wordt water geïnjecteerd in een gesteentelaag. Onder de druk gaat dit splijten; 2) in de gecreëerde splijtzone wordt een productieput geplaatst. De stroming van koud water houdt de spleten open; 3) de centrale wordt verder uitgebreid met meerdere putten om meer vermogen en dus elektriciteit te genereren.

EGS is sterk afhankelijk van nieuwe ontwikkelingen in boortechneken. De huidige boortechneken zijn vooral toegespitst op olie- en gas exploratie, maar deze voldoen niet altijd aan de specifieke eisen die door EGS worden gesteld. De hoge temperaturen verhogen de kans op boorcomplicaties, mechanische stringen, verlies van telemetrie (zoals elektronische metingen tijdens het boren voor onder andere het aansturen van de boorkop, temperatuurmetingen etc.) en problemen met de verbuizing. Daar komt bij dat er door veel harder gesteente geboord moet worden. Dit brengt extra complicaties met zich mee. Op dit moment wordt er onderzoek gedaan naar meer geavanceerde boortechneken. Omdat de huidige meettechnieken voor grote dieptes niet altijd toereikend zijn, wordt het in kaart brengen van de ondergrond bemoeilijkt. Bovendien worden de natuurlijke aardwarmtebronnen nog niet goed begrepen.

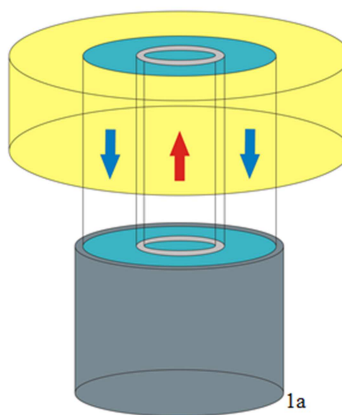
Door bovengenoemde oorzaken zijn de risico's tijdens de exploratiefase nog hoog. De kosten voor het boren naar dieptes van meer dan 4 km zijn hoog en daar komt bij dat boringen nog vaak mislukken door de hoge temperaturen en grote onzekerheden in reservoirgeologie.

Er zijn op dit moment nog weinig demonstratiestudies naar EGS, waardoor de technische en economische haalbaarheid van EGS nog niet goed is te toetsen. Dit wordt als een van de voornaamste redenen gezien voor de trage ontwikkeling van EGS, ondanks haar hoge potentieel ([c2es.org/technology/factsheet/EGS](https://c2es.org/technology/factsheet/EGS)).

## 11.2 Monobronnen

Monobronnen kunnen alleen toegepast worden bij kleinere systemen, met een waterverplaatsingscapaciteit van maximaal 30 tot 50 m<sup>3</sup> water per uur. (agentschapnl.nl/onderwerp/wat-wko).

In Duitsland is getracht om met een enkele boring aardwarmte te benutten. De monobron of aardwarmtesonde is een gesloten systeem dat bestaat uit een 2000 tot 3000 m diepe boring, waarin een vloeistof circuleert. In de regel stopt men hierbij de vloeistof in een coaxiale buis: in een dunne binnenbuis stroomt de koude vloeistof naar beneden, in de grotere buitenbuis komt de verwarmde vloeistof weer omhoog. Er zijn ook systemen waarin de vloeistofstroom omgekeerd is (Figuur 29). Dergelijke warmtesonden hebben tegenover open systemen het voordeel dat er geen contact met het grondwater bestaat, waardoor ze op iedere locatie mogelijk zijn.



Figuur 29. Schematische weergave van het principe van een monobron.

Het vermogen hangt naast de technische parameters af van de temperatuur van het gesteente en haar geleidingsvermogen. Het systeem kan slechts enkele honderden kilowatt bedragen en levert dus significant minder vermogen op dan een open aardwarmtesysteem. Dit komt doordat het warmtewisselingsoppervlak met het steenmassief slechts beperkt is tot het oppervlak van de putwand.

Naast watercirculatie in de aardwarmtesonde wordt ook geëxperimenteerd met zogenaamde directe verdamperen (*warmtebuizen*). Als werkzame stof wordt dan een vloeistof gebruikt met een voldoende laag kookpunt. Op die manier kan een hoger opnamevermogen worden bereikt. Het principe is vergelijkbaar met bovengrondse warmtewisselaars die bij ORC of Kalina installaties worden gebruikt (zie paragraaf 5.2). Een warmtebuis is dus in principe een ondergrondse warmtewisselaar waarbij de warmteoverdracht niet via opgepompt warm water plaatsvindt maar direct tussen het gesteente en de put.

Het probleem bij monobronnen ligt onder andere bij de isolatie tussen productie- en injectiebuis. Bij een monobron liggen deze tegen elkaar aan waardoor warmteoverdracht plaatsvindt. Hierdoor wordt het rendement van een put sterk verlaagd (TNO, 2007).



De Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) heeft in Hannover voor haar Genesys-project een monobron ontwikkeld voor diepe aardwarmte. Sinds december 2011 is dit project gestopt, doordat de put onbruikbaar is geworden nadat men het reservoir heeft willen fraccen ([genesys-hannover.de](http://genesys-hannover.de)).

De universiteit van Aken heeft eveneens een aardwarmtesonde ontwikkeld voor haar campus met als doelstelling dit systeem verder te ontwikkelen. Hierbij is echter niet geboord naar een permeabel gesteente en is ook geen reservoirstimulatie toegepast. In plaats daarvan is een monobron ontwikkeld waarbij de warmte van het gesteente wordt overgedragen aan vloeistoffen die in het gesloten systeem van de put circuleren. Dit project is in 2011 gestopt, omdat het systeem niet optimaal werkte. Dit was mede het gevolg van het feit dat de boring is vastgelopen op 2000 m en niet de gewenste diepte van 2500 m heeft gehaald. Hierdoor werd de gewenste temperatuur en dus het vermogen, niet gehaald. Voorlopig blijft de monobron nog in een experimentele fase en het zal dus nog niet inzetbaar zijn in gebieden waar voor open aardwarmtesystemen geschikte aardlagen afwezig zijn.

## 12 Gegevens van de ondergrond

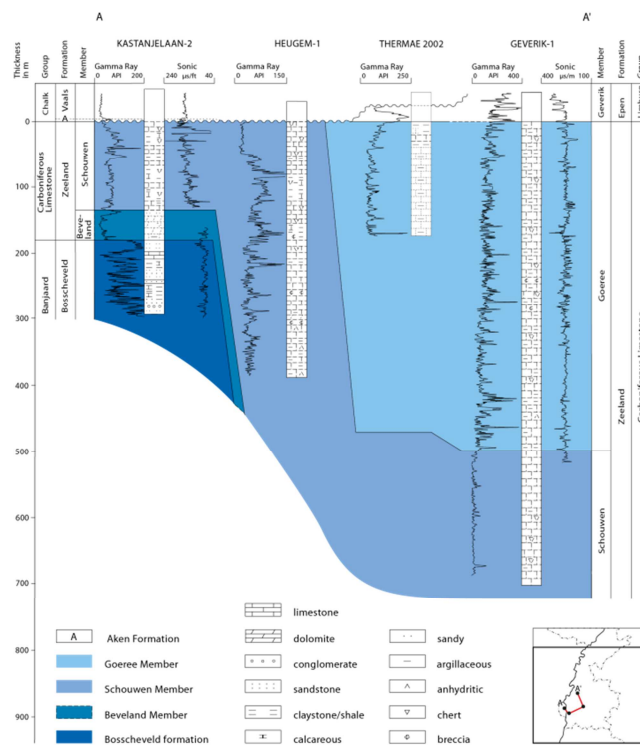
Een goede inschatting van reservoir eigenschappen is cruciaal voor het ontwikkelen van een aardwarmtesysteem. Er is een aantal mogelijkheden om de ondergrond in kaart te brengen. Daarbij is het ook van belang om de geologische historie en opbouw te kennen. Doordat de Nederlandse ondergrond rijk is aan olie, gas en steenkool zijn veel gegevens van de ondergrond verzameld. Deze gegevens zijn grotendeels openbaar beschikbaar. In dit hoofdstuk zal in het kort ingegaan worden op de ondergrondse gegevens en gebruik hiervan.

### 12.1 Basisgegevens ondergrond

Er zijn drie soorten basisgegevens die gebruikt kunnen worden om de diepe ondergrond in kaart te brengen, namelijk:

#### 1. Logmetingen (fysische boorgatmetingen)

In de olie- en gasindustrie is het gebruikelijk om tijdens exploratie- en productiebooringen diverse metingen te doen in het boorgat. Op basis van deze metingen (logs) kunnen verschillende typen gesteente en hun eigenschappen worden onderscheiden (Figuur 30). Door loggegevens uit putten te vergelijken kunnen deze gecorreleerd worden. Hierdoor ontstaat een beeld van het dikteverloop en de verbreiding van een gesteentepakket over een gebied. Ook bepaalde gesteente eigenschappen kunnen op basis van logs in verschillende boringen worden vergeleken.



Figuur 30. Voorbeeld van loggegevens en correlatie hiervan met andere putten in de omgeving (TNO-NITG, 1999).

## 2. Kernen

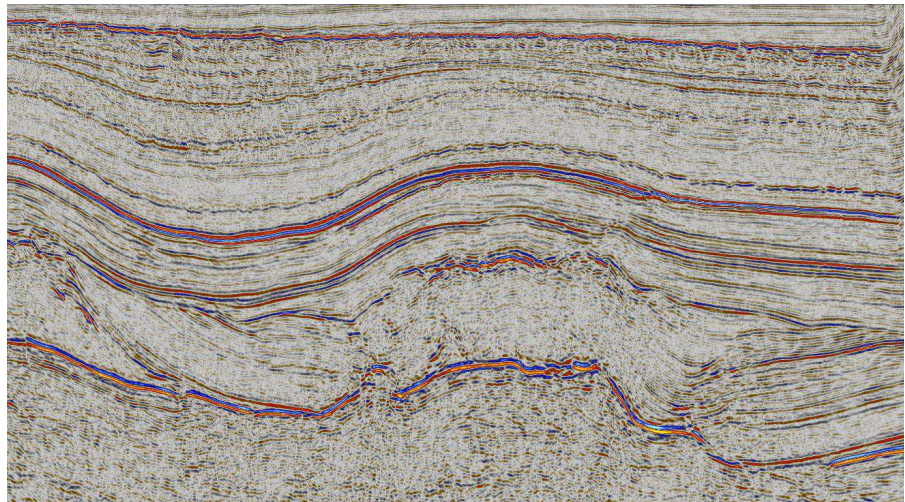
Soms besluit een maatschappij om gesteentekernen te nemen. Hierbij wordt een stuk gesteente (kern) uitgeboord en naar het oppervlak gehaald (Figuur 31). Alleen op basis van een kern kunnen de eigenschappen van een laagpakket in detail bepaald worden. Dit gebeurt in een specialistisch laboratorium. Veel bepaalde eigenschappen zijn porositeit, permeabiliteit en sterkte van een gesteente. Hiervoor gebruikt men kernpluggen uit de kern.



Figuur 31. Stukken kern uit de ondergrond, de gaten van de kernpluggen zijn zichtbaar (Foto: G-J Vis).

## 3. Seismiek

Seismiek is een methode om een beeld te krijgen van de ondergrond. Bij het schieten van seismiek worden drukgolven de ondergrond in gestuurd. Het principe van seismiek is gebaseerd op de reistijd van een drukgolf van het aardoppervlak, naar een contact (reflector) en weer terug naar het aardoppervlak. Een reflector representeert een dichtheidscontrast tussen verschillende gesteentelagen. Als een contrast groot genoeg is, zal een deel van de drukgolf worden weerkaatst van het contact tussen de lagen naar het aardoppervlak. De rest van de drukgolf wordt doorgegeven naar diepere lagen. Op basis van reistijden van een grote set drukgolven kan de opbouw van de ondergrond worden gereconstrueerd (Figuur 32). Samen met putinformatie kunnen geologische lagen vervolgens over een groter gebied gekarteerd worden.



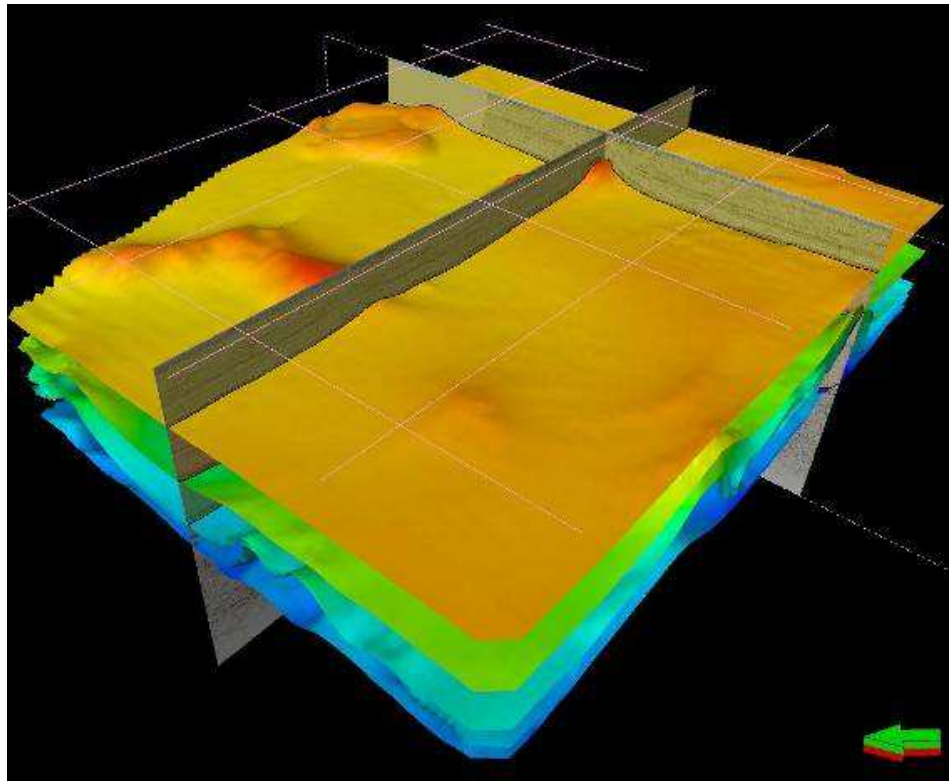
Figuur 32. Willekeurig voorbeeld van 2D seismische lijn.

Bij 2D seismiek wordt informatie verzameld in een verticale doorsnede van de ondergrond. Bij 3D seismiek wordt seismiek over een oppervlak geschoten, zodat een gebied driedimensionaal in kaart gebracht wordt (Figuur 33). Doordat bij 3D seismiek punten in de ondergrond meerdere malen worden gemeten, zijn de onzekerheden geringer dan bij 2D seismiek. Het nadeel van 3D seismiek is dat het erg kostbaar is. Met een goede voorbereiding en strategische keuze waar seismische lijnen worden geschoten kunnen met 2D seismiek toch goede resultaten behaald worden.

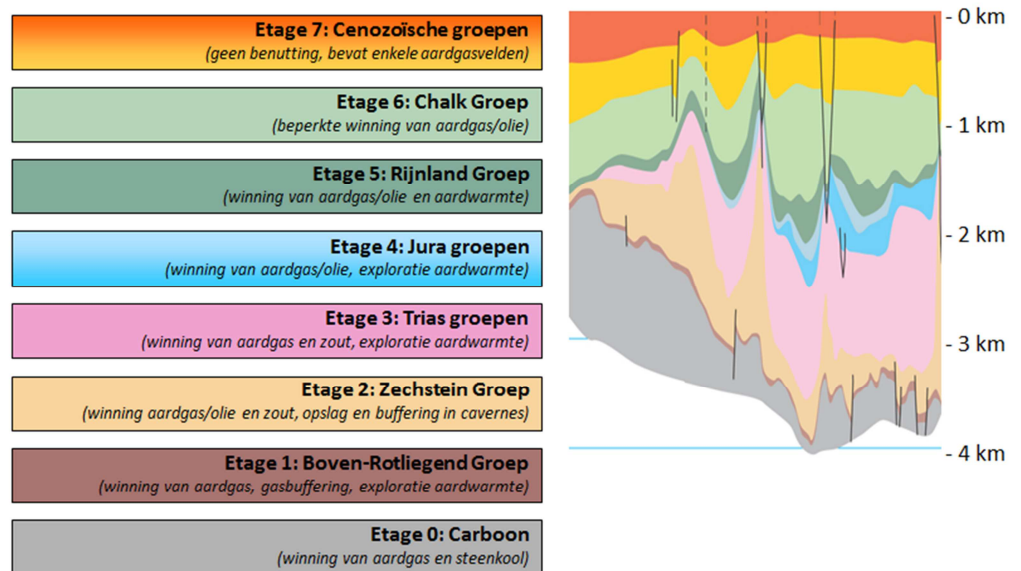
Maatschappijen zijn bij wet verplicht een kopie van bovengenoemde gegevens af te staan aan de overheid. De kopieën blijven 5 jaar confidentieel, mits de eigenaar eerdere vrijgave toestaat. De Geologische Dienst Nederland TNO (GDN-TNO) heeft als taak deze gegevens te beheren en beschikbaar te stellen voor publiek gebruik via [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl).

## 12.2 Groeperen van aardlagen

Gedurende de geologische geschiedenis zijn veranderingen opgetreden in afzettingmilieus. Deze veranderingen zijn te herkennen in het gesteente. Aardlagen zijn daarom te groeperen in afzettingmilieus en in tijdsperiodes. De onderverdeling van de ondergrond heeft geleid tot een naamgeving in supergroep, groep, formatie en laagpakket (Figuur 34). In Figuur 34 is een voorbeeld van geologische groepen en de naamgeving schematisch weergegeven.



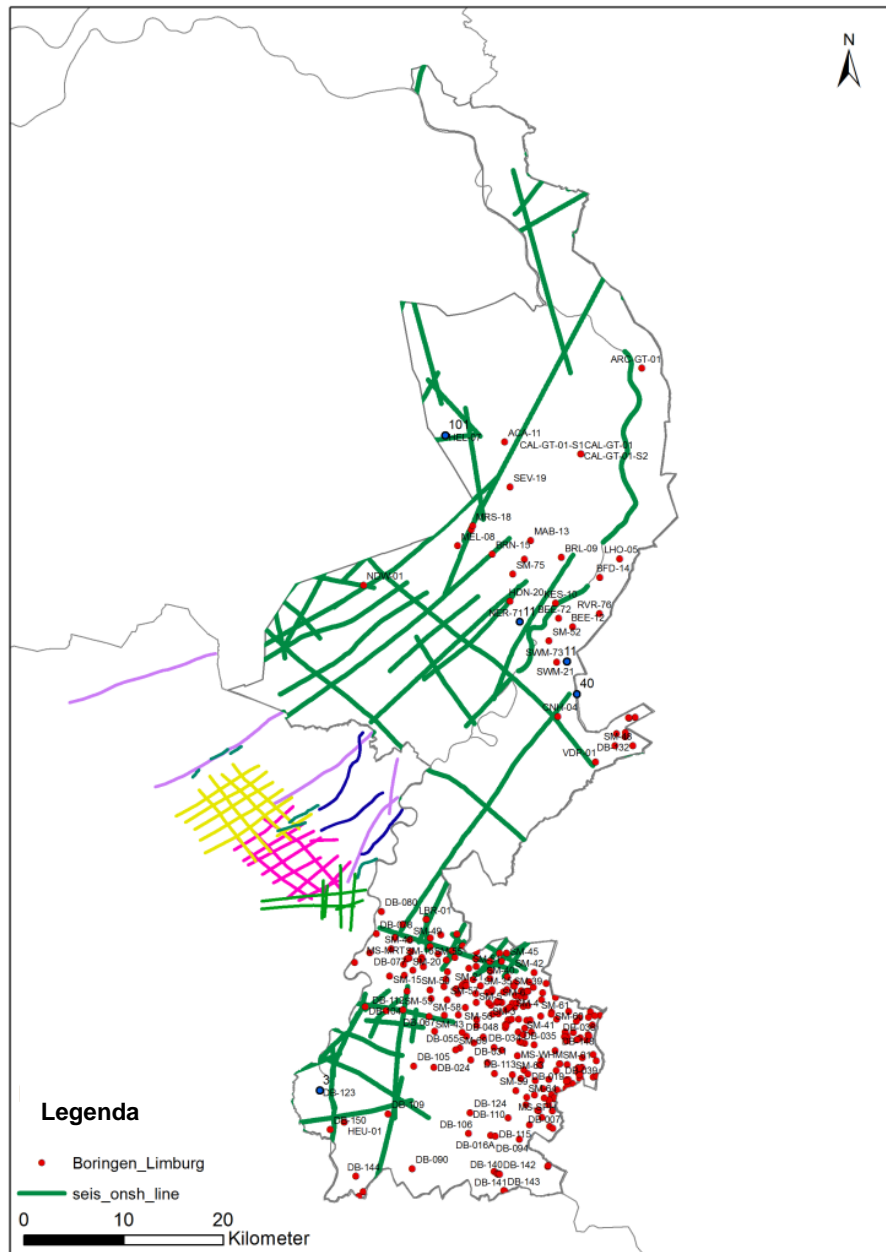
Figuur 33. Een voorbeeld van geïnterpreteerde 3D seismiek. Voordeel van 3D seismiek is dat een vlak gekarteerd kan worden in plaats van een lijn zoals bij een 2D seismische sectie.



Figuur 34. Schematische onderverdeling van de ondergrond in groepen. Met behulp van seismiek en analyse van putinformatie kunnen de groepen in de ondergrond in kaart gebracht worden (rechts).

### 12.3 Geologische informatie Limburg

In Limburg en de directe omgeving zijn seismische lijnen en boringen aanwezig die in dit project gebruikt zijn voor analyse en kartering (Figuur 35). In Limburg is geen 3D seismiek geschoten. Ook in België en Duitsland zijn alleen 2D seismische lijnen geschoten. De meeste seismiek is geschoten in de jaren '70 en '80. De seismiek is van slechte tot matige kwaliteit. De lijnen zijn geschoten voor exploratie naar steenkool, koolwaterstoffen (noord-Limburg), perslucht opslag (Geverik) en recentelijk voor aardwarmte in Grubbenvorst (2009).

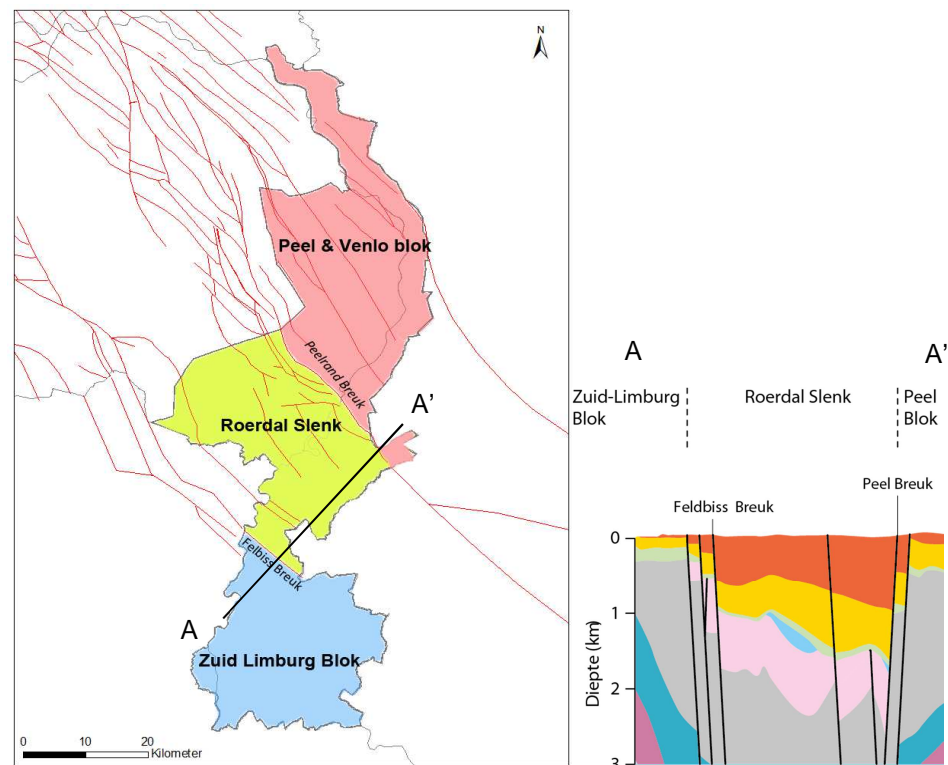


Figuur 35. Overzicht van boringen en seismische lijnen in en rondom de provincie Limburg (putten buiten de provinciegrenzen zijn hier niet aangegeven).

In Limburg zijn in totaal 287 diepe boringen gezet. Het overgrote deel van deze boringen was bedoeld voor steenkoolexploratie. De meeste van deze boringen gaan niet dieper dan 1000 m (245). De resterende boringen hadden als doel exploratie naar koolwaterstoffen, persluchttopslag of aardwarmte. De boring Nederweert-01 (NDW-01) is de enige put binnen de provinciegrenzen die tot grotere diepte gaat (2942 m). Veel van de geologische gegevens zijn gedateerd en gegevens over reservoir eigenschappen zijn zeer beperkt. Dit heeft onder anderen te maken met de ouderdom van de putten. Destijds werden zelden logmetingen gedaan.

### 12.3.1 Structurele geologie van Limburg

De Limburgse ondergrond is in drie geologische structurele elementen te onderscheiden, namelijk het Peel-Venlo Blok, de en het Zuid Limburg Blok (Figuur 36). De is een geologische structuur die gekenmerkt wordt door een vrijwel continue daling van de ondergrond gedurende de geologische geschiedenis. De Peel-Venlo en Zuid-Limburg Blokken hebben veel minder verzakking meegemaakt. Het verschil in reliëf heeft er toe bijgedragen dat het voorkomen van laagpakketten gerelateerd is aan deze structuren. In de Roerdal Slenk is de geologische opbouw beter bewaard gebleven dan op de blokken, doordat laagpakketten niet hierop afgezet zijn of in een later stadium weer geërodeerd zijn.

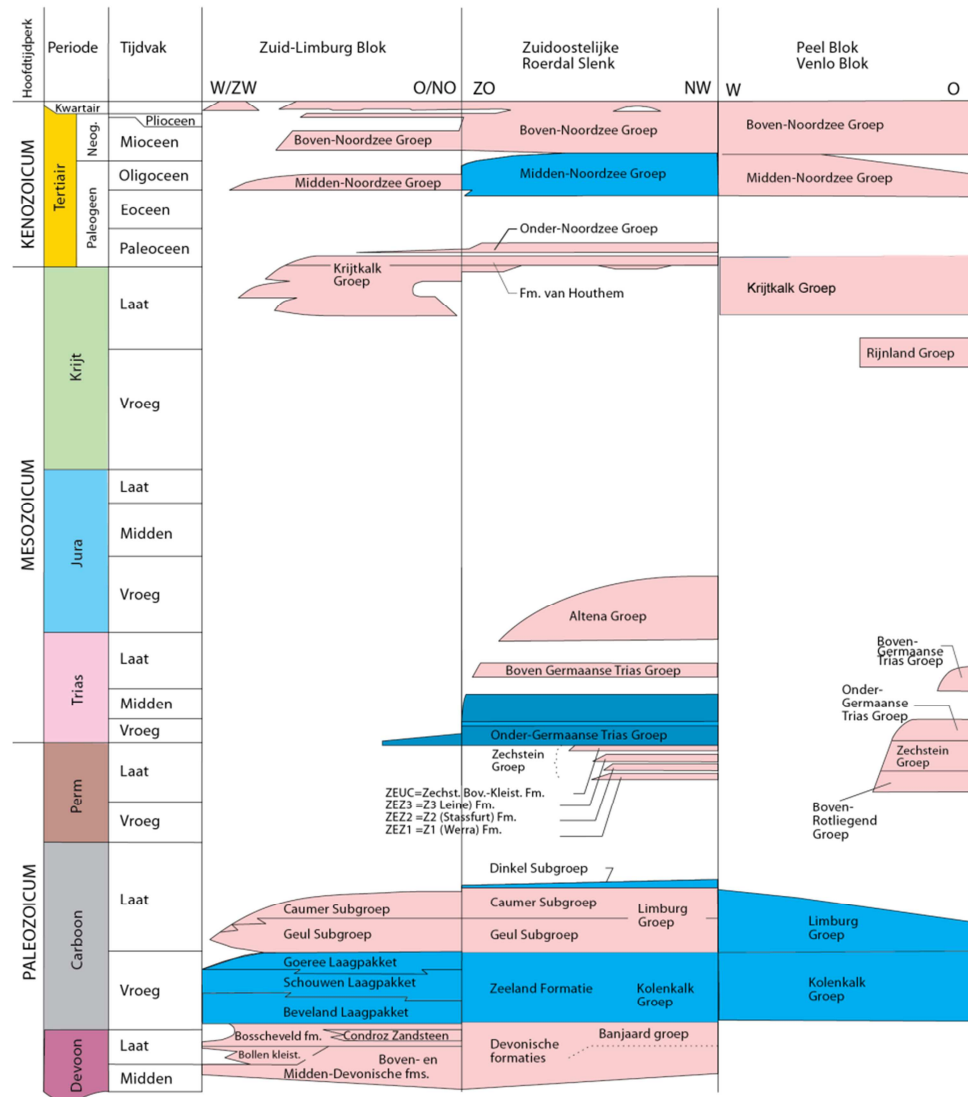


Figuur 36. De ondergrond van Limburg is in drie hoofdstructuren in te delen. De dwarsdoorsnede laat zien hoe de ondergrond op de lijn A-A' is opgebouwd. De Roerdal Slenk is een geologische structuur waar door daling van de ondergrond meer sedimenten zijn afgezet (TNO-NITG, 2001).

### 12.3.2 Stratigrafie

Stratigrafie van gesteentelagen is een belangrijk onderdeel in de geologie waarbij de opeenvolging van gesteentelagen (stratificatie) wordt bestudeerd met als doel laagpakketten te dateren en te beschrijven. In Nederland is de stratigrafie

gebaseerd op de vele exploratie- en productieborings naar fossiele brandstoffen en boringen ten behoeve van de mijnbouw. Een indeling op basis van gesteentekennmerken heet lithostratigrafie, een indeling op basis van ouderdom heet chronostratigrafie. Binnen de structurele elementen zoals hierboven beschreven, bevinden zich verschillende laagpakketten (Figuur 37). De namen hiervan zullen in dit rapport veelvuldig worden gebruikt.



Figuur 37. Overzicht van periodes, tijdvakken en geologische groepen in de Limburgse ondergrond. In blauw worden de groepen aangegeven die potentie hebben voor aardwarmte binnen elk van de drie structurele elementen in Limburg. Merk op dat de meeste laagpakketten zich in de Roerdal Slenk bevinden (gebaseerd op TNO-NITG, 1999 & 2001).



## 13 Aanpak studie ondergrond

In dit hoofdstuk wordt de aanpak beschreven die gehanteerd is in dit project. Voor de kartering van voor aardwarmte potentieel geschikte laagpakketten in de ondergrond zijn drie fasen te onderscheiden:

1. voorselectie van potentieel geschikte laagpakketten;
2. kartering en modellering van geselecteerde laagpakketten;
3. berekening van het verwachte vermogen en de energie-inhoud.

Elke fase wordt hieronder verder toegelicht.

### 13.1 Voorselectie

Aan de hand van boorbeschrijvingen en literatuur zijn de geologische eenheden die in de ondergrond van de provincie Limburg voorkomen getoetst op geschiktheid. In de provincie Limburg kunnen zowel laagpakketten als breuken potentiële bronnen zijn voor aardwarmtewinning.

In de voorselectie van laagpakketten zijn de volgende criteria gehanteerd:

1. Verondersteld wordt dat in Limburg de temperatuur gemiddeld met 0,032 °C per meter toeneemt (32°C per km). Het verwarmen van kassen is vanaf een temperatuur van 40°C rendabel. Dit impliceert dat laagpakketten vanaf een diepte van 1000 m geschikt zijn voor direct gebruik van warmte (uitgaande van een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 10°C). De geselecteerde laagpakketten bevinden zich daarom dieper dan 1000 m.
2. Een laagpakket moet over een groot gebied aanwezig zijn (grote verbreiding), opdat er voldoende kans is dat een laagpakket aaneengesloten is.
3. Binnen het verbreidingsgebied moet er een reële kans bestaan dat een laagpakket voldoende porositeit en doorlatendheid (permeabiliteit) heeft en/of dat het laagpakket voldoende splijtgevoelig is voor eventuele reservoirstimulatie
4. Formaties waarin waterhoudende lagen ingesloten liggen in een matrix van hoofdzakelijk slecht doorlatende laagpakketten worden niet meegenomen (zie paragraaf 6.1 C).

Criteria die gehanteerd zijn voor potentiële breuken zijn de volgende:

1. Breuken zijn niet altijd waterdoorlatend. Doorlatendheid van een breuk wordt onder andere bepaald door de activiteit van de breuk. Actieve breuken hebben een grotere kans om waterdoorlatend te zijn. Aardbevingen geven een indicatie van de activiteit. Aardbevingen worden geregistreerd door het KNMI en zijn gebruikt om een inschatting te maken welke breuken in Limburg actief zijn en dus mogelijk geschikt zijn voor aardwarmtewinning.
2. Breuken die tot dicht bij het maaiveld komen zijn geologisch gezien actiever dan breuken die op een grotere diepte eindigen. Bij de kartering is gekeken welke breuken doorlopen tot het maaiveld en dus als geologisch actief beschouwd kunnen worden.

3. Putinformatie kan aantonen dat er in het geologische verleden watermigratie heeft plaatsgevonden langs een breuk. Indien er bewijzen zijn van watermigratie is verondersteld dat langs deze breuk nog watermigratie kan plaatsvinden.

## 13.2 Kartering ondergrond

### 13.2.1 *Seismiek en boringen*

De laagpakketten die volgens de beschrijvingen voldoen aan bovengenoemde criteria zijn verder uitgewerkt. Hierbij is gericht gezocht naar gegevens over de reservoirkwaliteit en samenstelling. Daarvoor is gebruik gemaakt van eerdere TNO studies, de lithostratigrafische nomenclator (RGD, 1993) en Belgische en Duitse literatuur over de regionale geologie. Ook zijn putgegevens in een wijde omgeving van Limburg geraadpleegd.

Voor het karteren van de ondergrond zijn alle Nederlandse en Belgische seismische lijnen in de omgeving van de provincie opgevraagd. Met het softwarepakket Petrel van Schlumberger (versie 2011.2) zijn de breuken en geologische groepen op 2D seismiek geïnterpreteerd. De afzonderlijke 2D interpretaties zijn vervolgens gecorreleerd en gekarteerd. Daarnaast zijn de breukinterpretaties uit de ondiepe kartering (breukinterpretaties tot de Breda Formatie) meegenomen in de kartering van de diepe ondergrond. Hierdoor komen de interpretaties van de diepe breuken overeen met de breuken in de bovenste 500 m die op basis van ondiepe boringen zijn gekarteerd.

Bij de acquisitie van seismiek wordt de tijd gemeten tussen het moment van schieten en opname van gereflecteerde drukgolven. Seismische profielen zijn dus geregistreerd in tijd. Geïnterpreteerde seismiek dient daarom omgezet te worden naar diepte. Dit wordt gedaan door een snelheidsmodel te maken. Het snelheidsmodel geeft de snelheid aan waarmee de drukgolven door de ondergrond gaan. Deze snelheden worden gebruikt om een conversie naar diepte te maken. Voor deze conversie naar diepte is ook gebruik gemaakt van tijd-diepte paren uit putgegevens. Tevens zijn resultaten uit Velmod-2 gebruikt (beschikbaar via [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl)). In Petrel is op basis van deze gegevens een snelheidsmodel gecreëerd waarmee de tijdinterpretaties omgerekend kunnen worden naar diepte.

De kwaliteit van de beschikbare seismiek is niet voldoende om afzonderlijke laagpakketten te onderscheiden. Geologische groepen zijn doorgaans wel op seismiek zichtbaar, hoewel de zichtbaarheid met de diepte significant afneemt. Voor dit project zijn daarom de groepen gekarteerd en de afzonderlijke laagpakketten vervolgens gemodelleerd. Voor de modellering is een bestaande workflow voor dit project aangepast (Petrel). Voor het modelleren zijn diepte- en diktegegevens uit putten gebruikt. Het resultaat is een regionaal overzicht van de diepte en dikte van alle geselecteerde laagpakketten. De celgrootte van de kaarten is 250 bij 250 m.

### 13.2.2 *Petrofysische analyse put NDW-01*

Om het potentieel van de Onder-Germaanse Trias Groep beter in te kunnen schatten is een petrofysische analyse van de put Nederweert-01 (NDW-01) uitgevoerd. Deze put beschikt over een aantal boorgatmetingen waarmee de porositeit berekend kan worden en een inschatting gemaakt kan worden van de

permeabiliteit. Een gedetailleerde beschrijving van de analyse en de resultaten zijn te vinden in Bijlage B. De resultaten van deze analyse zijn verwerkt in de berekeningen en vervaardiging van de Theoretische Energie Hoeveelheid (TEH) kaarten en vermogenskaarten.

### 13.3 Temperatuurgradiënt

Temperatuurmetingen van de aardwarmteboring Asten-02 (AST-GT-02) laten tot een diepte van 1650 m een gemiddelde temperatuurgradiënt zien van 32°C/km. Deze gradiënt is iets hoger dan gemiddeld in Nederland. De metingen van AST-GT-02 worden als zeer betrouwbaar beschouwd (TNO-NITG, 2001).

In de boringen Neer-71, Beesel-72, Maasniel-74, Helden-75, Reuver-76 en Elmpt-77 in het zuidoosten van het Peel Blok zijn ook temperatuurmetingen verricht. De diepste put gaat tot 1350 m. De metingen laten een gradiënt zien van 21,4-29°C/km in de jonge laagpakketten. Vanaf een gemiddelde diepte van 650 m is hier een hogere gradiënt in de oudere laagpakketten waargenomen van 37,3-45,5°C/km (TNO-NITG, 2001). Persberichten naar aanleiding van de recente aardwarmteboringen in het kassengebied Californië (gemeente Grubbenvorst) berichten over water met een temperatuur van 60°C op ~1600 m diepte. Dit duidt op een gradiënt van 32°C/km (groentennieuws.nl). Voor deze studie is daarom uitgegaan van een gemiddelde temperatuurgradiënt van 32°C/km voor heel de provincie Limburg.

### 13.4 Theoretische Energie Hoeveelheid kaarten (GJ/m<sup>2</sup>)

In dit rapport wordt de TEH van elk laagpakket in kaartvorm weergegeven. De TEH is de *maximale* winbare energie die beschikbaar is in een reservoir. De TEH kaarten zijn vervaardigd met de volgende formule:

$$TEH = \gamma_t (T_{res} - T_{uit}) h 10^{-9} \quad (\text{vergelijking 1})$$

TEH = Theoretische Energie Hoeveelheid (GJ/m<sup>2</sup>)

$\gamma_t$  = Totale reservoir warmtecapaciteit (J/m<sup>3</sup> °C)

$T_{res}$  = Temperatuur reservoir (aquifer) (°C)

$T_{uit}$  = Temperatuur uitkoeling (°C)

$h$  = Dikte (m)

$$\gamma_t = \theta (c_w \rho_w + (1-\theta) c_r \rho_r) \quad (\text{vergelijking 2})$$

$\theta$  = Porositeit (-)

$c_w$  = Warmtecapaciteit formatiewater (J/kg °C)

$\rho_w$  = Dichtheid van water (kg/ m<sup>3</sup>)

$c_r$  = Warmtecapaciteit formatiegesteente (J/kg °C)

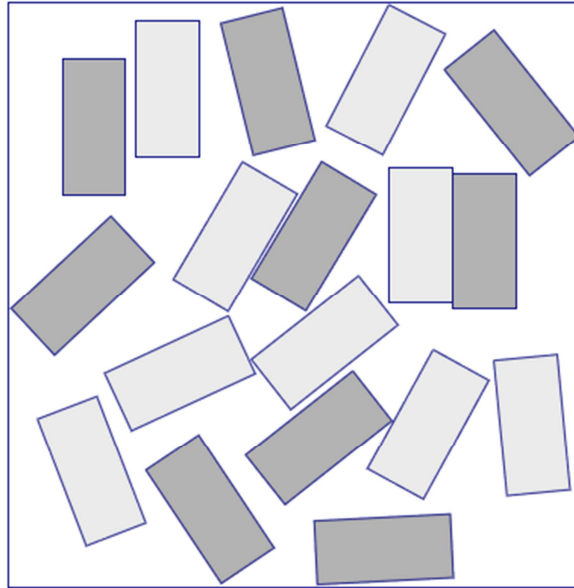
$\rho_r$  = Dichtheid van gesteente (kg/ m<sup>3</sup>)

Voor de berekening zijn de volgende aannames gedaan:

- warmtecapaciteit van water ( $c_w$ ) is 3772 J/kg°C;
- warmtecapaciteit gesteentematrix is 1000 J/kg°C ( $c_r$ );
- gemiddelde porositeit ( $\theta$ ) is 0,15 (landelijk gemiddelde);

- voor het omrekenen naar de gewenste eenheden is een waterdichtheid van  $1042 \text{ kg/m}^3$  en gesteentedichtheid van  $2600 \text{ kg/m}^3$  gebruikt.

In de praktijk zal het niet mogelijk zijn om alle energie uit een laagpakket effectief te benutten. Dit heeft onder anderen te maken met de bovengrondse infrastructuur (wegen/gebouwen) en de geologische structuur van de ondergrond. Hierdoor worden doubletten meer willekeurig over een regio verdeeld (Figuur 38). Gemiddeld zal ongeveer 1/3 van de aanwezige energie daadwerkelijk worden benut voor aardwarmtewinning (Kramers et al. in press).



Figuur 38. Voorbeeld van een willekeurige verdeling van doubletten in een gebied. De rechthoeken geven het beïnvloedingsgebied van een doublet in de ondergrond weer. Het totaal beschikbare aardwarmtepotentieel zal niet volledig benut worden, door bovengrondse infrastructuur (gebouwen, wegen e.d.) en de ondergrond (b.v. locatie breuken).

## 13.5 Vermogenskaarten (MWth)

### 13.5.1 Bepaling vermogen

De vermogenskaart geeft een indicatie van het winbare thermische vermogen per doublet. De kaarten geven het verwachte vermogen weer uit een natuurlijk doorlatend reservoir. Er is geen rekening gehouden met reservoirstimulatie.

Vanwege de lage datadichtheid en daarmee gepaard gaande onzekerheden is ervoor gekozen om in dit rapport de P30 vermogenskaart per gekarteerd laagpakket weer te geven. De P30 vermogenskaart geeft aan dat er 30% kans is om *minimaal* het (op de kaart) aangegeven vermogen te behalen. De vermogensverwachtingscurve is bepaald aan de hand van de nieuwe regionale kaarten uit de kartering voor dit project (diepte-, dikte-, temperatuur- en transmissiviteitskaarten) met de bijhorende onzekerheidskaarten.

Voor het bepalen van de transmissiviteit is gebruik gemaakt van de werkwijze die in het ThermoGIS-project ([www.thermogis.nl](http://www.thermogis.nl)) is ontwikkeld. Deze kaarten zijn berekend op basis van boorgatmetingen en kernplugdata uit putten. Voor de

Onder-Germaanse Trias Groep is de transmissiviteitskaart aangevuld met de NDW-01 putgegevens. Er zijn geen andere putten in de directe omgeving van de provincie die over de juiste boorgatmetingen beschikken. Een detailstudie op locatie zal de onzekerheid verminderen wat de aardwarmtekansen kan verhogen en de business case kan optimaliseren.

Voor het berekenen van het vermogen is een Coëfficiënt Of Performance (COP) van 15 aangenomen. De COP is de ratio tussen aardwarmtevermogen en elektriciteitsverbruik door onder andere pompen. Een COP van 15 wordt gezien als de minimale ondergrens voor een rendabel aardwarmtesysteem. Zodra in de berekening de COP onder de 15 komt is het vermogen op 0 MW gesteld.

Verder is onderscheid gemaakt tussen woningbouw en kassen. Het verschil zit in de minimaal benodigde reservoirtemperatuur en mate van uitkoeling van het opgepompte warme water. Voor woningbouw is een minimale temperatuur aangenomen van 65°C, voor kassen een minimale temperatuur van 45°C. Indien de reservoirtemperatuur beneden deze drempelwaardes komt, is het vermogen op 0 MW gesteld.

De temperatuur van de uitkoeling ( $T_{uit}$ ) is afhankelijk van de toepassing. Bij woningbouw wordt 40°C geïnjecteerd in de ondergrond en bij tuinbouw wordt het water afgekoeld tot 25°C. De ondergrens van 40°C bij woningbouw is gerelateerd aan de toepassing van Lage Temperatuur Verwarming (LTV), zonder gebruik van additionele warmtepompen (Platform Geothermie, 2009). Verdere uitkoeling naar een temperatuur lager dan 40°C vereist toepassing van warmtepompen. Bij glastuinbouw is als uitgangspunt genomen dat de eisen van een verwarmingssysteem ten opzichte van de verwarming van woningen lager liggen, waardoor grotere uitkoeling tot 25°C mogelijk is. Voor het berekenen van het vermogen is vergelijking 1 gebruikt zoals beschreven in Hoofdstuk 7. Het debiet is bepaald met het programma Doubletcalc (TNO, 2009). Het debiet ( $Q$ ) is afhankelijk van

$$Q = \Delta P \frac{2\pi kH}{\mu \left( \ln \left( \frac{L}{r_w} \right) - S \right)}$$

- $\Delta P$  = Drukverschil tussen de injectie en productieput (bar)
- $\mu$  = Viscositeit van het water (ppm)
- $L$  = Afstand tussen de putten (m)
- $R_w$  = Putdiameter (m)
- $S$  = Skin factor (-)

Genoemde parameters zijn afhankelijk van de geologie. Het debiet is berekend op grond van de diepte, dikte en permeabiliteit gegevens uit de geologische kartering. Het drukverschil tussen de putten van het doublet en afstand tussen de putten (tot maximaal 3000 m) worden geoptimaliseerd naar een Coëfficiënt of Performance (COP) van 15. Viscositeit is afhankelijk van de diepte (ter indicatie; 70000 ppm op 1500 m). Bij de skin factor is een waarde 0 aangehouden. Voor de putdiameter is een gemiddelde van 8 inch aangenomen.

### 13.5.2 Vermogen Kolenkalk Groep

Voor het berekenen van het vermogen uit de Kolenkalk Groep is een afwijkende methode toegepast. Voor deze kalksteen zijn geen porositeits- en permeabiliteitsgegevens bekend en/of ze zijn moeilijk te bepalen. Voor deze groep is het vermogen berekend voor vier verschillende debieten, namelijk 50, 100, 150 en 200 m<sup>3</sup>/u. De debieten zijn gebaseerd op praktijkgegevens uit onder andere België.

Tabel 1. Overzicht van geïnventariseerde groepen en laagpakketten van jong (1) naar oud (2).

	Groep	Mogelijk potentieel	Omschrijving	Reden niet verdere uitwerking
1	Noordzee	Heers, Reusel, Steensel en Voort Laagpakket	<b>Voort Laagpakket zie 15.2.1</b>	De Heers, Reusel, Steensel Laagpakketten zijn te dun voor voldoende transmissiviteit
2	Chalk	Vaals en Aken Fm.	Zandig ontwikkelde pakketten aan de randen van de Roerdal Slenk	Genoemde laagpakketten liggen te ondiep voor voldoende hoge temperatuur voor een rendabel aardwarmte-doublerset
3	Rijnland		Niet aanwezig	Niet aanwezig
4	Schieland		Slecht doorlatende silt-, klei- en kalksteenlagen	Geen laagpakketten aanwezig die aan criteria voldoen
5	Altena		Voornamelijk mariene kleisteen met enkele dunne laag permeabele zandsteenlaag	Geen laagpakketten aanwezig die aan criteria kunnen voldoen
6	Boven Germaanse Trias	Röt Fringe Zandsteen Laagpakket	Zandsteen met wisselende reservoirkwaliteit. Aangetoond in het grensgebied Limburg/Noord-Brabant. Verbreiding in Limburg beperkt	Verbreiding in Limburg te beperkt voor gedetailleerde kartering en kwaliteit te onzeker
7	Onder-Germaanse Trias	Hardegens, Detfurth, Volpriehausen en Nederweert Fm.	<b>Zie 15.2.2</b>	
8	Zechstein		Groep opgebouwd uit kleisteen en een dunne carbonaatbank	Geen laagpakketten aanwezig die aan criteria voldoen
9	Upper Rotliegend	Slochteren Fm.	Zeer dunne zandsteenlaag van beperkte kwaliteit	Laagpakket niet geschikt
10	Limburg	Baarlo, Ruurlo, en Neeroeteren Fm.	Baarlo en Ruurlo zijn opgebouwd uit sequenties van klei-zand-koollagen. <b>Neeroeteren Fm. zie 15.2.3</b>	Afzonderlijke zandlagen en koollagen zijn dun en reservoirkwaliteit beperkt (Peeters, 2011, VITO, 2012). Bovendien kans op gasinsluitels (TNO-NITG, 2001)
11	Kolenkalk	Zeeland Fm	<b>Zie 15.2.4</b>	
12	Oudere groepen			Eigenschappen onbekend (geen boringen)

## 14 Preselectie potentieel geschikte laagpakketten

In dit hoofdstuk worden de geselecteerde potentieel voor aardwarmte geschikte laagpakketten in Limburg kort beschreven. In Figuur 37 zijn de potentiële groepen en laagpakketten in blauw aangegeven.

### 14.1 Potentieel geschikte laagpakketten ondergrond Limburg

In totaal zijn negen geologische groepen geïnventariseerd op geschiktheid voor aardwarmtewinning. In vier van de deze groepen zijn laagpakketten aanwezig die aan de criteria zouden kunnen voldoen. De geselecteerde groepen zijn (van jong naar oud):

1. Noordzee Supergroep;
2. Onder-Germaanse Trias Groep;
3. Limburg Groep;
4. Kolenkalk Groep.

De reden voor het niet verder uitwerken van de overige groepen is te vinden in Tabel 1. Hieronder worden de afzonderlijke groepen beschreven, waarin zich laagpakketten bevinden, die aardwarmtepotentie hebben in Limburg.

#### 14.1.1 *Noordzee Supergroep*

De laagpakketten uit de Noordzee Supergroep zijn geologisch gezien de jongste afzettingen. Het **Voort Laagpakket** is een zandige afzetting binnen deze groep met gemiddeld 200 m dikte. Het pakket komt uitsluitend in Midden Limburg voor. In de Roerdal Slenk ligt het pakket door continue daling beneden de 1000 m waardoor het daar mogelijk interessant is voor diepe aardwarmte. De putten, Asten-01 & GT-02 (AST-01/AST-GT-02), Beeringen-15 (BRN-15), Helden-20 (HDN-20), KB-198, Nederweert-01 (NDW-01) en Voldrop-03 (VDP-03) hebben de aanwezigheid van dit laagpakket in Limburg aangetoond.

Een ander laagpakket behorende tot deze groep is het **Vessem Laagpakket**. Bij de aardwarmteboring AST-GT-02 is op basis van kernmetingen en druktets gebleken dat dit 20 m dikke laagpakket goede reservoir eigenschappen bezit voor aardwarmte. Het laagpakket ligt in de Roerdal Slenk op een diepte van 1300 m waar voldoende hoge temperaturen heersen voor glastuinbouw.

#### 14.1.2 *Onder-Germaanse Trias Groep*

Vanaf een diepte van ruwweg 1500 m zijn in de Roerdal Slenk afzettingen van de Onder-Germaanse Trias Groep aangetroffen. Binnen deze groep zijn 6 zandige pakketten te onderscheiden:

1. Hardegse Formatie;
2. Boven-Detfurth Zandsteen Laagpakket;
3. Onder-Detfurth Zandsteen Laagpakket;
4. Boven-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket;
5. Onder-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket;
6. Nederweert Zandsteen Laagpakket.

Binnen de provincie Limburg heeft alleen de put NDW-01 deze groep aangeboord. Noordelijker, net buiten de provinciegrens, is de aanwezigheid van de groep ook

aangetoond door de putten de AST-01 & AST-GT-02. Er zijn geen putten in het oosten van Limburg aanwezig die deze groep hebben aangeboord.

#### 14.1.3 *Limburg Groep*

De **Neeroeteren Formatie** is slechts bekend uit boringen in België. Deze formatie bestaat hoofdzakelijk uit grofkorrelige zandsteen met fijnkorrelige lagen en met een enkele koollaag. De formatie is in Nederland niet aangetoond door een boring, maar is waarschijnlijk aanwezig in het midden van de provincie Limburg, ten noorden van de Felbiss breuk (TNO-NITG, 2001).

#### 14.1.4 *Kolenkalk Groep*

Gedurende het Vroeg Carboon (Dinantien) is de kalksteen van de **Kolenkalk Groep** afgezet. De groep bestaat hoofdzakelijk uit kalksteen, dolomiet<sup>4</sup> en bevat aan de top en basis klei-inschakelingen (TNO,1999). De groep komt overal in de Limburgse ondergrond voor.

De porositeit van de kalksteen in de Kolenkalk Groep is slechts enkele procenten en de doorlatendheid is doorgaans slecht. Toch is de kalksteen om drie redenen interessant voor aardwarmte:

- 1) *Verkarsting aan de top van de groep kan leiden tot een goed doorlatend gesteente (TNO, 1999/2001):* verkarsting treedt op wanneer een gesteente zich boven de zeespiegel bevindt. Zuur regenwater sijpelt dan door de kalksteen en lost het op. De verkarsting kan leiden tot open holten in het gesteente en de kalksteen kan daarom als reservoir dienen. Aardwarmtebronnen in België onttrekken water uit dit type reservoir (Haenel & Staroste, 1988).
- 2) *De kalken zijn splijtgevoelig waardoor gemakkelijk spleten en barsten ontstaan bij breuken (TNO, 2011):* langs natuurlijke breuken kunnen talrijke zones van spleten en oplossingsholten zijn ontstaan. Dit is aangetoond in een put bij Loenhout-Heibaart (België). Vooral in de buurt van actieve breuken kunnen doorlatende zones worden verwacht.
- 3) *Dolomitisch gesteente binnen de formatie kan doorlatend zijn:* de omzetting van kalksteen naar dolomiet kan leiden tot goede reservoir eigenschappen voor aardwarmte.

#### 14.1.5 *Breuken*

De regio rondom Limburg is voor Nederlandse begrippen geologisch actief, zoals blijkt uit de seismische metingen van het KNMI. De gemeten seismiciteit bevindt zich vooral bij de randbreuken van de Roerdal Slenk (Figuur 39). Het gaat hoofdzakelijk over zeer lichte, nauwelijks voelbare bevingen (magnitudes van 0-3 op de schaal van Richter). Veel lichte bevingen worden geregistreerd in de omgeving van Roermond en Valkenburg.

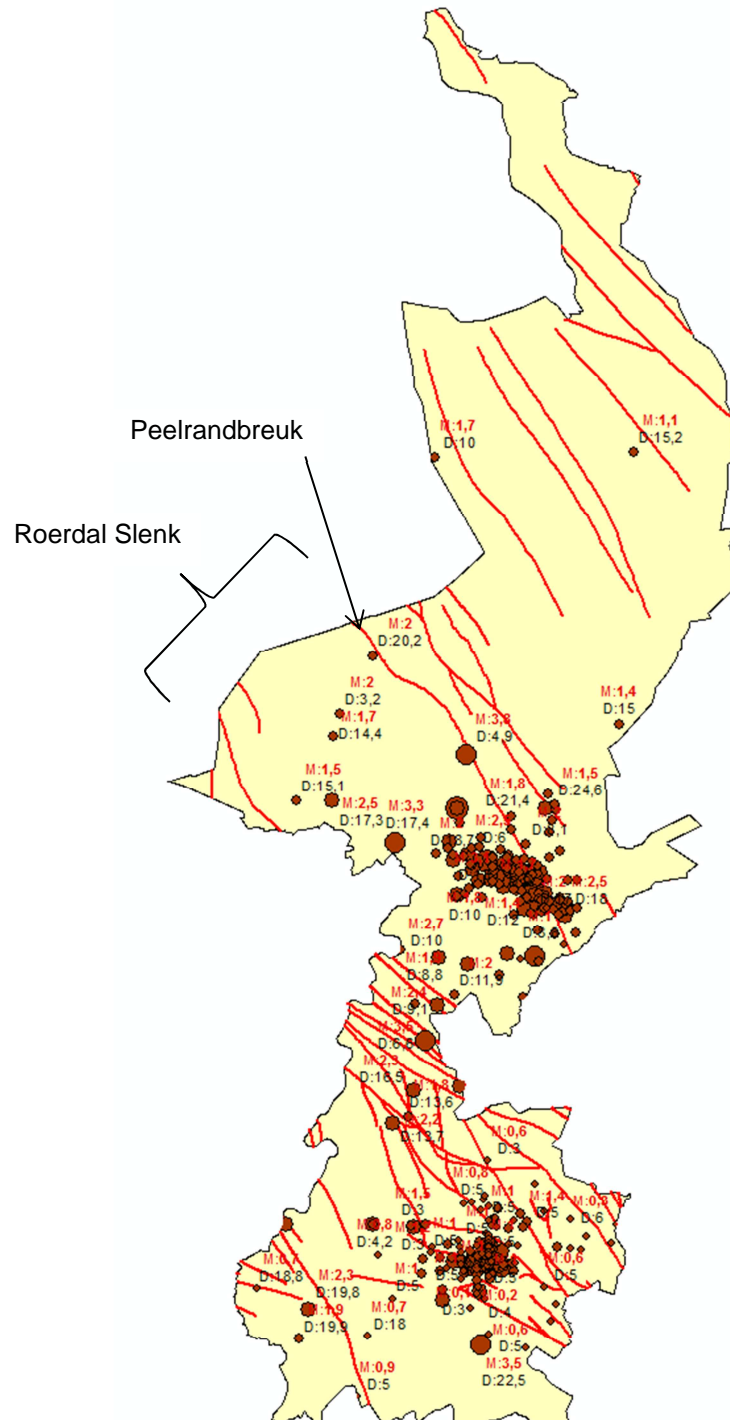
Breukbeweging komt voornamelijk voor bij breuken aan de randen van de Roerdal Slenk . De aardbevingen vinden doorgaans plaats op 10-20 km diepte en hangen samen met een abrupte verplaatsing langs grote breuken. Deze verplaatsing is het

---

<sup>4</sup> Dolomiet is magnesiumkalksteen die ontstaat door chemische verandering na afzetting.



gevolg van natuurlijke spanningen in de aardkorst. Actieve breuken kunnen doorlatend zijn voor water en in verticale zin reiken tot in de jongste geologische afzettingen.



Figuur 39. Geregistreeerde aardbevingen in Limburg gedurende de laatste 100 jaar (bron: KNMI). De bevingen worden voornamelijk langs de randbreuken van de Roerdal Slenk geregistreeerd. (M=magnitude op de schaal van Richter, D = diepte).

## 15 Potentieel geschikte aardwarmteregio's

De hierboven beschreven laagpakketten worden in de volgende hoofdstukken in meer detail uitgewerkt. Bij het uitwerken van de potentieel voor aardwarmte geschikte laagpakketten is ervoor gekozen om de geologische hoofdstructuren van de ondergrond aan te houden (Figuur 36). In paragraaf 15.2 worden het potentieel van de Noordzee Supergroep, de Onder-Germaanse Trias Groep en de Limburg Groep in de Roerdal Slenk in meer detail geïnventariseerd. Paragraaf 15.3 richt zich op de Kolenkalk Groep, die vooral op de Peel-Venlo en Zuid-Limburg blokken aardwarmtepotentie heeft. Voor de overzichtelijkheid worden niet alle kaarten weergegeven in onderstaande hoofdstukken; de kaarten voor afzonderlijke laagpakketten zijn te vinden in Bijlagen C t/m G.

### 15.1 Laagpakketten in de Roerdal Slenk

De Roerdal Slenk heeft een vrijwel continue daling meegemaakt gedurende de geologische geschiedenis. Het type sediment dat is afgezet werd mede gestuurd door de heersende klimaatomstandigheden. Gedurende de geologische geschiedenis fluctueerden de klimaatomstandigheden sterk, waardoor verschillende laagpakketten met variërende samenstellingen in de Roerdal Slenk afgezet zijn. Uit de voorselectie is gebleken dat in de slenk een aantal poreuze zandsteenlaagpakketten aanwezig is met potentie voor aardwarmtewinning.

#### 15.1.1 Noordzee Supergroep

Het **Voort Laagpakket** is het ondiepst gelegen laagpakket van de geselecteerde laagpakketten. Het komt uitsluitend in de Roerdal Slenk voor en lijkt op grond van een beperkte hoeveelheid gerapporteerde data over goede reservoir eigenschappen te beschikken (Tabel 2). De dikte van het Voort laagpakket ligt rond 210-230 m met een diepte van 900 tot 1500 m (Figuur 40). Met een temperatuurgradiënt van 32°C per kilometer zal de watertemperatuur tussen 30°C en maximaal 60°C liggen (). De theoretische energiehoeveelheid bedraagt maximaal 22-24 GJ/m<sup>2</sup>. Er is 30% kans op minimaal 4-6 MW bij een uitkoeling tot 25 °C (Figuur 43). Door de geringe diepteligging is de temperatuur te laag voor de toepassing van aardwarmte voor woningbouw.

Tabel 2. Porositeit en permeabiliteit van het Voort Laagpakket. Bron: Wiers, 2001 (HSW-01, KB-198), RGD, 1989 (AST-GT-02), TNO-NITG, 2000 (LOZ-01, DON-01).

Put	Diepte (m)	Dikte (m)	Porositeit	Permeabiliteit
AST-01	1056	212	27% (AST-GT-02)	225 mD (AST-01), 56 mD (KB-198),
AST-GT-02	1143	228	34% (HSW-01)	7 mD (AST-GT-02), 1585 mD (HSW-
KB-198	805	196	22% (KB-198)	01), 285 mD (LOZ-01), 345-501 mD
NDW-01	1026	214		(DON-01)

Tabel 3. Overzicht van weergegeven kaarten voor het Voort Laagpakket. Een compleet overzicht van de kaarten is te vinden in Bijlage C t/m G.

Overzicht kaarten Voort Laagpakket	
Dieptekaart	Figuur 40
Temperatuurkaart	Figuur 41
Theoretisch energiepotentieel	Figuur 42
P30 vermogen kassen	Figuur 43
P30 vermogen woningen	geen kaart (geen potentie)

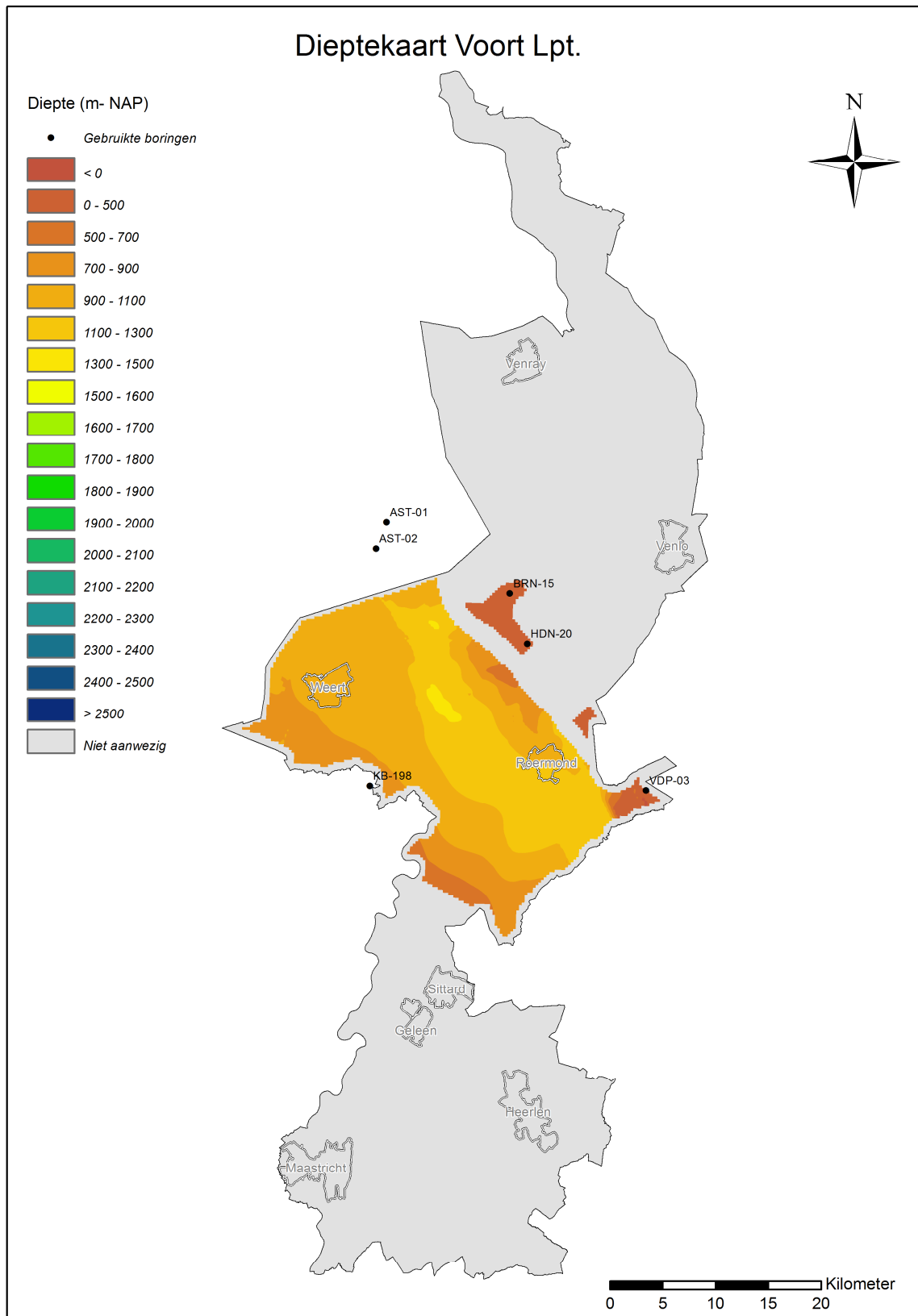
Bij een eerdere aardwarmteboring in Asten (RGD, 1989) bleek het **Vessem Laagpakket** (voorheen Zand van Berg genaamd) over zeer goede eigenschappen te beschikken. Het Vessem Laagpakket is in de Roerdal Slenk en deels op het Peel Blok afgezet. In de Roerdal Slenk is het laagpakket gemiddeld 20 m dik. De diepte varieert tussen van 1100 tot 1600 m (Figuur 44), waardoor de temperatuur rond 40-60 °C ligt (Figuur 45). Het aardwarmtevermogen is zeer beperkt (<1 MW). Daarnaast is de doorlatendheid niet voldoende hoog om uit het relatief dunne zandsteenpakket voldoende water te produceren.

Tabel 4. Porositeit en permeabiliteit van het Vessem Laagpakket (Bron: Wiers, 2001).

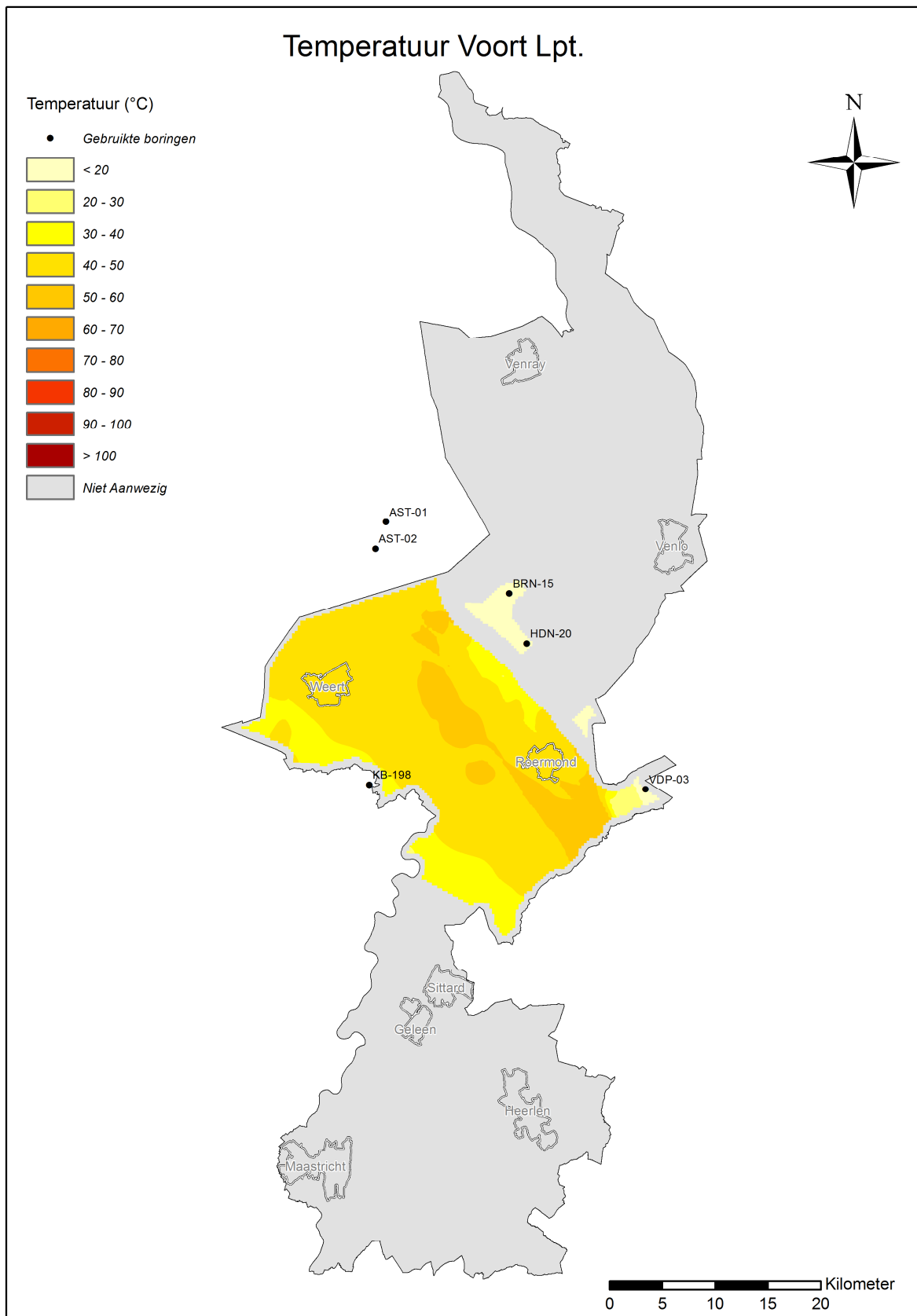
Put	Diepte (m)	Dikte (m)	Porositeit	Permeabiliteit
AST-01	1390	20	35% (AST-GT-02)	370 mD (AST-GT-02)
AST-GT-02	1494	20	33% (KB-198)	941mD (KB-198)
KB-198	1338	15	29% (HSW-01)	218 mD (HSW-01)
NDW-01	1048	24		

Tabel 5. Overzicht van weergegeven kaarten voor het Vessem Laagpakket. Een compleet overzicht van de kaarten is te vinden in Bijlage C t/m G.

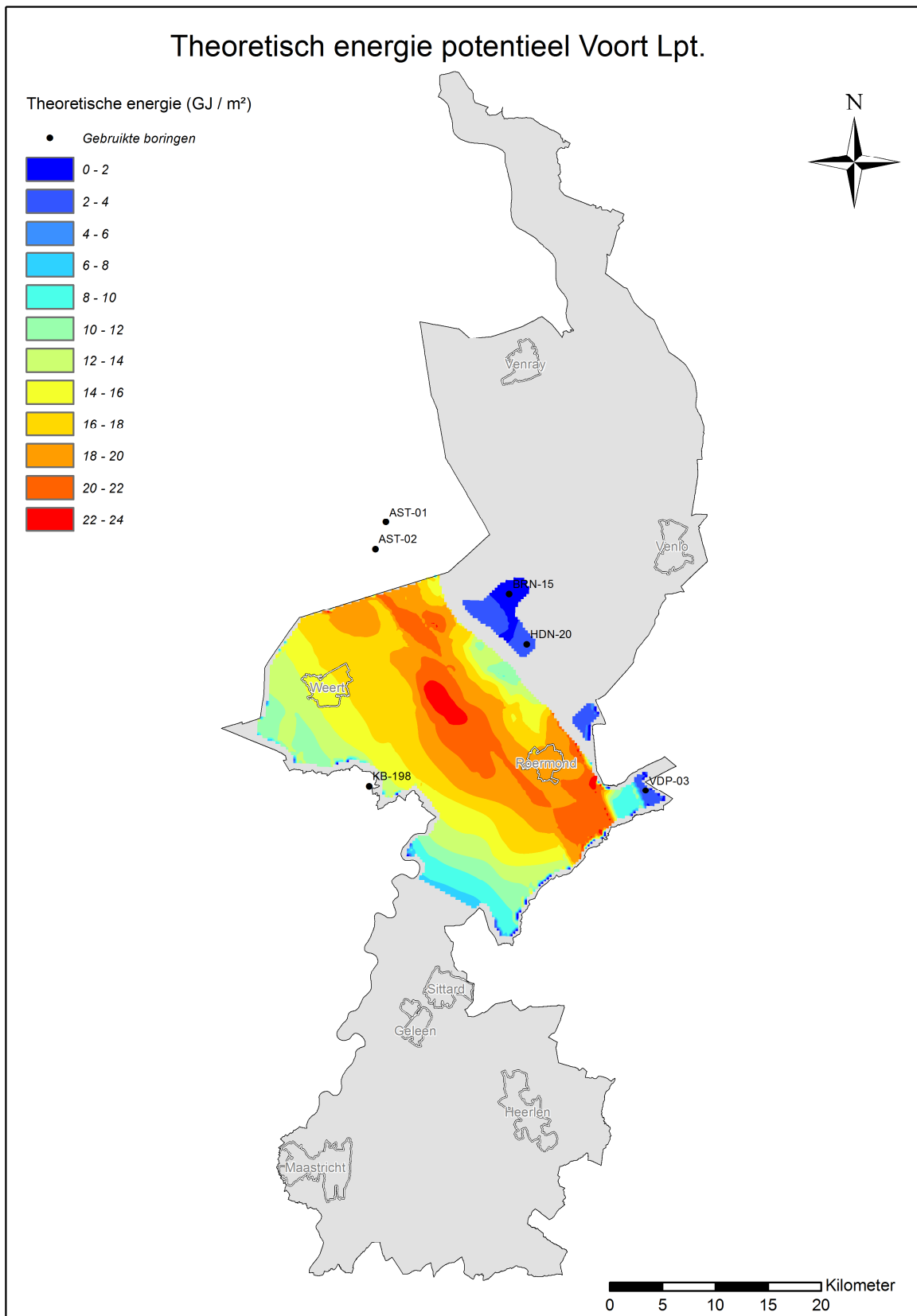
Overzicht kaarten Vessem Laagpakket	
Dieptekaart	Figuur 44
Temperatuurkaart	Figuur 45
Theoretisch energiepotentieel	geen kaart (geen potentie)
P30 vermogen kassen	geen kaart (geen potentie)
P30 vermogen woningen	geen kaart (geen potentie)



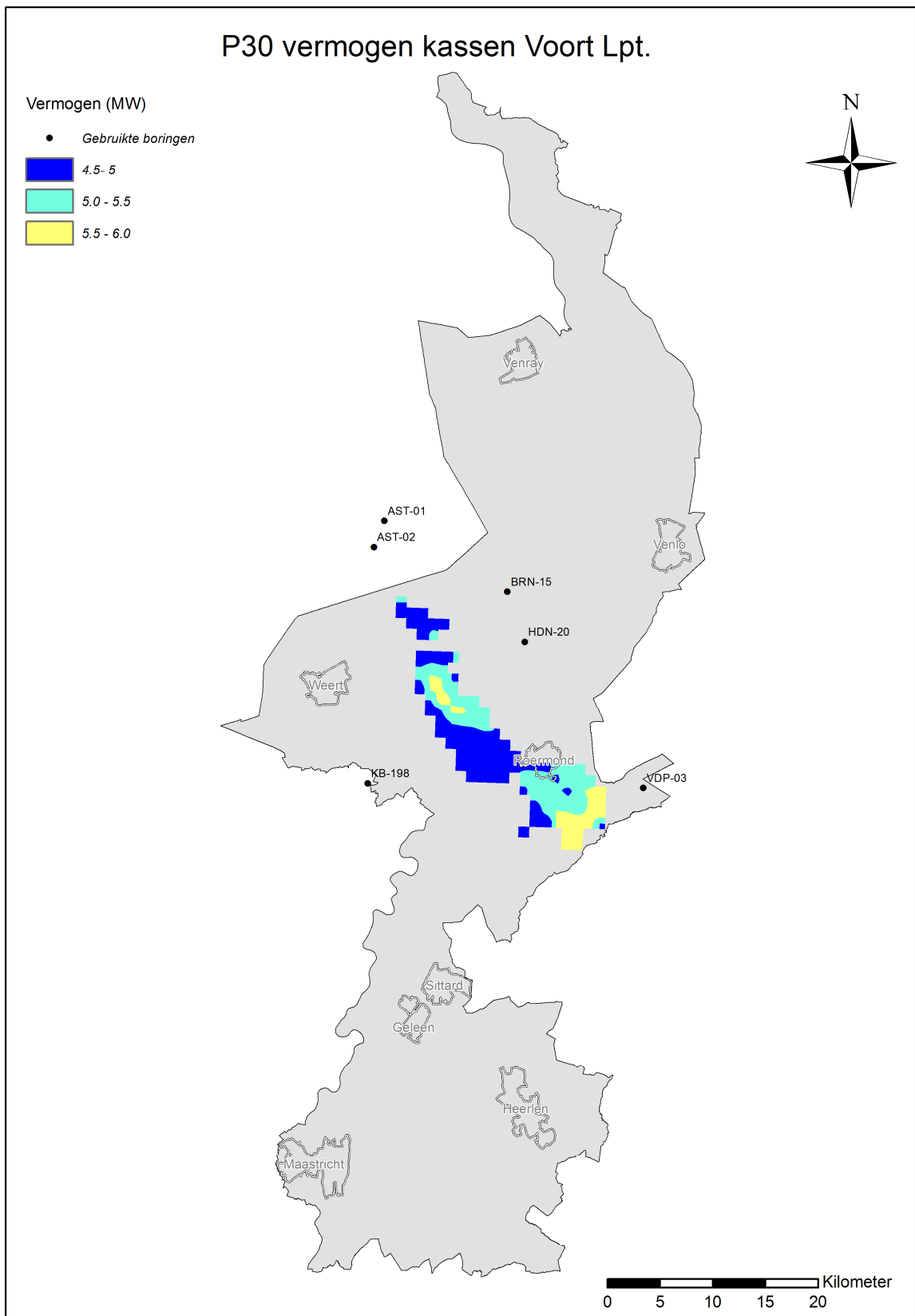
Figuur 40. Diepte van het Voort Laagpakket.



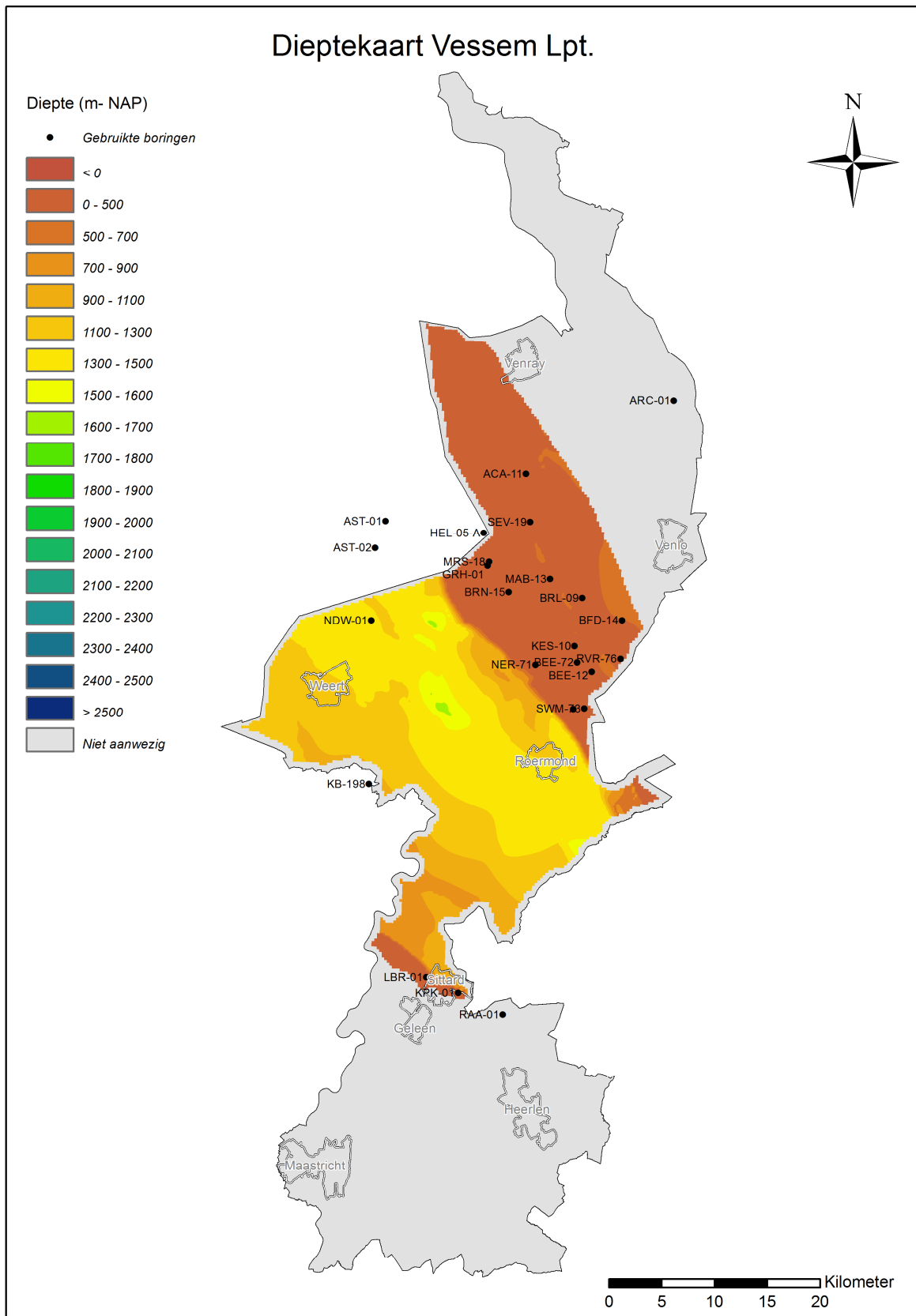
Figuur 41. Temperatuur van het Voort Laagpakket.



Figuur 42. Theoretisch energiepotentieel van het Voort Laagpakket.

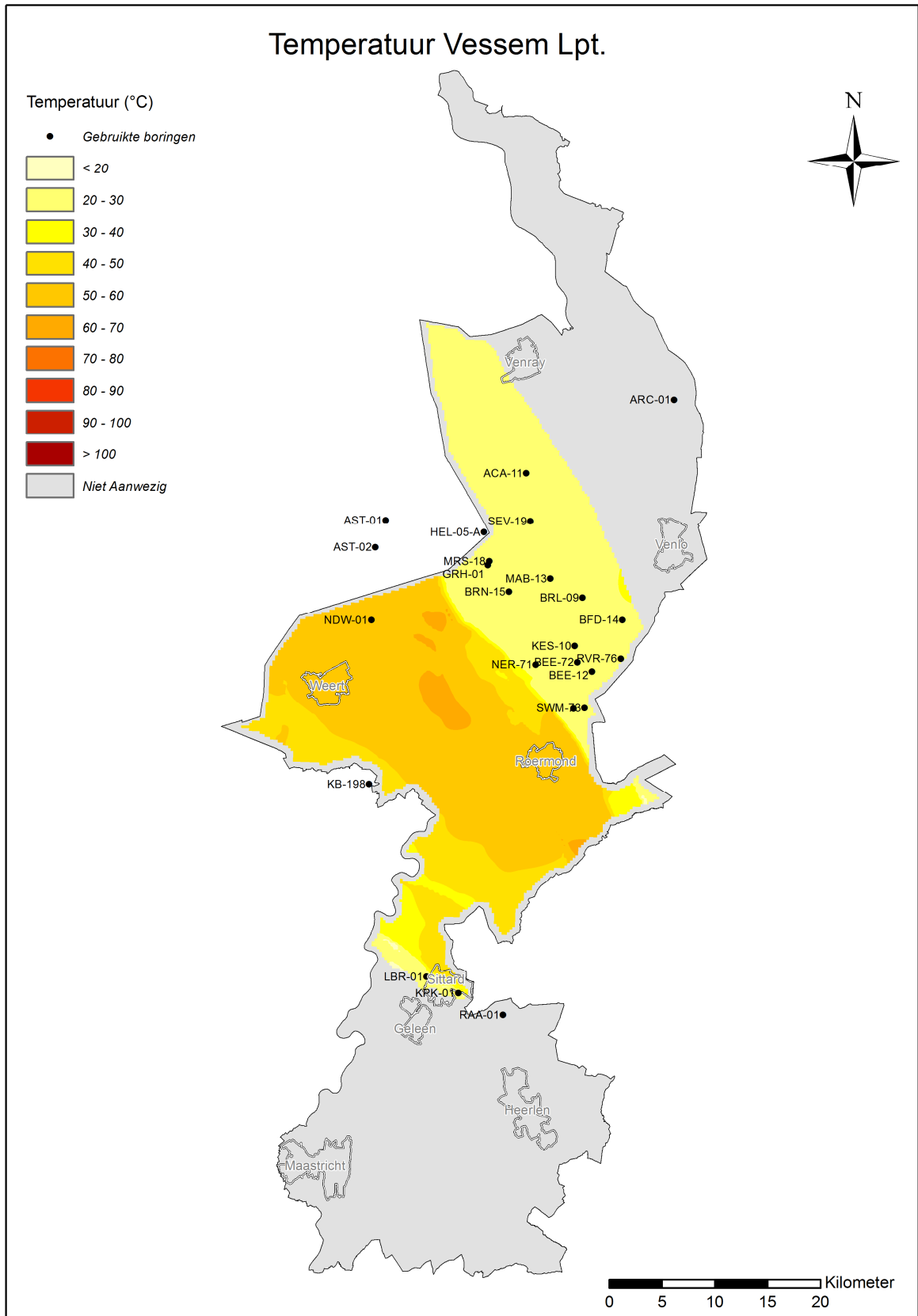


Figuur 43. De kans van 30% om minimaal het aangegeven vermogen te behalen in het Voort Laagpakket.



Figuur 44. Diepte van de top van het Vessem Laagpakket.





Figuur 45. Temperatuur van het Vessem Laagpakket.

### 15.1.2 *Onder-Germaanse Trias Groep*

De **Hardegsen Formatie** is de jongste eenheid binnen deze groep. Het sediment bestaat uit middelgrove, kalk- of kwarts-gecementeerde zandsteen. De dikte van het laagpakket varieert tussen 50 en 60 m (RGD, 1993).

De dikte van het **Boven-Detfurth Zandsteen Laagpakket** bedraagt ~20 m. Het laagpakket heeft een hoog kleigehalte dat een nadelig effect heeft op de reservoirkwaliteit (RGD, 1993).

Het **Onder-Detfurth Zandsteen Laagpakket** heeft een dikte van 10 tot 15 m. Het laagpakket bestaat uit een complex van middelfijne tot grofkorrelige, kwartszandstenen. Het kwartsgehalte in de zandsteen kan oplopen tot 60% (Geluk et al., 1996).

Het **Boven-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket** bestaat uit zeer schoon, cyclisch opgebouwde zand- en siltsteenlagen met enkele dunne kleilagen. Het pakket kan gecementeerd zijn met kalkmineralen. Het kleigehalte ligt rond 10%. In de putten AST-01 en NDW-01 is de dikte, 66 en 95 m dik.

Het basale deel van het **Onder-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket** bestaat over het algemeen uit grofkorrelige zandsteen en kan sterk met calciet gecementeerd zijn (Geluk, 2007; TNO-NITG, 2001). Dit kan de doorlatendheid beperken. De dikte van het laagpakket bedraagt gemiddeld 35 m.

Tabel 6. Overzicht van weergegeven kaarten voor de Onder-Germaanse Trias Groep. Een compleet overzicht van de kaarten is te vinden in Bijlage C t/m G.

Overzicht kaarten Onder-Germaanse Trias Groep	
<b>Diepte top van de Onder-Germaanse Trias Groep</b>	
Dieptekaart	Figuur 46
<b>Gemiddelde temperatuur Onder-Germaanse Trias Groep</b>	
Temperatuurkaart	Figuur 47
<b>Onder-Germaanse Trias Groep</b>	
P30 vermogen kassen	Figuur 48
P30 vermogen woningen	Figuur 49
<b>Nederweert Zandsteen</b>	
Dieptekaart	Figuur 50
Temperatuurkaart	Figuur 51

Uit de potentieberekeningen is gebleken dat het verwachte vermogen *per laagpakket* te laag zal zijn voor een economisch rendabel doublet (zie ook vermogenskaarten in Bijlage E). Dit heeft vooral te maken met de lage permeabiliteit van de laagpakketten. Gezamenlijk kunnen deze laagpakketten als één dik zandsteenpakket beschouwd worden, omdat zij niet of nauwelijks worden gescheiden door ondoorlatende (klei)lagen. In deze paragraaf wordt daarom de dieptekaart van de top van de Hardegsen Formatie getoond (Figuur 46). Die kan beschouwd worden als de top van het totale zandsteenpakket. De gemiddelde temperatuur van bovengenoemde laagpakketten ligt ongeveer halverwege de dikte tot maximaal 100°C in het diepste deel van de slenk (Figuur 47). De gezamenlijke dikte bedraagt ~200 m.

Hoe dieper een laagpakket begraven ligt, hoe groter de kans op verslechterde reservoir eigenschappen. Dit wordt veroorzaakt doordat de sedimenten onder druk van de bovenliggende afzettingen worden samengedrukt (compactie). Daarnaast treden met toenemende diepte mineralisatieprocessen op, die de porositeit en permeabiliteit doen afnemen. Omdat aan de randen van de Roerdal Slenk de afzettingen minder diep liggen, kunnen de reservoir eigenschappen daar beter zijn dan in de diepste delen van deze slenk (Figuur 48 en bijlage C & E). In de diepere delen (ruwweg >2000 m) wordt verwacht dat door cementatie en compactie de reservoir eigenschappen van de gesteenten van de Onder-Germaanse Trias Groep slecht zullen zijn, waardoor minder vermogen kan worden geleverd. Dit wordt bevestigd door de petrofysische analyse van put NDW-01 (Bijlage B).

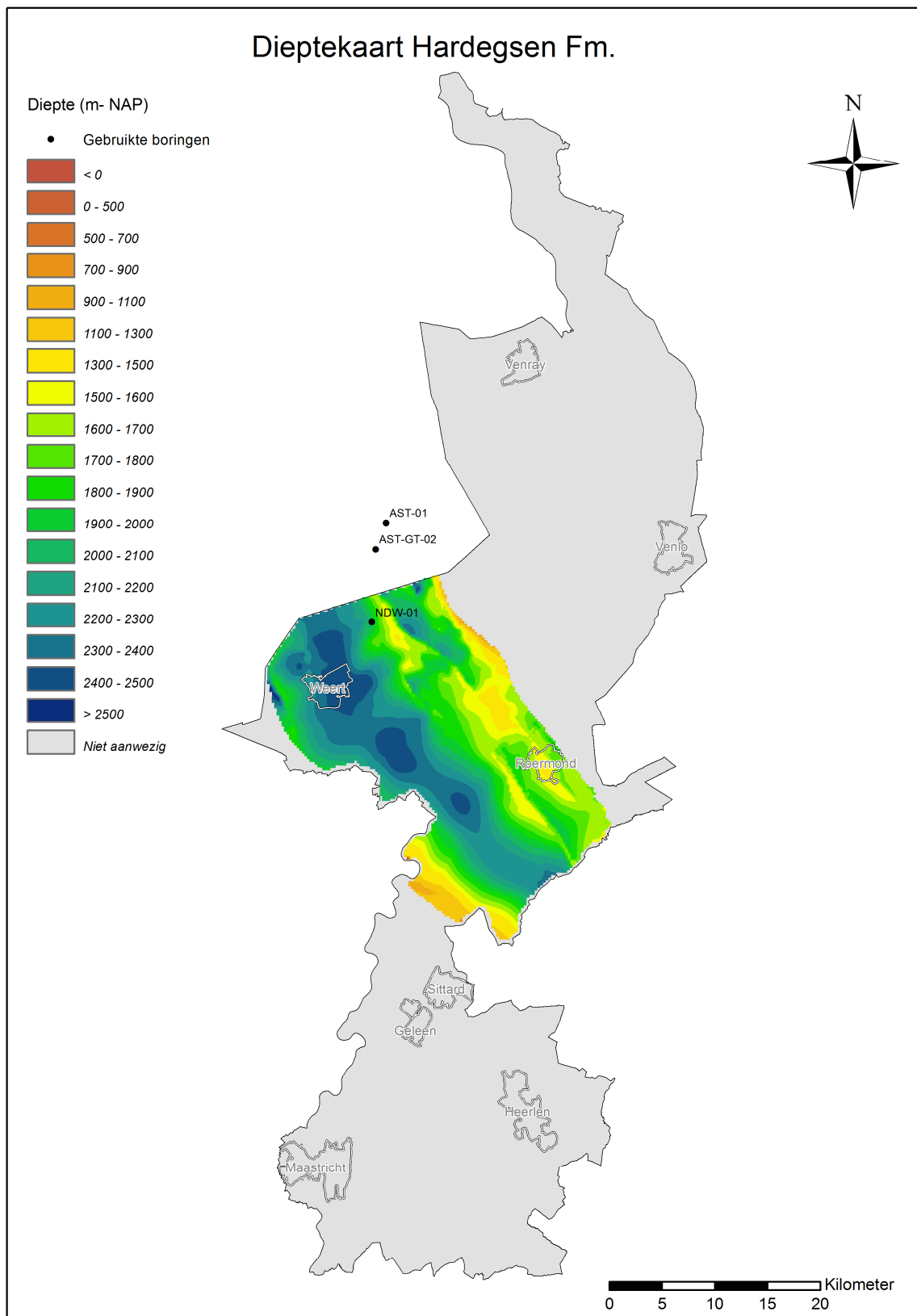
Ondanks de beperkte doorlatendheid is er een potentieel vermogen (30% kans) tot maximaal 10 MW voor kasverwarming (Figuur 48). Voor woningbouw is er maximaal 3 MW te winnen als uitgegaan wordt van een uitkoeling tot 40 °C (Figuur 49). Deze groep lijkt daarom de meeste potentie te hebben voor verwarming van kassen, indien uitgegaan wordt van de natuurlijke (lage) doorlatendheid. Het potentieel kan mogelijk verbeterd worden door reservoirstimulatie.

Aan de basis van de Onder-Germaanse Trias Groep ligt het **Nederweert Zandsteen Laagpakket**. In de putten Limbricht-01 (LBR-01), Meijel-01 (MEL-01), NDW-01 en AST-01, is dit laagpakket aangeboord. Het laagpakket bereikt een maximale dikte van 340 m en wordt afgescheiden van de eerder genoemde laagpakketten door een klei-siltsteen. De diepte van de top van dit laagpakket varieert tussen 1600 en meer dan 2500 m in de Roerdal Slenk. Buiten de slenk ligt het pakket ondieper.

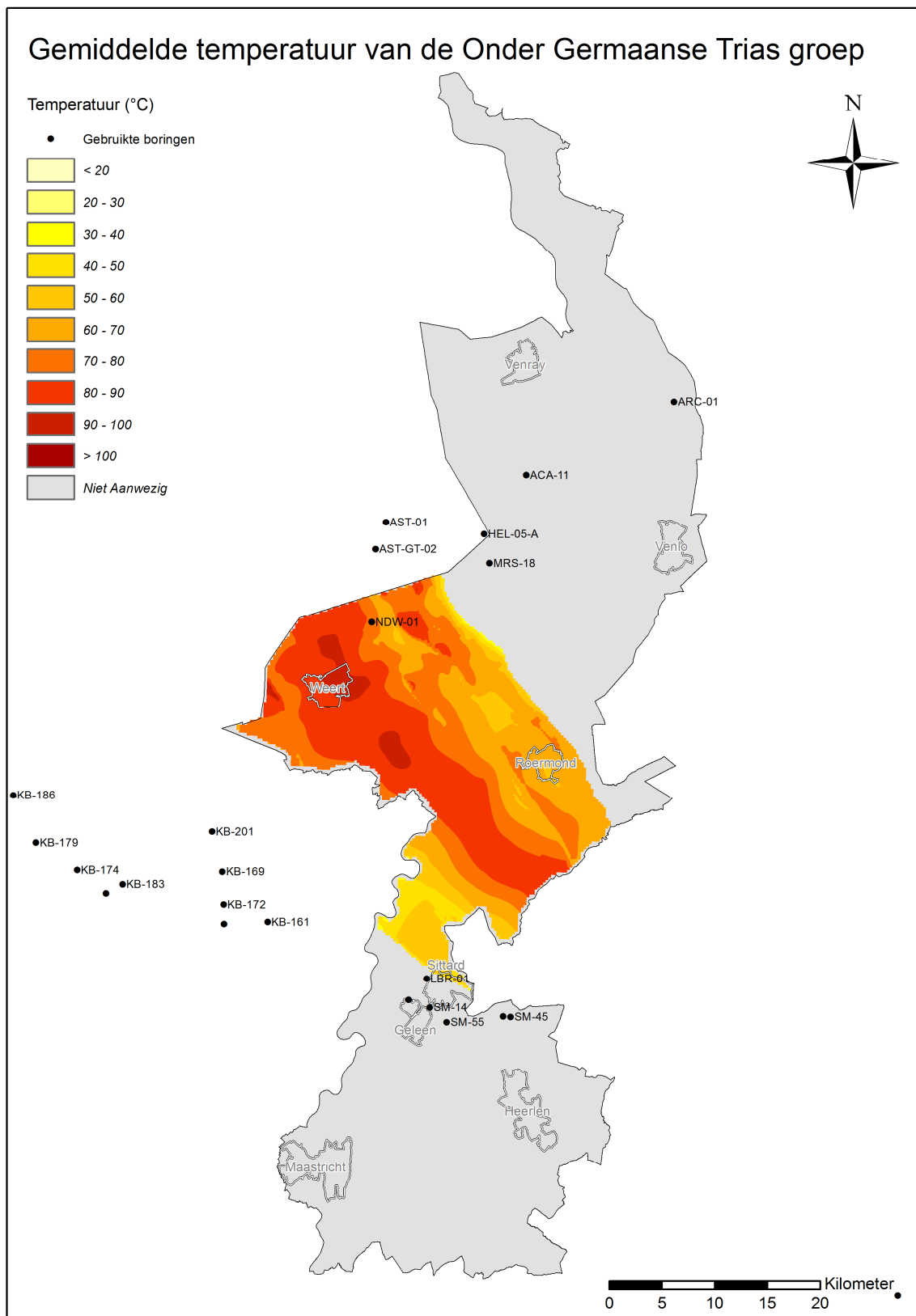
Op basis van boorbeschrijvingen van NDW-01 blijkt dat het pakket met kalk gecementeerd is (TNO-NITG, 2001). De doorlatendheid is vermoedelijk laag. Ook hier geldt dat de eigenschappen in de ondieper begraven delen mogelijk beter zijn. Door de grote onzekerheid van de reservoirkwaliteit is voor het Nederweert Zandsteen Laagpakket geen vermogenskaart gemaakt.

Tabel 7. Gegevens van de laagpakketten in de Onder-Germaans Trias Groep. Porositeit en permeabiliteit zijn gebaseerd op een petrofysische analyse van de loggegevens uit de put Nederweert-01 (Bijlage B). TD = einddiepte.

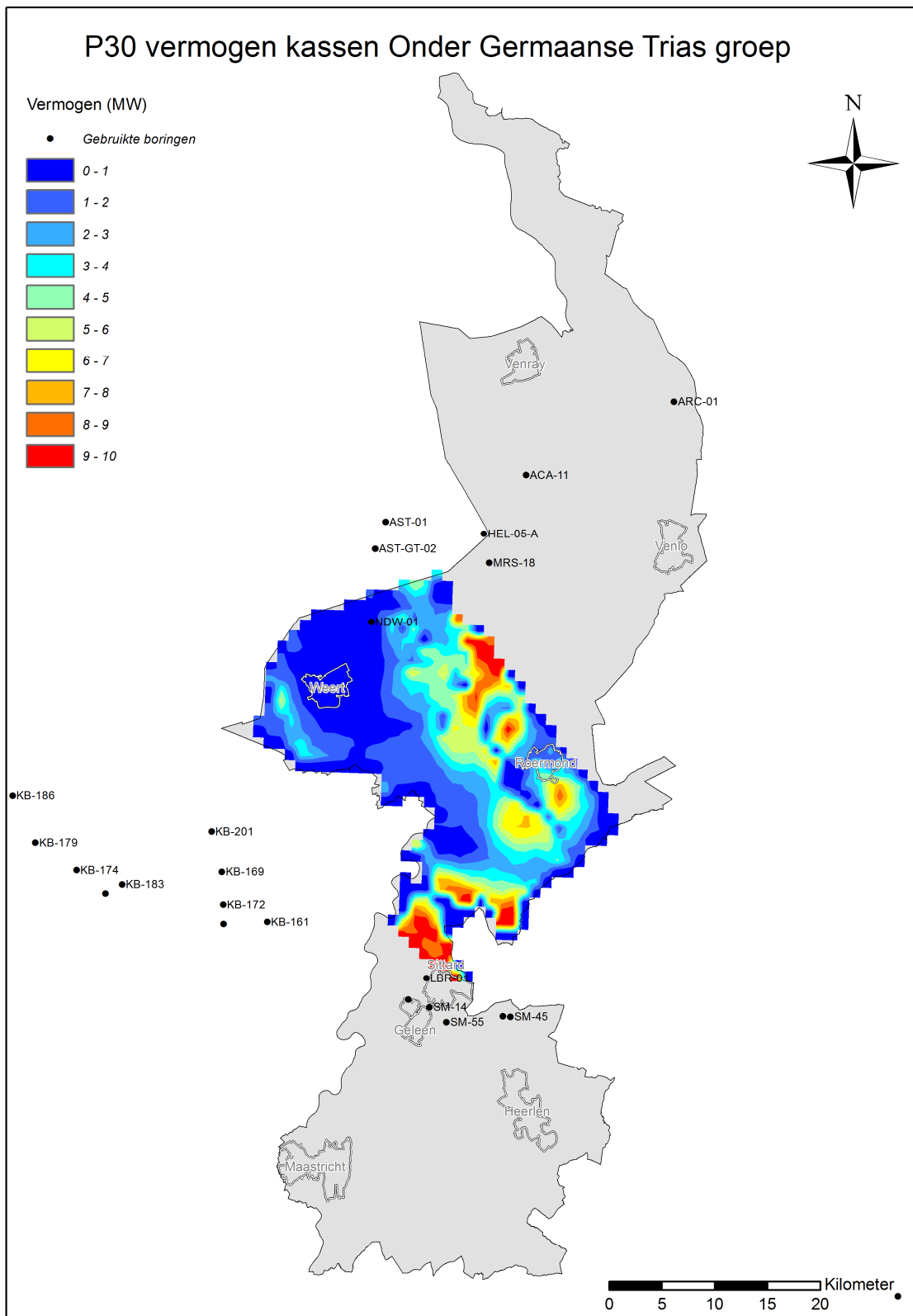
Laagpakket	Top (m)		Basis (m)		Dikte (m)		Porositeit (%)	Permeabiliteit (mD)
	AST-01	NDW-01	AST-01	NDW-01	AST-01	NDW-01	NDW-01	NDW-01
Hardeggen	2337	2035	2388	2092	51	57	10,7	0.3
Boven-Detfurth	2388	2092	2408	2111	20	19	11,5	2.5
Onder-Detfurth	2408	2111	2424	2120	16	9	12,1	2.4
Boven-Volpriehausen	2424	2120	2490	2215	66	95	12.4	10
Onder-Volpriehausen	2490	2215	2537	2237	47	22	0.06	0.026
Nederweert	2656	2280	2664	2572	8 (TD)	292	10	4.5



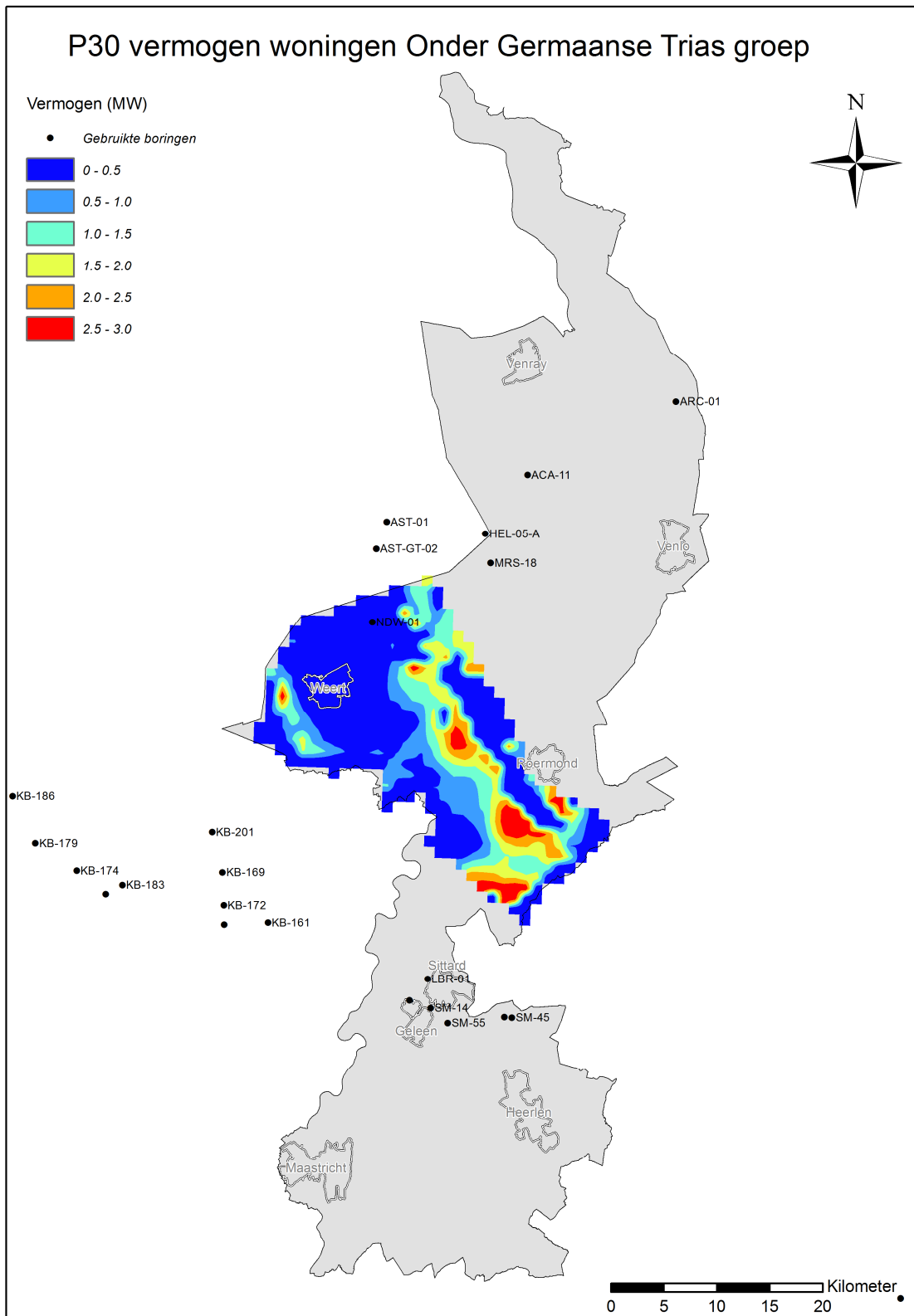
Figuur 46. Diepte van de top van de Hardegsen Formatie. De Hardegsen Formatie is het bovenste laagpakket van de Boven Germaanse Trias Groep.



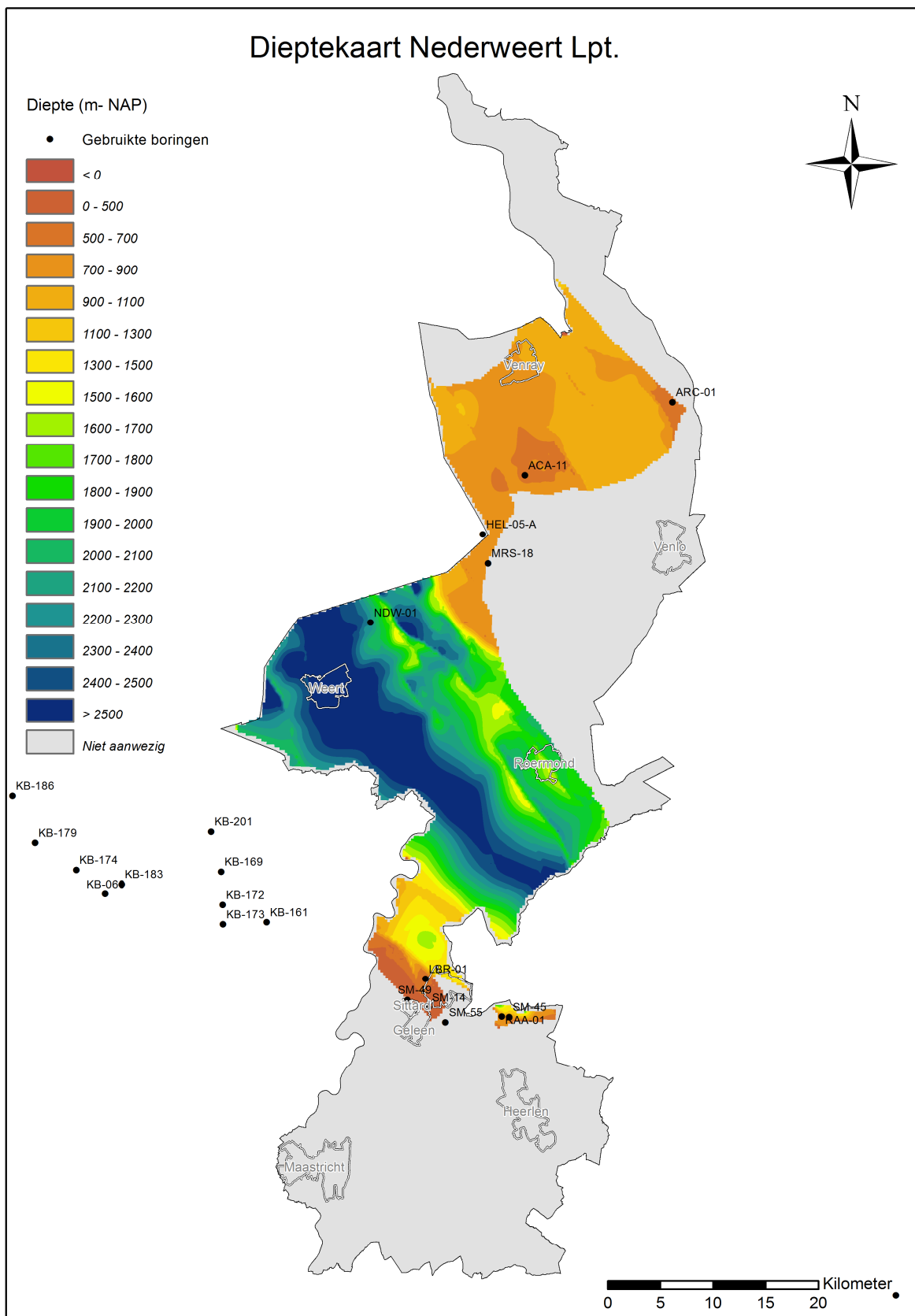
Figuur 47. Gemiddelde temperatuur van het de Onder-Germaanse Trias Groep.



Figuur 48. De kans van 30% om minimaal het aangegeven vermogen te behalen in de Onder-Germaanse Trias Groep bij verwarming van kassen (Let op; dit is het vermogen voor alle omschreven laagpakketten van het Onder-Germaanse Trias Groep excl. De Nederweert Laagpakket).

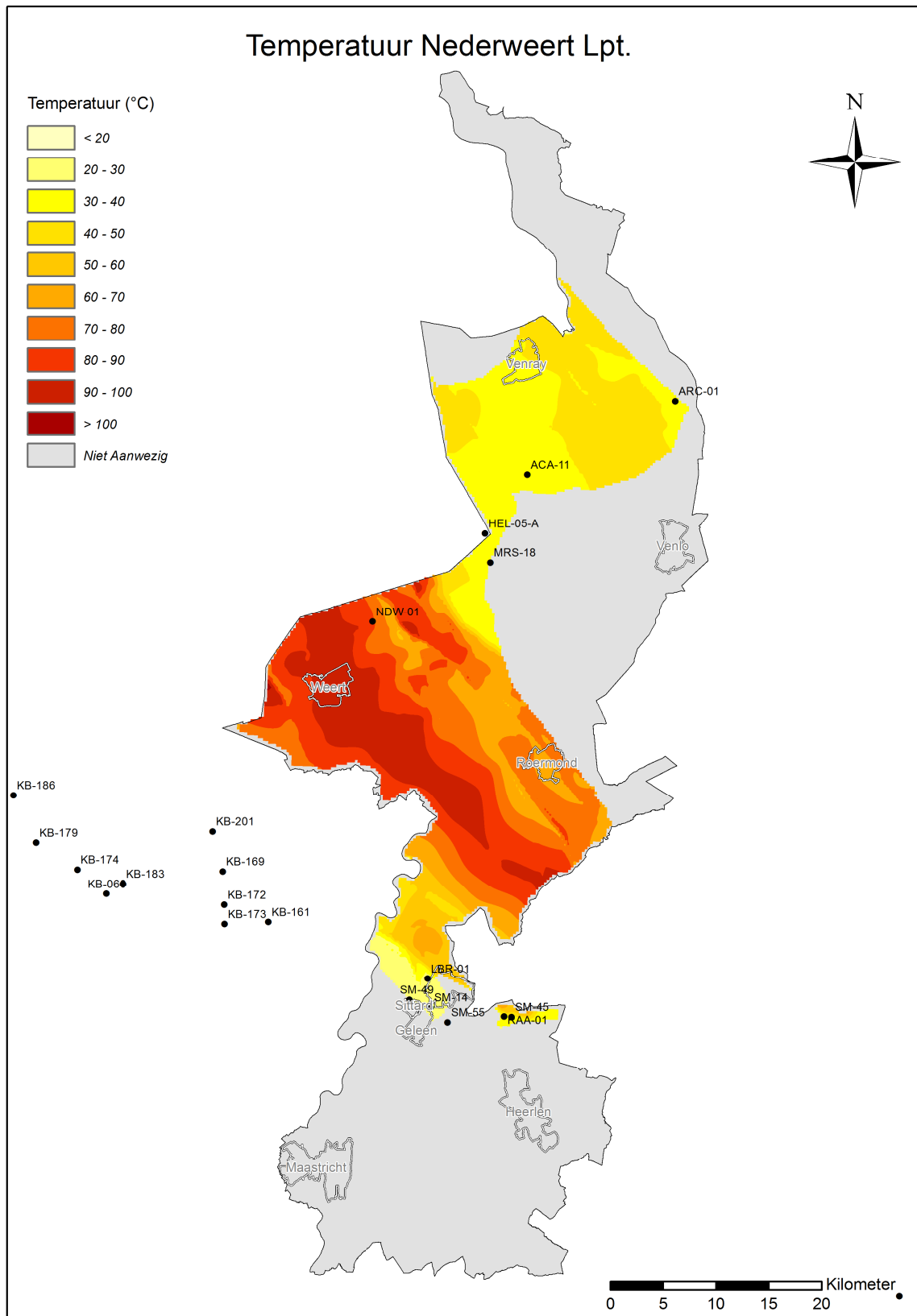


Figuur 49. De kans van 30% om minimaal het aangegeven vermogen te behalen in de Onder-Germaanse Trias Groep bij verwarming van woningen (Let op; dit is het vermogen voor alle omschreven laagpakketten van het Onder-Germaanse Trias Groep excl. De Nederweert Laagpakket).



Figuur 50. Diepte van de top van het Nederweert Zandsteen Laagpakket.





Figuur 51. Temperatuur van het Nederweert Zandsteen Laagpakket.

### 15.1.3 *Samenvatting aardwarmtepotentieel Onder-Germaanse Trias Groep*

In de Roerdal Slenk zijn zes laagpakketten van de Onder-Germaanse Trias Groep aanwezig met aardwarmtepotentie. De afzonderlijke laagpakketten van deze groep hebben naar verwachting een te lage doorlatendheid om een voldoende hoog vermogen te kunnen produceren. De zandsteen van de Hardegse Formatie, Onder- en Boven-Detfurth en Onder- en Boven-Volpriehausen Laagpakketten kunnen als één zandsteenpakket worden beschouwd. Door de gezamenlijke dikte van ongeveer 200 m is mogelijk wel enig vermogen te winnen. Wegens het vrij lage vermogen voor woningbouw lijkt deze groep vooral interessant voor kasverwarming.

Door de lage datadichtheid is de informatie over de reservoir eigenschappen van deze laagpakketten in de Roerdal Slenk beperkt. Alleen de put NDW-01 beschikt over een aantal logmetingen waarmee de reservoir eigenschappen berekend kunnen worden. Alle getoonde kaarten zijn gebaseerd op boorgegevens in het westelijke deel van de slenk en de put NDW-01. De onzekerheid in de reservoir eigenschappen en het vermogen nemen daarom oostwaarts toe. Verwacht wordt dat de porositeit en permeabiliteit vooral dieper dan 2000 m laag zullen zijn als gevolg van compactie en kalkcementatie. Aan de randen van de Roerdal Slenk is de reservoir kwaliteit mogelijk beter, omdat de laagpakketten hier minder diep begraven liggen en daardoor minder gecompacteerd zijn.

Door de mogelijk beperkte doorlatendheid van de gesteenten in de Onder-Germaanse Trias Groep is het aan te bevelen om bij haalbaarheidsstudies naar deze groep reservoir stimulatie als optie mee te nemen.

### 15.1.4 *Limburg Groep*

In België wordt de **Neeroeteren Formatie** gekarakteriseerd door een relatief hoge porositeit van 10-20% (Putten-113, Opglabbeek-161, Gruitrode-172; Thorez & Bless, 1977; Haenel & Staroste, 1988). De permeabiliteit varieert sterk en kan oplopen tot maximaal 200 mD (Haenel & Staroste, 1988). De maximale dikte die aangetoond is in Belgische exploratieboringen bedraagt 300 m (Laenen, 2002). De diepte varieert tussen 650 en 900 m (Dusar & Houllberghs 1981; Dusar et al. 1987a).

De Neeroeteren Formatie is ook bekend uit Nederland en komt mogelijk in Midden Limburg voor. Verwacht wordt dat de reservoir kwaliteit van het deze formatie door de diepe ligging veel minder zal zijn dan de waarden die uit België bekend zijn. Er is in Nederland geen put informatie beschikbaar om dit te verifiëren. Er bestaat één seismische lijn in Limburg in de regio waar de Neeroeteren Formatie kan voorkomen. Het is echter niet mogelijk om op basis van deze lijn en Belgische lijnen de Neeroeteren Formatie aan te tonen. De aanwezigheid van de formatie blijft daarom uiterst onzeker, waardoor deze niet verder gekarteerd is.

Figuur 52. Belgische putten met porositeit en permeabiliteitlogs uit Opglabbeek-161 en Gruitrode-172 (Wouters, 1989).

## 15.2 Peel-Venlo en Zuid-Limburg Blokken

Op de Peel-Venlo en Zuid-Limburg Blokken heeft vooral de **Kolenkalk Groep** aardwarmtepotentie. De kans op aanwezigheid van verkarsting, dolomitatie en splijtgevoeligheid van de kalksteen maakt de Kolenkalk Groep een potentiële target voor aardwarmtewinning. In België is een aantal putten geboord waarmee warmte wordt gewonnen uit deze groep. In 2011 zijn twee aardwarmteputten in het kassengebied Californië (Grubbenvorst) geboord met de Kolenkalk Groep als doel. De resultaten uit puttesten wijzen op een goede doorlatendheid van het gesteente (geothermie.nl).

Om een verwachting uit te kunnen spreken over de aardwarmtepotentie van de Kolenkalk Groep, wordt eerst de geologische situatie tijdens de ontwikkeling van de kalkplatformen besproken. Dit is essentieel om de beschrijving van de aardwarmtepotentie beter te kunnen begrijpen. In paragraaf 15.2.2 worden de ervaringen uit België besproken alvorens in meer detail te kijken naar de potentie in Limburg.

Figuur 53. Schematische weergave van het landschap tijdens het einde van het Dinantien, de geologische tijd waarin de afzettingen van de Kolenkalk Groep werden afgezet. Blauw: kalkplatformen (en latere kalksteen), groen: mariene kleiafzettingen.

#### 15.2.1 *Geologische situatie Kolenkalk Groep*

De kalksteen uit de Kolenkalk Groep is afgezet tijdens het Dinantien (360-330 miljoen jaar geleden). Nederland bevond zich destijds in een tropisch, ondiep marien milieu (Figuur 53). In de tropische zee ontstonden kalkplatformen. De locatie waarop een kalkplatform ontstond werd beïnvloed door hoogteverschillen in de zeebodem als gevolg van breukbeweging (Vandenberghe, 1984; Geluk et al., 2007). Het Peel-Venlo Blok en het Brabantmassief, waar het Zuid-Limburg Blok deel van uit maakt, waren destijds ondieptes in de tropische zee. In die ondieptes zijn de kalkplatformen ontstaan (Figuur 54). Later gedurende het Dinantien, vielen de kalkplatforms gedeeltelijk droog waardoor verkarsting als gevolg van percolerend regenwater kon optreden (Geluk et al., 2007).

Na een periode waarin weinig sediment werd afgezet en verkarsting optrad, begon tijdens het Namurien (330-315 miljoen jaar geleden) de zeespiegel geleidelijk te stijgen. De kalkplatforms kwamen onder zeeniveau te liggen en de fase van verkarsting eindigde. De platformen werden afgedekt met een laag slecht doorlatende mariene klei (Figuur 54).

Figuur 54. Schematisch model van de sedimentatiegeschiedenis gedurende het Dinantien en Namurien. Kalkplatformen ontstonden in de ondieptes en vielen droog waarna verkarsting optrad. Tijdens het Namurien werden de platforms afgedekt door mariene afzettingen (op basis van figuur uit Geluk et al., 2007).

#### 15.2.2 *Aardwarmte uit Kolenkalk Groep in België*

In België is de aardwarmtepotentie van de Kolenkalk Groep op meerdere plaatsen aangetoond. In de regio van Mons werden in 1899 warmwaterbronnen ontdekt tijdens mijnbouwactiviteiten in Baudour. Tijdens het graven van galerijen doorkruiste men een breukzone waaruit warm water met een temperatuur van 53°C ontsnapte. In 1972 doorboorde de exploratieput Saint-Ghislain op 2500 m een zeer permeabele zone in de Kolenkalk Groep. In 1986 werd de put in gebruik genomen. De aardwarmteput heeft een vermogen van 15 MW<sub>th</sub>, een watertemperatuur van 73°C en produceert jaarlijks 16700 MW<sub>n</sub> bij een debiet van 95 m<sup>3</sup>/u (VITO, 2010). De boring voorziet in de verwarming van schoolgebouwen, een sporthal en een ziekenhuis van de gemeente Saint-Ghislain en Hornu. Het afgekoelde water van 40°C wordt niet in het reservoir geïnjecteerd, maar door diverse andere gebruikers benut alvorens het in de Hornu te lozen (VITO, 2010). In dezelfde regio zijn in Douvrain en Ghlin ook aardwarmteputten in hetzelfde reservoir geboord.

Ook in het noorden van België, in Beerse-Merksplas is de Kolenkalk Groep aangeboord voor aardwarmtewinning. De put produceert water uit de Kolenkalk Groep op een diepte van 1760 m water met een temperatuur van 72°C en een

debiet van 75 m<sup>3</sup>/u. De doorlatende zone is het gevolg van barsten en splijting van de kalksteen (VITO, 2010). Overigens werd een debiet 200 m<sup>3</sup>/u verwacht.

De boringen Loenhout-Heibaart en Turnhout hebben sterke verkarsting aangetoond aan de top van de Kolenkalk Groep. De sterk verkarste zone in Loenhout wordt gebruikt voor gasopslag. De extreem hoge doorlatendheid van 2-5 D (2000-5000 mD) is veroorzaakt door verkarsting van spleten en oplossingsholten (Vandenberghe et al., 1986). Op basis van de putinformatie lijkt er een relatie te bestaan tussen de jongere afzettingen uit het Namurien en verkarsting van de Kolenkalk Groep. Daar waar afzettingen uit het Namurien afwezig zijn, of waar er aanwijzingen zijn dat sequenties ontbreken, wordt sterke verkarsting waargenomen. Verkarsting is echter niet uit te sluiten op plaatsen waar wel afzettingen uit het Namuur bestaan. In de Belgische put Beerse-Merksplas is bijvoorbeeld verkarsting aangetroffen ondanks de aanwezigheid van ongeveer 400 m dikke kleisteen uit het Namurien.

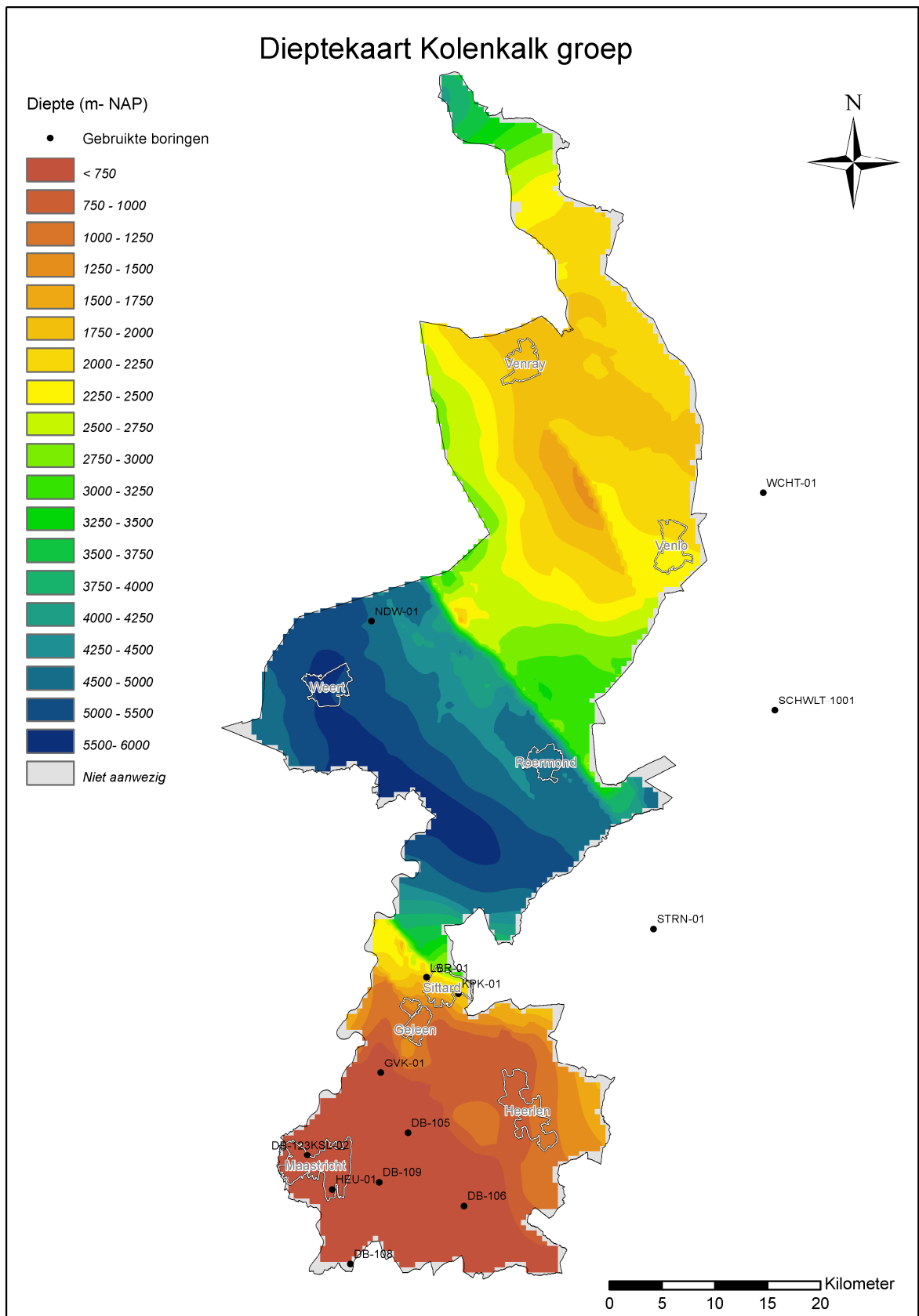
### 15.2.3 *Verkarsting Kolenkalk Groep in Limburg*

#### 15.2.3.1 *Zuid-Limburg Blok*

In Zuid-Limburg hebben de boringen Kastanjelaan-02 (KSL-02), Heugem-01 (HEU-01), Geverik-01 (GVK-01) en verschillende Diep-Boringen (DB-105, DB-106, DB-108, DB-109 en DB-123) de Kolenkalk Groep aangeboord (Figuur 55). In de waterputten KSL-01 HEU-01, Thermae2000 en 2002 is verkarsting aangetroffen (NGV, 1989, Krings & Langguth, 1987).

De kernen, die genomen zijn uit boring GVK-01, laten een geleidelijke overgang van kalksteen naar kleiige afzettingen uit het Namurien zien. Bij GVK-01 is geen verkarsting aangetoond. De onafgebroken sedimentatie en het ontbreken van verkarsting in deze put suggereren dat deze locatie zich op een helling van een kalkplatform bevond (Figuur 56). Verkarsting wordt ten noorden van GVK-01 daarom niet verwacht (TNO, 2011).

Ter hoogte van GVK-01 ligt de bovenkant van de Kolenkalk Groep op ongeveer 900 m diepte. Naar het zuiden komt de kalksteen steeds dichterbij het maaiveld te liggen. In boring KSL-02 ligt de top op 200 m diepte en in boring HEU-01 op 114 m diepte. Verkarsting op het Zuid-Limburg Blok is vooral in de ondiepere delen van de Kolenkalk Groep te verwachten, in de regio tussen de Diepboringen 105, 106, 109 en 123, HEU-01, KSL-01 en GVK-01. Doordat naar verwachting de verkarste kalksteen op veel plekken ondiep ligt, zal de temperatuur van het water hierin onder de 40 °C liggen. Deze temperatuur is onvoldoende voor een rendabele aardwarmte installatie (Figuur 57).



Figuur 55 Diepte van de top van de Kolenkalk Groep.

Figuur 56. Schematische weergave van karstverschijnselen langs een kalkplatform. De rode cirkel geeft de milieuomstandigheden aan die overeenkomen met de afzettingen die in boring Geverik-01 zijn aangetroffen (Bureau of Economic Geology, Texas).

#### 15.2.3.2 *Peel-Venlo Blok*

Op basis van seismische profielen en logmetingen uit steenkoolboringen lijkt de geologische situatie van het Peel-Venlo Blok analoog te zijn aan die van de Kolenkalk Groep zoals aangetroffen in België en in het zuiden van Limburg (TNO-NITG, 2001). De drie recente boringen in Californië (Grubbenvorst) zijn de eerste boringen die informatie geven over de Kolenkalk Groep op het Peel-Venlo Blok. De gegevens van deze boringen zijn confidentieel tot in 2017 en zijn niet voor deze studie gebruikt. Verder zijn op dit blok geen putten geboord tot de Kolenkalk Groep of dieper.

Een aantal Duitse boringen bevat informatie over de Kolenkalk Groep: Wachtendonk-01 en Schwalmtal-1001. Verkarsting is aangetoond in de put Wachtendonk-01. Bij Schwalmtal-1001 is, net als in de put GVK-01, een geleidelijke overgang te zien van kalksteen naar de slecht doorlatende afzettingen van het Namurien. Er is geen verkarsting aangetroffen.

Via persberichten zijn enkele resultaten van de booractiviteiten bij Californië naar buiten gebracht. Tijdens het boren van de put CAL-GT-01 is op een diepte van 1600 m een verkarste zone in de Kolenkalk Groep aangetroffen (groentennieuws.nl). Productietests laten een zeer hoog debiet zien van 300 m<sup>3</sup>/u met een watertemperatuur van 60°C (geothermie.nl). Deze resultaten tonen aan dat goed doorlatende zones in de Kolenkalk Groep aanwezig zijn op het Peel-Venlo Blok.

#### 15.2.3.3 *Roerdal Slenk*

In de Roerdal Slenk is de kans op verkarsting klein. Tijdens het Dinantien is de slenk gaan dalen. Daardoor heeft de slenk voortdurend onder water gelegen en kon geen verkarsting optreden. Door de voortdurende daling van de Roerdal Slenk was de waterdiepte gemiddeld groter, waardoor de kalksteen waarschijnlijk kleiiger is. Er zijn geen boringen die de Kolenkalk Groep op deze diepte hebben aangeboord en dit kunnen bevestigen.



#### 15.2.4 *Spleetporositeit*

De Kolenkalk Groep is zeer bros en slijtgevoelig (TNO, 2011) en er kan zich daarom in combinatie met (actieve) breuksystemen een uitgebreid poreus netwerk van barsten en spleten ontwikkeld hebben. De gecreëerde spleetporositeit kan eventueel versterkt worden door dolomitisatie en verkarsting. Bij aardwarme projecten in België is dit ook aangetoond (paragraaf 15.2.2). Actieve breuken zijn interessant, omdat door beweging en vloeistofstromingen langs de breukvlakken de doorlatendheid mogelijk gewaarborgd blijft.

In Limburg is watermigratie langs breuken waargenomen in de waterputten Thermae 2000 & 2002 in de buurt van Valkenburg. De watertemperatuur bleek met ~25 °C relatief hoog te zijn, wat wijst op snel opstijgend warm water langs een spleetsysteem (Sobczak, M., 1989). Ook in de put GVK-01 hebben putanalyses aangetoond dat langs spleten, in het diepte interval 1125 tot 1687 m, stroming van hydrothermaal water heeft plaatsgevonden (RGD, 1987).

De Limburgse ondergrond kent vele breuken met een groot verzet en velen lopen door tot dicht aan het maaiveld. Breuken als de Heerlerheide-, Geleen-, Felbiss-, Maaseik- en Peelrandbreuk kunnen potentiële doorlatende zones vormen (Figuur 57). Ook buiten de Roerdal Slenk worden enkele kleine bevingen geregistreerd, waaronder op het Peel-Venlo Blok. Hoewel het aantal bevingen hier beperkt is, kunnen de Tegelenbreuk en de breuken ten noorden daarvan toch als actief beschouwd worden, omdat zij tot in de jongste afzettingen doorlopen. Boordocumenten van Schwalmtal-1001 rapporteren een spontaan verlies van boorvloeistof. De hoog doorlatende zone blijkt veroorzaakt te zijn door spleetporositeit langs een NW-ZO georiënteerde breuk. De put SWLT-1001 ligt in het verlengde van het Peel-Venlo Blok. Het is daarom goed mogelijk dat spleetporositeit ook aanwezig is langs de breuken in dit blok.

In Californië heeft de boring CAL-GT-01 op een diepte 2400 m een tweede doorlatende zone aangeboord (californie.nu). De temperatuur van het water is hier 80°C. Omdat deze boring in de buurt van de Tegelen Breuk is geboord lijkt het aannemelijk dat de doorlatende zone veroorzaakt wordt door spleetporositeit nabij de breuk, zoals in de put SWLT-1001. De aanwezigheid van dolomietgesteente kan ook voor een doorlatende zone zorgen (zie volgende paragraaf).

In de Kolenkalk Groep bestaat een risico op weinig connectiviteit tussen de spleten en barsten door mineralisatie en afzetting van breukkleien, zoals uit druktesten in de put GVK-01 is gebleken. Bij de 'actieve' Heerlerheidebreuk ten noorden van de GVK-01 kan, door een grotere kans op spleetporositeit, de connectiviteit mogelijk beter zijn (TNO, 2011).

De breuken in de ondergrond van Limburg zijn in principe potentiële locaties voor aardwarmtewinning (Figuur 57). Hierbij moet opgemerkt worden dat door de beperkte seismische dekking waarschijnlijk niet alle breuken gekarteerd zijn. Bij locatie-specifiek onderzoek is daarom nieuw seismiek onderzoek nodig.

#### 15.2.5 *Permeabele zones door dolomitisatie*

In de Kolenkalk Groep komen zones voor waarin kalksteen is omgezet in dolomiet. Omdat dolomiet kristallen kleiner zijn dan calciet, heeft dolomiet vaak een hogere (secundaire) porositeit dan kalksteen. Kernbeschrijvingen uit Belgische en Duitse

boringen tonen aan dat daar aan de basis van de Kolenkalk Groep poreus dolomitisch gesteente voorkomt.

De basis van de Kolenkalk Groep, het Beveland Laagpakket, bestaat uit een sequentie van dolomieten met lokaal goed ontwikkelde porositeit (Geluk, 2007). Er zijn weinig boringen die het Beveland Laagpakket hebben aangeboord. Rondom de provincie hebben alleen de putten KSL-01 en de Duitse boring Wachtendonk-01 (WCHT-01) het Beveland Laagpakket aangeboord. Dolomiet wordt ook aangetroffen in de buurt van breukzones (SWLT-1001). Ook in de put GVK-01 komt sterke secundaire dolomitatie langs breukvlakken voor (RGD, 1987).

#### 15.2.6 *Aardwarmtepotentie Kolenkalk Groep in Limburg*

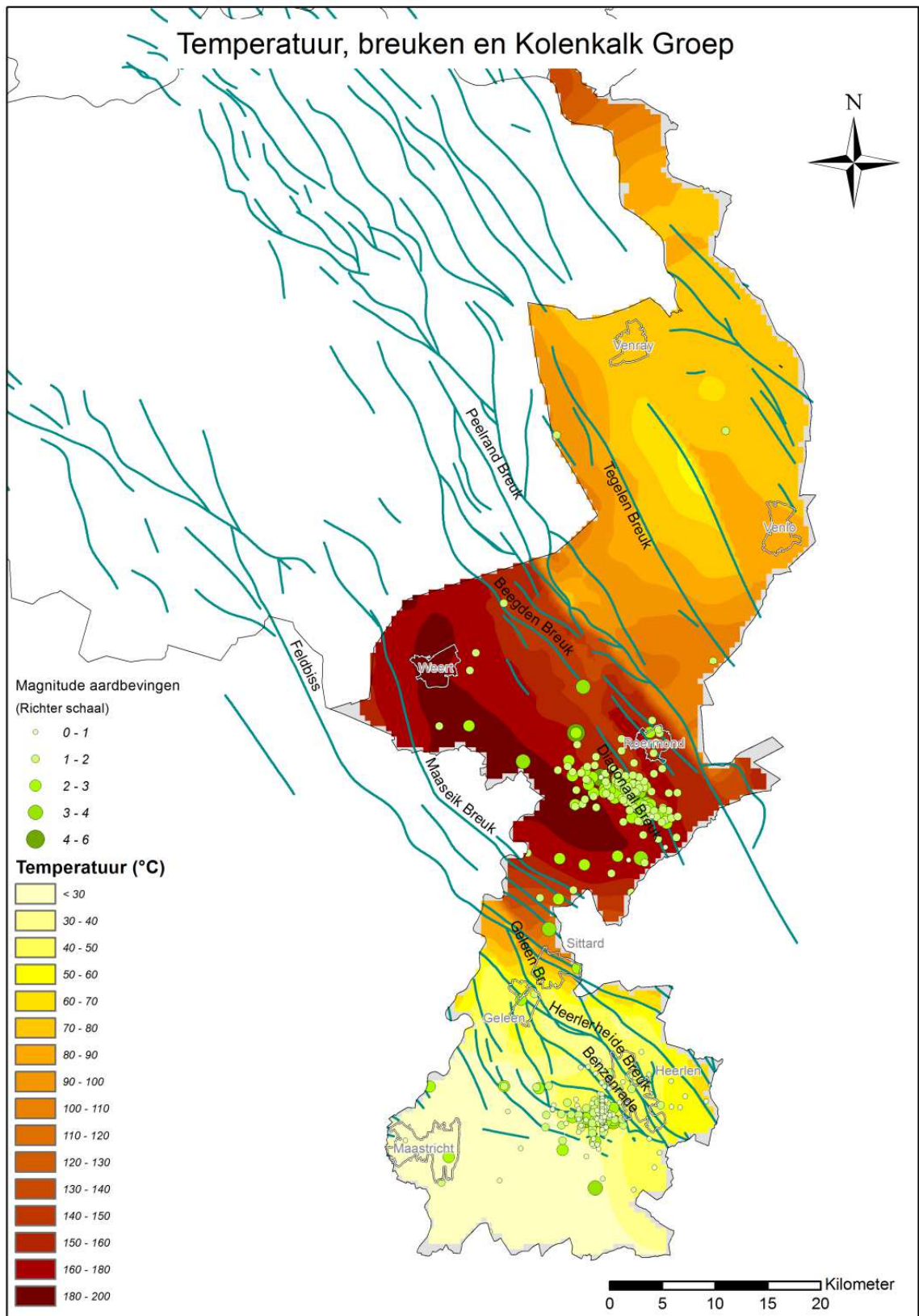
Uit bovenstaande paragrafen blijkt dat in de Kolenkalk Groep verschillende zones met doorlatend gesteente aangetroffen kunnen worden. De kans op verkarsting is het grootst op het Peel-Venlo Blok. Op dit blok kunnen spleetporositeit en dolomiet langs breuken aangetroffen worden. De diepte van de top van de Kolenkalk Groep op het Peel-Venlo Blok varieert tussen 1500 en 3000 m (Figuur 56). De temperatuur fluctueert tussen 50 en 140°C (Figuur 57). De dikte van de Kolenkalk Groep is meer dan 500 m. Bij de Californië boringen is men uitgegaan van een totale dikte van 800 m (Californie.nu). Door de beperkte hoeveelheid seismische lijnen in deze regio is de onzekerheid van de kartering groot.

Op het Zuid-Limburg Blok is verkarsting in het zuiden aanwezig, maar dit wordt voornamelijk verwacht in de regio van Maastricht. De temperaturen zijn hier te laag voor een rendabele aardwarmte installatie. Aardwarmtepotentie op het Zuid-Limburg Blok zal daarom gezocht moeten worden in spleetporositeit langs (actieve) breuken in de zone waar de temperaturen boven 40°C liggen (Figuur 57).

Gedolomitiseerde lagen aan de basis van de Kolenkalk Groep kunnen voor een verhoogde doorlatendheid zorgen. De aanwezigheid van dergelijke lagen kan niet worden aangetoond, omdat maar weinig boringen de basis van de Kolenkalk Groep volledig hebben doorboord.

In de Roerdal Slenk zullen de afzettingen van de Kolenkalk Groep kleiiger zijn. Doorlatend gesteente als gevolg van verkarsting of dolomitatie is hier minder waarschijnlijk (VITO, 2010). De grootste kans op secundaire doorlatendheid in dit dieptebereik is te verwachten langs de grote actieve randbreuken van de Roerdal Slenk, zoals de Peelrandbreuk en de Felbissbreuk.

De hoge temperaturen die langs de randbreuken worden verwacht (>150°C) zijn interessant voor elektriciteitsopwekking. Dergelijke temperaturen komen overeen met EGS demonstratieprojecten in Duitsland (Landau) en Frankrijk (Soultz-sous-Forêts), waar langs de randbreuken van de Rijn Graben water van meer dan 150°C wordt opgepompt voor elektriciteitsopwekking. De Roerdal Slenk en Rijn Graben zijn vergelijkbare geologische structuren. Naast het aantonen van de toepasbaarheid van EGS wordt in Frankrijk en Duitsland ook onderzoek gedaan naar het reduceren en voorkomen van geïndiceerde bevingen als gevolg van fraccen. Het is daarom aan te bevelen om de praktijkervaringen daar te volgen.



Figuur 57. Overzicht van breuken, temperatuur en geregistreerde natuurlijke bevingen (KNMI.nl) in Limburg.

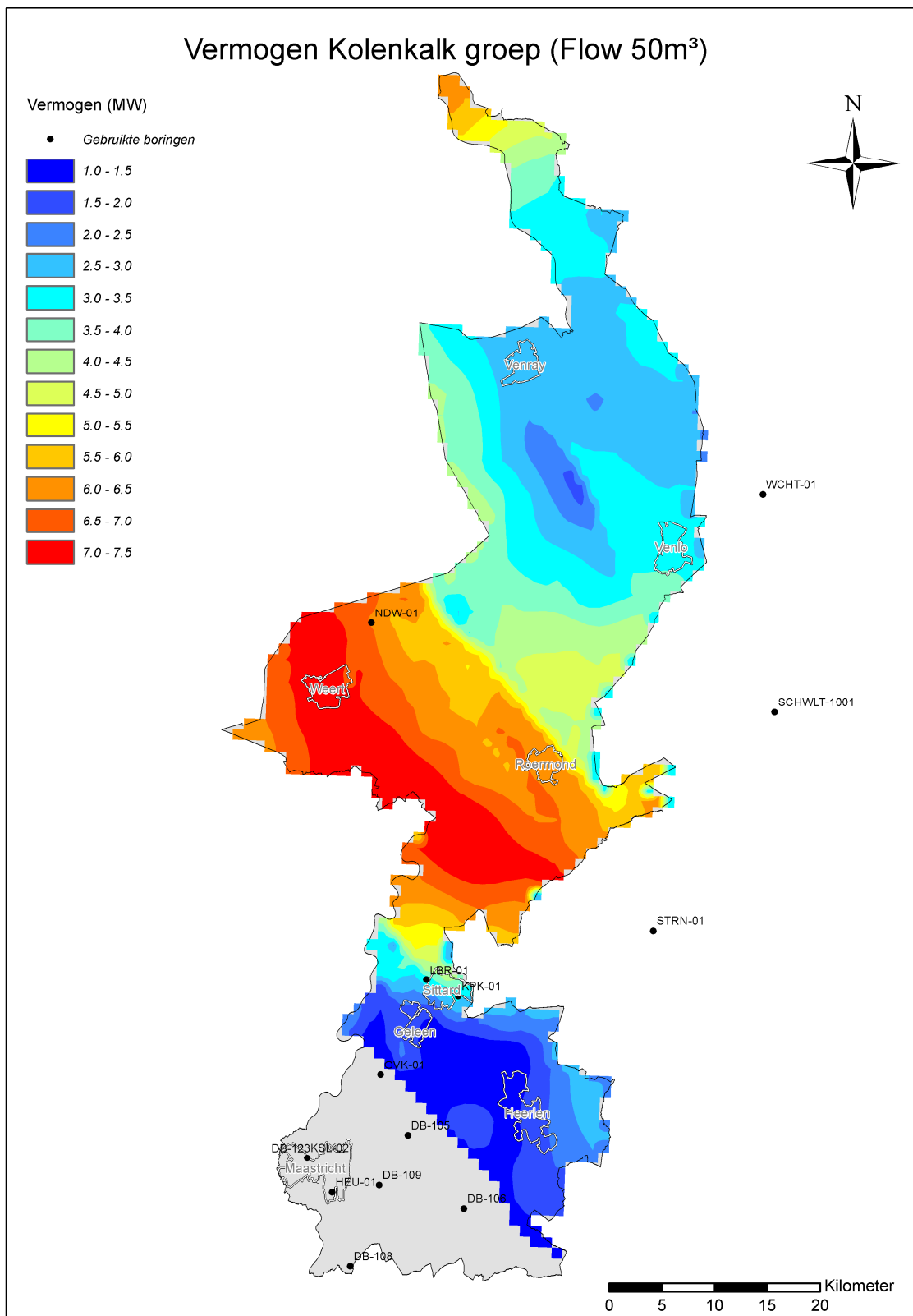
Tabel 8. Ruwe indicatie van vermogen bij wisselende debieten. Voor de berekeningen is de temperatuur aan de top van de Kolenkalk genomen.

Debiet (m <sup>3</sup> /u)	Vermogen (MW <sub>th</sub> )			
	50	100	150	200
Peel-Venlo Blok	1,5-5	3-10	4-18	4-20
Roerdal Slenk	5,5-7,5	10-15	16-24	20-30
Zuid-Limburg Blok	1-3,5	2-7	2-10	4-12

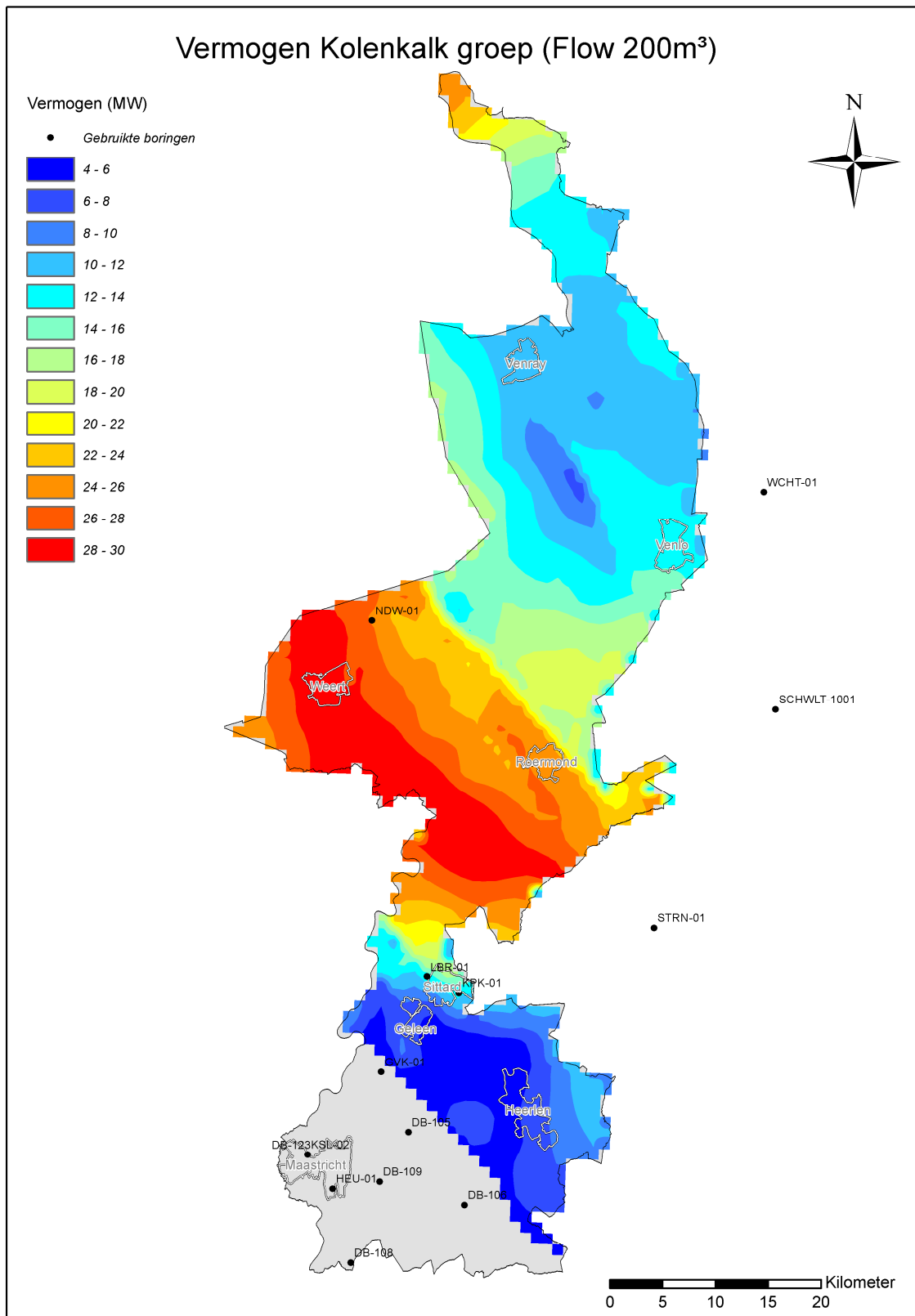
De voor de Kolenkalk Groep getoonde vermogenskaarten (Bijlage F) wijken in de manier waarop ze gemaakt zijn af van de eerder getoonde vermogenskaarten van de laagpakketten in de Noordzee Supergroep en de Onder-Germaanse Trias Groep. Omdat van de Kolenkalk Groep weinig doorlatendheidsgegevens bekend zijn, zijn vier debieten aangenomen (Tabel 8). De debieten weerspiegelen theoretische doorlatendheden; des te beter de doorlatendheid, des te hoger het debiet kan zijn. De vermogenskaarten zijn alleen gebaseerd op de combinatie debiet-temperatuur.

Bij een debiet van 50 m<sup>3</sup>/u is op het Peel-Venlo Blok een vermogen te behalen tot 5 MW (Figuur 58). Bij een debiet van 200 m<sup>3</sup>/u zal dit maximaal 20 MW zijn (Figuur 59). Door de lagere temperaturen ligt het verwachte vermogen in Zuid-Limburg lager (max. 12 MW bij 200 m<sup>3</sup>/u). Op grond van de praktijkervaringen in België is een debiet van 50-100 m<sup>3</sup>/u het meest waarschijnlijk. Bijlage F toont kaarten met een indicatie van het vermogen bij 50, 100, 150 en 200 m<sup>3</sup>/u.

De breuken in de ondergrond van Limburg kunnen een bron van water zijn. Ze kunnen echter ook waterstroming verhinderen. Op basis van radar interferometrie zijn in de Roerdal Slenk en in Zuid Limburg bodembewegingen waargenomen die het gevolg zijn van grondwaterbeweging en niet van breukbeweging (Cuenca, 2012). De bodembewegingen van enkele millimeters per jaar vinden plaats in compartimenten die door breuken worden begrensd. De compartimenten bewegen afzonderlijk van elkaar. Dit impliceert dat de breuken niet of beperkt laterale watermigratie toestaan, als gevolg van een slechte doorlatendheid. Verticale waterstroming door een breuk kan in deze gevallen nog steeds mogelijk zijn. De genoemde resultaten gelden voor de ondiepere lagen in de ondergrond. Of deze ook gelden voor de diepere lagen, waar breuken mogelijk andere eigenschappen hebben, is niet bekend.



Figuur 58. Indicatie van te winnen vermogen bij een debiet van 50 m<sup>3</sup>/u. Voor de berekeningen zijn het genoemde debiet en de temperatuur van de top Kolenkalk Groep gebruikt.



Figuur 59. Grove indicatie van te winnen vermogen bij een debiet van 200 m<sup>3</sup>/u. Voor de berekeningen zijn het genoemde debiet en de temperatuur van de top Kolenkalk Groep gebruikt.

### 15.2.7 *Dwarsdoorsnede ondergrond provincie Limburg*

Een dwarsdoorsnede door de provincie Limburg geeft een overzicht van de geologische opbouw van de ondergrond (Figuur 60). De dwarsdoorsnede is ~100 km lang en loopt van Zuid-Limburg Blok in het zuiden, via de Roerdal Slenk naar het Peel en Venlo Blok in het noorden. De dwarsdoorsnede is gebaseerd op de interpretatie van seismiek. De diktes van het Voort Laagpakket en de Onder-Germaanse Trias Groep zijn geïnterpoleerd met behulp van putgegevens (paragraaf 13).

In de doorsnede is te zien dat het voor aardwarmtewinning geschikte Voort Laagpakket alleen in de Roerdal slenk aanwezig is rond een diepte van ~1000 m. Dieper in de slenk is de eveneens geschikte Onder-Germaanse Trias Groep aanwezig, tussen 1500 en 3000 m diepte. Deze groep is ook op het Peel en Venlo Blok aanwezig, maar is daar door slechte reservoir eigenschappen niet geschikt voor aardwarmtewinning. De Kolenkalk Groep is in de gehele doorsnede van de provincie aanwezig. Buiten de Roerdal Slenk wordt deze groep als mogelijk geschikt beschouwd voor aardwarmtewinning wanneer de afzettingen dieper dan ~1000 m liggen. In de Roerdal Slenk ligt de Kolenkalk Groep dieper dan ~3500 m, waardoor de groep mogelijk geschikt is voor EGS langs breuksystemen. Diepte en dikte van de Limburg en Kolenkalk groepen zijn echter onzeker als gevolg van het ontbreken van putinformatie in de Roerdal Slenk en de daarmee samenhangende onzekerheden in het snelheidsmodel. De dwarsdoorsnede is daarom alleen te gebruiken om een regionaal beeld van de geologische opbouw van de ondergrond te krijgen. De doorsnede is nadrukkelijk niet bedoeld om exacte voorspellingen over diepte en dikte te maken.





## 16 Betrouwbaarheid resultaten

De betrouwbaarheid van de resultaten uit de kartering van het vasteland is gerelateerd aan het regionale schaalniveau waarop de kartering is uitgevoerd. De kaarten zijn niet geschikt voor het bepalen van de lokale geschiktheid van de ondergrond voor aardwarmtewinning of voor het uitvoeren van reservoir-evaluaties. De nauwkeurigheid waarmee de diepteligging van laagpakketten kan worden bepaald is mede afhankelijk van de dichtheid van de geïnterpreteerde seismiek. De ondergrond van Limburg is alleen geïnterpreteerd op basis van 2D seismische lijnen. Door de lijnen onderling te correleren ontstaat een beeld van de ondergrond. Door de grote afstanden is de onzekerheid tussen de lijnen groot.

Een ander belangrijk aspect is dat de seismische interpretaties zijn gedaan in *tijd* en niet in *diepte*. Seismische data worden namelijk verkregen door de tijd te meten die een drukgolf nodig heeft om van de bron naar de ontvanger te reizen via de ondergrond. De geïnterpreteerde seismiek moet daarom nog worden geconverteerd naar diepte met een snelheidsmodel van de ondergrond. Dit snelheidsmodel heeft een onzekerheid die doorwerkt in de uiteindelijke dieptekaarten. Bij snelheidsmodelbepalingen op grotere afstand van boringen, waarmee de seismische interpretatie kan worden gekalibreerd, kan de onzekerheidsmarge voor diepte-bepaling in dit geval al snel oplopen tot enkele tientallen meters en in structureel complexe gebieden op grote diepte zelfs tot enkele honderden meters.

De dikte van de aquifers is bepaald aan de hand van boringen. Tussen de metingen is de dikte geïnterpoleerd. De dichtheid van deze gegevens kan in sommige regio's te gering zijn voor een volledig betrouwbare interpolatie. Dit heeft tot gevolg dat de aanwezige diktevariaties slechts grof kunnen worden bepaald. Een dikte kan dus lager of hoger uitvallen tussen boringen.

In hoeverre aquifers daadwerkelijk geschikt zijn voor de productie van warmtewater kan op basis van deze studie niet worden aangegeven. Deze studie geeft wel aan waar binnen de provincie de potentie het hoogst is. Een locatie specifiek onderzoek is nodig om onzekerheden van de aquifer te beperken (zie o.a. hoofdstuk 10).

## 17 Kennisleemten en aanbevelingen

De seismische dekking in de provincie Limburg is beperkt. Bovendien is alleen 2D seismiek geschoten die dateert van 1985 of daarvoor. De kwaliteit van de beschikbare seismiek is matig tot slecht en dit beperkt daarom een goede, gedetailleerde interpretatie van de geologie.

Bij locatie specifiek onderzoek zal geïnvesteerd moeten worden in kwalitatief goede seismiek. Bij het aantonen van verkarsting en breukzones is hoge kwaliteit van de seismiek vereist, maar ook voor risicoanalyse is goede seismiek een vereiste.

Het aantal putten dat potentiële aardwarmtelaagpakketten heeft aangeboord is gering (Figuur 61). Het grote aantal steenkoolboringen in Limburg boort niet de voor aardwarmte potentieel interessante geologische eenheden aan. Hierover is daarom weinig informatie te vinden over bijvoorbeeld porositeit en permeabiliteit. Deze informatie is alleen te verkrijgen door het boren van één of meer putten.

Voor een aardwarmtestimuleringsbeleid kan de provincie overwegen om te investeren in het schieten van seismiek en het boren van putten om bovengenoemde kennisleemten te verkleinen en een gedetailleerder beeld te krijgen van de ondergrond. De kosten voor het schieten van seismiek en boren van een put zijn hoog en het is dan ook niet opportuun om willekeurig seismiek te laten schieten en exploratieboringen te plaatsen om zo potentiële aardwarmtegebieden beter te kunnen begrijpen.

Het meest voor de hand liggende beleid voor het stimuleren van aardwarmte in de provincie bestaat uit twee onderdelen:

### 1. Informatieverstrekking over aardwarmte aan geïnteresseerden.

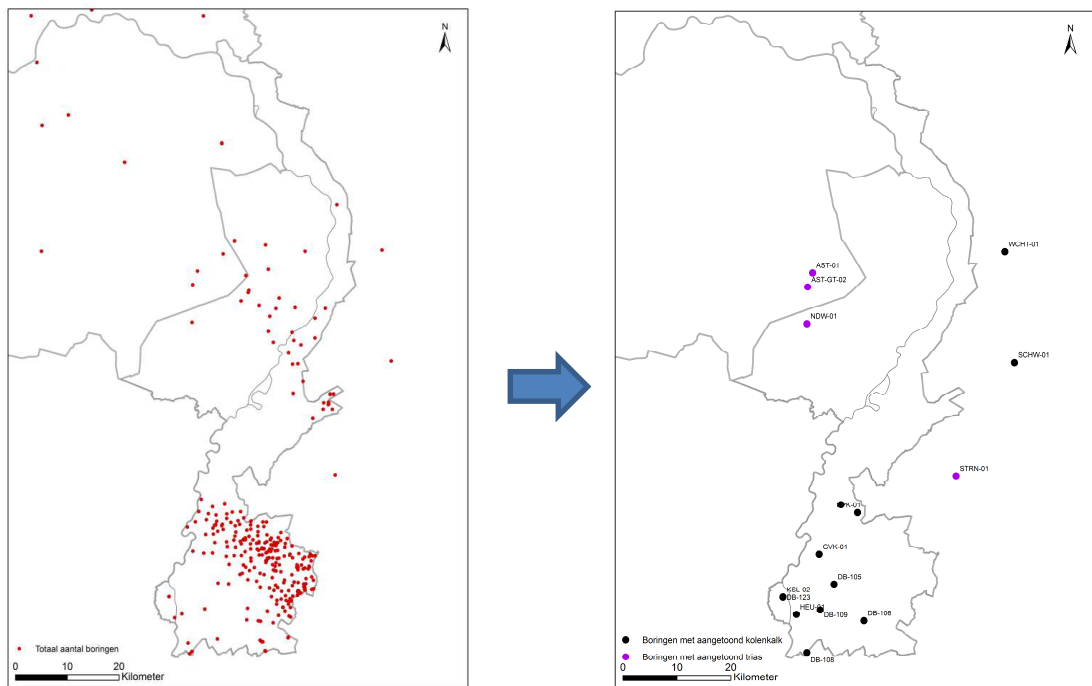
De provincie verstrekt informatie over de mogelijkheden van aardwarmte in de provincie en over hoe aardwarmte werkt. Ook kan zij communiceren welk aardwarmtebeleid zij voert en hoe de provincie aardwarmte wil stimuleren.

### 2. Participeren in lokale initiatieven.

De provincie kan overwegen om actief deel te nemen aan lokale initiatieven door te investeren of het subsidiëren van lokaal onderzoek, het schieten van seismiek en het doen van boorgatmetingen tijdens de exploratiefase van een project. Indien de provincie mee wil investeren in seismiek en boormetingen dan is het aan te bevelen om als voorwaarde te stellen dat de gegevens na realisatie zo snel mogelijk openbaar beschikbaar te stellen voor publiek gebruik, opdat de informatie benut kan worden voor andere lokale initiatieven. Des te meer gegevens beschikbaar komen, des te beter de aardwarmtepotentie bepaald kan worden en de financiële en economische risico's kunnen worden verminderd.

Aangezien de gegevens van de ondergrond voor meerdere partijen interessant zijn is het aan te raden om te inventariseren of kapitaalkrachtige partijen bereid zijn mee te laten investeren in het verkrijgen van geologische gegevens. Te denken valt daarbij aan bijvoorbeeld DSM, EBN, olie- en gasmaatschappijen of de Rijksoverheid.

Bij het boren langs of in de buurt van breuken bestaat er een risico op seismiciteit. Het is aan te raden bij de ontwikkeling van een aardwarmte installatie de injectieput niet in de breuk te boren, maar in een doorlatende zone verder van een breuk vandaan. De Kolenkalk Groep biedt hiervoor mogelijkheden, die per locatie in detail onderzocht moeten worden. Seismische acquisitie is hierbij essentieel om een uitgebreide analyse naar de kans op bevingen in de buurt van actieve breuken te kunnen opstellen, zoals geëist worden door SodM.



Figuur 61. Putten die de Onder-Germaanse Trias Groep of Kolenkalk Groep hebben aangeboord (links). Ondanks het grote aantal putten in Limburg heeft slechts een beperkt aantal putten informatie over potentiële aardwarmtelaagpakketten (rechts). Vooral in het noorden van Limburg waar de Kolenkalk Groep potentie heeft voor aardwarmtewinning zijn de gegevens zeer beperkt.

## 18 Conclusies en aanbevelingen

Deze studie inventariseert de aardwarmtepotentie in de ondergrond van de provincie Limburg. Uit deze inventarisatie is gebleken dat de ondergrond van Limburg voldoende mogelijkheden biedt voor aardwarmtewinning. Er zal echter nog veel geïnvesteerd moeten worden in nieuwe seismiek en putinformatie om de datadichtheid te vergroten. Meer en beter inzicht in de geologische structuur van de ondergrond en in de kwaliteit van laagpakketten is noodzakelijk.

In principe is een drietal groepen aanwezig met aardwarmtepotentie:

1. Noordzee Supergroep;
2. Onder-Germaanse Trias Groep;
3. Kolenkalk Groep.

Een mogelijke vierde kandidaat is de Neeroeteren Formatie die behoort tot de Limburg Groep. Het potentieel van deze formatie is echter onzeker, omdat het niet met zekerheid te zeggen is of deze formatie daadwerkelijk in de ondergrond aanwezig is (slechts 1 seismische lijn en geen put die aanwezigheid aantoont).

Figuur 62 geeft een overzicht van de regio's waar de ondergrond van de provincie Limburg mogelijk potentie heeft voor het ontwikkelen van aardwarmtesystemen.

De volgende conclusies en aanbevelingen over de aardwarmtepotentie van de ondergrond van Limburg zijn te trekken:

1. De kalksteen van de Kolenkalk Groep in het noorden van Limburg lijkt de meeste potentie te hebben. De potentie is waarschijnlijk het grootst in de buurt van breuken door de splijtgevoeligheid van deze kalksteen. Dit wordt eventueel versterkt door oplossing van kalksteen als gevolg van watermigratie door barsten en spleten. Doorlatende zones door verkarsting aan de top van deze groep zijn mogelijk aanwezig evenals door dolomiet aan de basis van de groep. Het is aan te bevelen de bevindingen van de aardwarmteboringen bij Californië nauwlettend te volgen en de resultaten en metingen daarvan mee te nemen op andere locaties in deze regio.
2. Het geothermisch potentieel van de Kolenkalk Groep in het zuiden van Limburg (Zuid-Limburg Blok) is mogelijk beperkt tot spleetporositeit in de buurt van breuken. Hoewel verkarsting ter hoogte van Maastricht en Valkenburg middels boringen is aangetoond ligt de Kolenkalk Groep hier te ondiep voor het winnen van aardwarmte (minstens 40 °C nodig). Op het Zuid-Limburg Blok neemt de kans op verkarsting richting het noorden af.
3. In de Roerdal Slenk is een zestal laagpakketten van de Onder-Germaanse Trias Groep aanwezig met aardwarmtepotentie. Vijf van deze laagpakketten, te weten de Hardegse Formatie, de Onder- en Boven-Detfurth Zandsteen Laagpakketten en de Onder- en Boven-Volpriehausen Zandsteen Laagpakketten, vormen gezamenlijk één dik zandsteenpakket. Er is weinig informatie over de porositeit en permeabiliteit van deze laagpakketten. Metingen in het Waalwijk gasvoorkomen suggereren dat op grote diepte de reservoir eigenschappen door compactie en cementatie zeer beperkt zijn. Aan de randen van de Roerdal Slenk, waar deze laagpakketten minder diep begraven zijn, kunnen deze eigenschappen mogelijk wel tot voldoende doorlatendheid leiden. Eventueel kan overwogen worden om reservoirstimulatie toe te passen of onderzoek te doen naar spleetporositeit langs breuken. Het is aan te bevelen om bij eventuele haalbaarheidsstudies naar deze groep reservoirstimulatie als optie mee te nemen.
4. Een zesde laagpakket behorend tot de Onder-Germaanse Trias Groep is het Nederweert Laagpakket. Door gebrek aan gegevens zijn echter geen uitspraken te doen over de reservoirkwaliteit. Vermoedelijk is de reservoirkwaliteit net als bovenliggende pakketten in vooral de diepste delen van de Roerdal Slenk slecht.
5. Het Voort Laagpakket van de Noordzee Supergroep is het ondiepste laagpakket uit deze inventarisatie. Dit laagpakket is naar verwachting voldoende doorlatend voor aardwarmtewinning. Het te behalen vermogen is waarschijnlijk alleen voldoende voor verwarming van kassen. Eventueel kan dit laagpakket extra vermogen leveren indien men naar de Onder-Germaanse Trias Groep doorboort voor aardwarmtewinning.

6. In het uiterste zuiden van de Provincie, ter hoogte van Maastricht, zijn geen laagpakketten aanwezig die voldoen aan de gestelde criteria of er is niets bekend over de oudere gesteenten (ouder dan Kolenkalk Groep) die hier dicht aan het oppervlak liggen. Uiteraard neemt ook hier de temperatuur met de diepte toe. Door technische ontwikkelingen, zoals bijvoorbeeld de monobron, kan mogelijk in de toekomst wel gebruik gemaakt worden van aardwarmte.
7. Productie langs breuken brengt extra risico's met zich mee. Dit vereist een zorgvuldig onderzoek en gedegen risico analyse. Dit leidt mogelijk tot extra investeringen in onderzoek en monitoring. Bovendien dient rekening gehouden te worden dat de injectie van water in een breuk extra risico's met zich meebrengt. Het is aan te bevelen om bij het ontwerp van het doublet te kijken of injectie op een afstand van de breuk mogelijk is.
8. In deze studie is uitgegaan van een minimale watertemperatuur van 40°C. Het mijnwaterproject in Heerlen benut energie uit het water van een oude steenkolenmijn voor de verwarming en koeling van gebouwen. Deze unieke vorm van aardwarmtebenutting kan ook overwogen worden in regio's waar mijnschachten aanwezig zijn. Deze vorm van aardwarmtewinning is niet in deze studie meegenomen. Het is aan te bevelen het potentieel van deze energiebron te inventariseren in de provincie Limburg.
9. In onder andere Duitsland en Frankrijk zijn enkele demonstratieprojecten gestart waar elektriciteit wordt opgewekt door warm water (>150 °C) op te pompen uit meer dan 4000 m diepe reservoirs. De geologische structuren waaruit dit water onttrokken wordt, zijn vergelijkbaar met die van de Roerdal Slenk in de provincie Limburg. De techniek die hier gebruikt wordt staat bekend als Enhanced Geothermal Systems (EGS). EGS bevindt zich nog in een wetenschappelijke fase. De randbreuken van de Roerdal Slenk, mogelijk in combinatie met de Kolenkalk, kunnen potentiële locaties zijn voor de ontwikkeling van EGS in Limburg. Het is daarom aan te bevelen om de praktijkervaringen in Duitsland en Frankrijk te volgen. Er is nochtans weinig bekend over de samenstelling van de Kolenkalk in de Roerdal Slenk en doorlatendheid van de randbreuken. De kwaliteit van de geschoten seismiek is onvoldoende voor een goede interpretatie van de diepte en de onzekerheden zijn daarom groot. Daarom zal geïnvesteerd moeten worden in nieuwe seismiek en proefboringen indien men EGS wilt gaan ontwikkelen in de provincie.
10. Gedegen onderzoek kan het risico op tegenvallende prestaties verkleinen, maar niet uitsluiten. Gezien de datadichtheid en risicovolle reservoirs (grotere kans op breukleien, mineralisatie e.d.). is het aan te bevelen om via particuliere verzekeraars aardwarmteprojecten te verzekeren en/of een garantieregeling aardwarmte aan te vragen bij het Ministerie van Economische Zaken.

## 19 Referenties

- Bosatlas, 2009**, Energie en mijnbouw – aardwarmte pp. 58-59, De Bosatlas van Ondergrond Nederland, Noordhoff atlasproducties, ISBN 978 9001 12245 4
- Cuenca, C.C., 2012**, Improving radar interferometry for monitoring fault-related surface deformation: Applications for the Roer Valley Graben and coal mine induced displacements in the southern Netherlands. Proefschrift, TU Delft, 142 p.
- GEA, 2007**, a guide to geothermal energy and environment, [www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org)
- Geluk, M.C., Plomp, A., Van Doorn, Th. H.M., 1996**, Development of the Permo-Triassic succession in the basin fringe area. In: rondeel, H.E., Batjes, D.A.J., Nieuwenhuijs, H.W. (eds) Geology of gas and oil under the Netherlands. Kuwer Acad. Publ., Dordrecht, p. 57-78.
- Geluk M.C., Duser M., De Vos W., 2007**, Pre-Silesian, Geology of the Netherlands, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, pp.27-42
- Geluk M.C., 2007**, Triassic, Geology of the Netherlands, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, pp.85-106
- Haenel R., Staroste E., 1988**, Atlas of Geothermal resources in the European Community – Austria and Switzerland –, ISBN 3-88746-221-1
- Krings S., Langguth H-R, 1987**, Hydrogeology of the Thermae boreholes (Valkenburg A/D Geul, The Netherlands) Annales de la Société Géologique de Belgique, T 110, pp 85-95.
- Laenen B., 2002**, Lithostratigrafie van het Pre-Tertiair in Vlaanderen, Deel I post Dinantiaan, VITO, rap. Nr. 2002/ETE/R/063.
- Sobczak, M., 1989**, Thermae 2000 Valkenburg a/d Geul, Grondboor en Hamer 43, nr. 5/6, Nederlandse Geologische Vereniging.
- OECD/IEA, 2011**, Technology roadmap; geothermal Heat and power, [www.iea.org](http://www.iea.org).
- RGD, 1987**, Onderzoeksresultaten van boring Geverik-01 rapportnr. GB 2144/GD20167, Heerlen
- RGD, 1989**, Geothermische Reserves Centrale Slenk, Nederland – boring Asten -, exploratie en evaluatie, rapport nr. OS 89-18
- RGD, 1993**, Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa, Mededelingen Rijks Geologische Dienst, Nr. 50.
- Thorez J., Bless M.J.M., 1977**, On the possible origin of the Lower Westphalian D Neeroeteren Sandstone (Campine Basin), Mededelingen Rijks Geologische Dienst Nieuwe Serie Vol. 28, No. 5, pp. 128-132

**TNO-NITG, 1999**, Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland. Toelichting bij kaart XV Sittard-Maastricht ISBN 90-6743-590-2

**TNO-NITG, 2000**, A hydrogeological schematization of the Roer Valley Graben, rapport nr. NITG 00-200-A.

**TNO-NITG 2001**, Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland Toelichting bij kaartbladen XIII en XIV Breda-Valkenswaard en Oss-Roermond, ISBN 90-72869-63-X

**TNO, 2007**, Re-use of E&P-boreholes for geothermal energy production, doc nr. BenO uGE 070 05-2007

**TNO, 2009**, Verkenning naar mogelijkheden voor geothermie, opslag CO<sub>2</sub>, aardgas en perslucht en WKO in zoutcavernes in de provincie Overijssel –bijdrage ondergrond aan een duurzame energiehuishouding-, rapport nr. TNO-034-UT-2009-00426.

**TNO, 2011**, Studie naar haalbaarheid van OPAC op de locatie Graetheide en nabije omgeving, rapport nr. TNO-060-UT-2011-01251

**VITO, 2010**, Technology watch: geothermie en het potentieel in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van ALBON, rapportnr. 2010/SCT/R/001.

**VITO, 2012**, Geologische Evaluatie Geothermie voor Glastuinbouwcluster Bergerden – tussentijds rapport, rapportnr. 2012/SCT/R/4.

**Van den Bosch, R., Flipse, B., 2010**, Stappenplan Winning aardwarmte voor glastuinbouw – voor een krachtige klimaatneutrale glastuinbouw-, kas als energiebron. [www.tuinbouw.nl](http://www.tuinbouw.nl)

**Vandenbergh, N., 1984**, the subsurface geology of the Meer area in north Belgium and its significance for the occurrence of hydrocarbons, Journal of Petroleum Geology 7: 55-66.

**Wouters L., Gullentops, F., Bolle L., De Loose, J., Van Lishout S., Duser M., 1989**, the sedimentology of the Neeroeteren Sandstone, upper Westphalian, Kempen (well GD161 and 161b). Aardkundige mededelingen K.U. Leuven, 4: 47-101.

**Kramers L., Van Wees J.D.A.M., Pluymaekers M.P.D., Kronimus A., Boxem T.,** in press, Direct heat resource assessment and subsurface information systems for geothermal aquifers; the Dutch perspective, Netherlands Journal of Geosciences.

**Wiers J., 2001**, A hydrogeological characterization and 3D groundwaterflow model of the Roer Valley Graben.

#### Internetsites

[nl.wikipedia.org/wiki/Permeabiliteit\\_\(materiaal\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Permeabiliteit_(materiaal))

[en.wikipedia.org/wiki/Fault\\_\(geology\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fault_(geology))

[www.de-aarde.com/de-planeet-aarde/binnenste-van-de-aarde/de-aardmantel/](http://www.de-aarde.com/de-planeet-aarde/binnenste-van-de-aarde/de-aardmantel/)



[www.soultz.net](http://www.soultz.net)  
[www.static.shell.com](http://www.static.shell.com)  
[www.gesys-hannover.de](http://www.gesys-hannover.de)  
[www.c2es.org/technology/factsheet/EGS](http://www.c2es.org/technology/factsheet/EGS)  
[www.NLOG.nl](http://www.NLOG.nl)  
[www.agentschapnl.nl/nieuws/regeling-sei-risicos-dekken-voor-aardwarmte-start-1-oktober](http://www.agentschapnl.nl/nieuws/regeling-sei-risicos-dekken-voor-aardwarmte-start-1-oktober)  
[www.agentschapnl.nl/onderwerp/wat-wko](http://www.agentschapnl.nl/onderwerp/wat-wko)  
[www.aardwarmtedenhaag.nl](http://www.aardwarmtedenhaag.nl)  
[uwec.edu/jolhm/eh/below/Matt%20Below%20-%20GEOG%20361-WHAT%20IS%20KARST.htm](http://uwec.edu/jolhm/eh/below/Matt%20Below%20-%20GEOG%20361-WHAT%20IS%20KARST.htm)  
[www.searchanddiscovery.com/documents/2006/06094dyer/images/04.htm](http://www.searchanddiscovery.com/documents/2006/06094dyer/images/04.htm)  
[www.californie.nu](http://www.californie.nu)

## 20 Ondertekening

Utrecht, 18 december 2012

Geologische Dienst van Nederland

Michiel van der Meulen  
Afdelingshoofd

Leslie Kramers  
Auteur

## A Boringen en seismische lijnen

Gebruikte/geraadpleegde boringen (incl. boringen buiten provinciegrenzen)				
Putcode	Putnaam	Eigenaar	X_RD	Y_RD
ACA-11	AMERICA-11	Rijksopsporing van Delfstoffen	707310	5702632
ARC-GT-01	ARCEN-GT-01	Rijks Geologische Dienst	721069	5710050
AST-01	ASTEN-01	NAM	694156	5697743
AST-GT-02	ASTEN-GT-02	TNO	693248	5695167
BEE-12	BEESEL-12	Rijksopsporing van Delfstoffen	714133	5684070
BEE-72	BEESEL-72	Staatsmijnen	712738	5684904
BFD-14	BELFIELD-14	Rijksopsporing van Delfstoffen	716844	5689032
BKZ-01	BROEKZIJDE-01	Wintershall	652386	5710248
BRL-09	BAARLO-09	Rijksopsporing van Delfstoffen	712996	5691028
BRN-15	BEERENINGEN-15	Rijksopsporing van Delfstoffen	706045	5691378
CAL-GT-01	CALIFORNIE-GT-01	Californie Wijnen Geothermie B.V.	714934	5701428
CAL-GT-01-S1	CALIFORNIE-GT-01-SIDETRACK1	Californie Wijnen Geothermie B.V.	714934	5701428
CAL-GT-01-S2	CALIFORNIE-GT-01-SIDETRACK2	Californie Wijnen Geothermie B.V.	714934	5701428
CNH-04	CORNELISHOF-04	Rijksopsporing van Delfstoffen	712624	5675045
DB-001	DIEPBORING-001 VRUSSCHENHUESKE		712032	5637041
DB-002	DIEPBORING-002 HAM		714908	5638687
DB-003	DIEPBORING-003 BRIL		715076	5639796
DB-004	DIEPBORING-004 WIEBACH		714807	5639700
DB-005	DIEPBORING-005 GRACHT		713466	5637682
DB-006	DIEPBORING-006 SPEKHOLZERHEIDE		713547	5638538
DB-007	DIEPBORING-007 BOCHOLTZ		712142	5633642
DB-008	DIEPBORING-008 WINSELAAR	ROvD	713587	5640033
DB-009	DIEPBORING-009 KAALHEIDE	Staatsmijnen	714664	5639757
DB-010	DIEPBORING-010 CHEVREMONT	Staatsmijnen	715103	5640768
DB-011	DIEPBORING-011 ONDER SPEKHOLZ		712470	5639470
DB-012	DIEPBORING-012 DORP	Laura en Vereniging N.V.	714556	5642569
DB-013	DIEPBORING-013 ONDERSTE LOCHT		711757	5638566
DB-014	DIEPBORING-014 GROENSTRAAT		714843	5644764
DB-015	DIEPBORING-015 CHEVREMONT	Laura en Vereniging N.V.	716211	5641086
DB-016A	DIEPBORING-016A PARTEY		706349	5632875
DB-016B	DIEPBORING-016B PARTEY		705897	5632945
DB-017	DIEPBORING-017 WELTERSHUESKE		708581	5640955
DB-018	DIEPBORING-018 A/D KROOK		710806	5640003
DB-019	DIEPBORING-019 BENZENRADE	Staatsmijnen	709636	5639120
DB-020	DIEPBORING-020 WEUSTENRADE	Staatsmijnen	705132	5642817
DB-021	DIEPBORING-021 CARISBORG		713573	5642804
DB-022	DIEPBORING-022 CAUMER		710956	5640488
DB-023A	DIEPBORING-023A WEG BOCHOLTZ		710623	5635434
DB-023B	DIEPBORING-023B WEG BOCHOLTZ		710634	5635460
DB-024	DIEPBORING-024 HEEK		700183	5639765
DB-025	DIEPBORING-025 HUSKENWEIDE	Oranje Nassau Mijnen	708673	5643349
DB-026	DIEPBORING-026 LINDELAUF	Oranje Nassaumijnen	705584	5640265
DB-027	DIEPBORING-027 PALENBERG		709968	5643338
DB-028	DIEPBORING-028 OUDE BONGERD	Staatsmijnen	703483	5642907
DB-029	DIEPBORING-029 KONINGSBEEMD		707356	5644090
DB-030	DIEPBORING-030 KOPKESMOLEN	Oranje Nassau N.V.	707465	5644013
DB-031	DIEPBORING-031 TOL KLIMMEN		703885	5640538
DB-032	DIEPBORING-032 SCHINDERSGATS	Oranje Nassau Mijnen NV	710263	5642041
DB-033	DIEPBORING-033 HEERLERHEIDE		708691	5644621
DB-034	DIEPBORING-034 KEMPENSWEG		709316	5642191
DB-035	DIEPBORING-035 ZESWEGEN		708822	5642372
DB-036	DIEPBORING-036 NIEUWENHAGEN	Oranje Nassau II	713305	5642865
DB-037	DIEPBORING-037 GROENSTRAAT		714513	5644411
DB-038	DIEPBORING-038 BOVENS NIEUWENHA	Staatsmijnen	712511	5644632
DB-039	DIEPBORING-039 SPEKHOLZERHEIDE		713694	5638538
DB-040	DIEPBORING-040 LAARHOF		704470	5644580
DB-041	DIEPBORING-041 BOSSCHENHUIZEN		709438	5636032
DB-042	DIEPBORING-042 DAELHOF	Oranje Nassaumijnen	708919	5638636
DB-043	DIEPBORING-043 KAMP NUTH		702644	5645040
DB-044	DIEPBORING-044 RUMPEN		709565	5647435
DB-045	DIEPBORING-045 SIMPELVELD		710693	5635414
DB-046	DIEPBORING-046 BREIJNDER		702616	5647216
DB-047	DIEPBORING-047 WOLFSHAGEN		702995	5647966
DB-048	DIEPBORING-048 KAST WIJNANDSRAD	Staatsmijnen	703033	5643292
DB-049	DIEPBORING-049 GRACHT (OIRSBEEK	Staatsmijnen	704114	5648600
DB-050	DIEPBORING-050 OVERBROEK	staatstoezicht	706073	5645144
DB-051	DIEPBORING-051 MUNSTERGELEEN	Staatsmijnen NV	700599	5651180
DB-052	DIEPBORING-052 SPAUBEEK		699925	5646691
DB-053	DIEPBORING-053 SCHRIJVERSHEIDE		709630	5645998
DB-054	DIEPBORING-054 PUTH	Staatsmijnen NV	701555	5649399
DB-055	DIEPBORING-055 VELDE	Staatsmijnen	702815	5641745
DB-056	DIEPBORING-056 AMSTENRADE	Staatsmijnen	705577	5647311
DB-057	DIEPBORING-057 MERKELBEEK	Staatsmijnen	707583	5648880
DB-058	DIEPBORING-058 HEUFKEN		708254	5647953
DB-059	DIEPBORING-059 VAESRADE	Twentse Bank	704434	5646285
DB-060	DIEPBORING-060 HOUT (MERKELBEEK)		705845	5649454
DB-061	DIEPBORING-061 HUIS SCHINNEN		701184	5647908
DB-062	DIEPBORING-062 WINDRAAK		702000	5651496
DB-063	DIEPBORING-063 GR. DOENRADE		704420	5650731
DB-064	DIEPBORING-064 WINDRAAK	Staatsmijnen NV	702311	5650826
DB-065	DIEPBORING-065 DOUVERGENHOUT		705847	5649459
DB-066	DIEPBORING-066 HUIS DOENRADE		704454	5649940
DB-067	DIEPBORING-067 AALBEEK		700274	5643410
DB-068	DIEPBORING-068 HEIDE	Twentse Bank	710202	5647840

Gebruikte/geraadpleegde boringen				
Putcode	Putnaam	Eigenaar	X_RD	Y_RD
DB-069	DIEPBORING-069 RAATH		706968	5650425
DB-070	DIEPBORING-070 OPHOVEN	Staatsmijnen NV	700882	5653111
DB-071	DIEPBORING-071 DE KLUIS		699120	5649897
DB-072	DIEPBORING-072 LUTTERADE	Staatsmijnen NV	697866	5651397
DB-073	DIEPBORING-073 WELSCHENHEUVEL		696264	5652821
DB-074	DIEPBORING-074 GELEEN	Aktien Verein Mijnveld CLARA	697151	5650115
DB-075	DIEPBORING-075 SITTARD	Staatsmijnen	699827	5652766
DB-076	DIEPBORING-076 ROODHUIS	Aachener Hutte, Aktien Verein Mijnveld CLARA	695745	5648956
DB-077	DIEPBORING-077 STEIN	Staatsmijnen	693760	5651302
DB-078	DIEPBORING-078 SCHOOL URMOND	Staatsmijnen	694410	5653201
DB-079	DIEPBORING-079 RIMBURG		716888	5645012
DB-080	DIEPBORING-080 OBBICHT		694898	5655438
DB-081	DIEPBORING-081 LIMBRICHT	Staatsmijnen	697071	5654143
DB-082	DIEPBORING-082 WAUBACH		713724	5645411
DB-083	DIEPBORING-083 MAASBAND		692221	5650339
DB-084	DIEPBORING-084 WATERSLEIJHOF	Staatsmijnen	703077	5652016
DB-085	DIEPBORING-085 COCQUERILL		706754	5646331
DB-086	DIEPBORING-086 BRUNSSUM	Staatsmijnen	709734	5648363
DB-087	DIEPBORING-087 BOMMERIG I		706247	5629330
DB-089	DIEPBORING-089 MESCH		692670	5626831
DB-090	DIEPBORING-090 MHEER		698004	5629594
DB-092	DIEPBORING-092 VAREBEUKER		708313	5645825
DB-093	DIEPBORING-093 ON III	Oranje Nassau N.V.	707736	5644454
DB-094	DIEPBORING-094 NJSWILRE		708770	5632568
DB-095	DIEPBORING-095 GRASBROEK	Oranje Nassau Mijnen	709148	5643063
DB-096	DIEPBORING-096 MUSSCHEMIG	NV Oranje Nassau Mijnen	709315	5643727
DB-097	DIEPBORING-097 ROBROEK	Oranje Nassaumijnen N.V.	709528	5644496
DB-098	DIEPBORING-098 SCHACHT HAM		714842	5638673
DB-099	DIEPBORING-099 KOPKESMOLEN	Oranje Nassau N.V.	707363	5643764
DB-100	DIEPBORING-100 EYGELSHOVEN	Laura en Vereniging	715565	5642568
DB-101	DIEPBORING-101 UBACH/WORMS	Laura en Vereniging	714222	5643299
DB-102	DIEPBORING-102 EYGELSHOVEN	Laura en Vereniging	716105	5644054
DB-103	DIEPBORING-103 EYGELSHOVEN	Laura en Vereniging	715698	5643070
DB-104	DIEPBORING-104 GEULLE	Rijksopsporing van Delfstoffen	693278	5645863
DB-105	DIEPBORING-105 HOUTHEM	R.O.V.D.	698137	5639902
DB-106	DIEPBORING-106 GULPEN	Rijksopsporing van Delfstoffen	703662	5633132
DB-107	DIEPBORING-107 EYGELSHOVEN	Laura en Vereniging	714901	5642728
DB-108	DIEPBORING-108 MESCH	R.O.V.D.	693096	5627275
DB-109	DIEPBORING-109 CADIER EN KEER	ROVD	695577	5635096
DB-110	DIEPBORING-110 OVEREJUS	Rijksopsporing van Delfstoffen	707648	5634708
DB-111	DIEPBORING-111 BOCHOLTZ	Rijksopsporing van Delfstoffen	711053	5634725
DB-112	DIEPBORING-112 NEERBEEK		697494	5647437
DB-113	DIEPBORING-113 WINTHAGEN	Rijksopsporing van Delfstoffen	706290	5639172
DB-114	DIEPBORING-114 KRAWINKEL	Rijksopsporing van Delfstoffen	697229	5649017
DB-115	DIEPBORING-115 BANERHEIDE	Rijksopsporing van Delfstoffen	709797	5633983
DB-116	DIEPBORING-116 BOCHOLTZ	Mijn Willem-Sophia	711833	5633848
DB-117	DIEPBORING-117 PRICKART	Rijksopsporing van Delfstoffen	712105	5635412
DB-118	DIEPBORING-118 RIMBURG		715926	5645344
DB-119	DIEPBORING-119 LAURA VII	Laura en Vereniging	715718	5644832
DB-120	DIEPBORING-120 RIMBURG	Laura en Vereniging	716361	5644987
DB-121	DIEPBORING-121 SPEKHOLZERHEIDE	NV Mijn Willem Sophie	714116	5638143
DB-122	DIEPBORING-122 VRUSCHENHUESKE		712246	5636617
DB-123	DIEPBORING-123 KASTANJELAAN	Gem. Maastricht	688666	5637445
DB-124	DIEPBORING-124 WIJLRE	Brand's bierbrouwerij Wylre	703826	5635225
DB-125	DIEPBORING-125 LEMIER 1		711634	5629805
DB-126	DIEPBORING-126 LEMIER 2		711684	5629915
DB-128	DIEPBORING-128 KERKRADE	Mijn Willem Sophia	714682	5639267
DB-129	DIEPBORING-129 SCHACHT HAM II	Mijn Willem Sophia	714883	5639102
DB-130	DIEPBORING-130 DE LOCHT	Mijn Willem-Sophia	712561	5637526
DB-131	DIEPBORING-131 HERKENBOSCH	Rijksopsporing van Delfstoffen	718524	5673325
DB-132	DIEPBORING-132 VLODROP	Rijksopsporing van Delfstoffen	720185	5672118
DB-133	DIEPBORING-133 HERKENBOSCH		720413	5674957
DB-134	DIEPBORING-134 MEZZEL 1	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706647	5629052
DB-135	DIEPBORING-135 MEZZEL 1A	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706686	5629064
DB-136	DIEPBORING-136 MEZZEL 2	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706645	5629092
DB-137	DIEPBORING-137 MEZZEL 2A	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706676	5629073
DB-138	DIEPBORING-138 MEZZEL 3	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706514	5629128
DB-139	DIEPBORING-139 MEZZEL 4	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706606	5629071
DB-140	DIEPBORING-140 MEZZEL 5	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706695	5629094
DB-141	DIEPBORING-141 MEZZEL 6	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	707323	5627313
DB-142	DIEPBORING-142 MEZZEL 7	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	706777	5629046
DB-143	DIEPBORING-143 MEZZEL 8	MY. CAVANDO ACQUIRO IN DE MEZZEL	707200	5627399
DB-144	DIEPBORING-144 EYSDEN	WML	692356	5628832
DB-146	DIEPBORING-146 ROUWENHOF	Laura en Vereniging N.V.	713540	5642423
DB-147	DIEPBORING-147 BORING 35 LAURA	Laura en Vereniging	713571	5642941
DB-148	DIEPBORING-148 BORING 36 LAURA	Laura en Vereniging	713365	5643328
DB-149	DIEPBORING-149 BIJ HAM	Mijn Willem Sophia	714806	5639031
DB-150	DIEPBORING-150 ENCI	ENCI Maastricht	689753	5633540
DB-151	DIEPBORING-151 SCHACHT SOFIA		712277	5636742
DB-152	DIEPBORING-152 WNW VAN BEITEL	Oranje Nassau Mijnen	711147	5637617
DB-153	DIEPBORING-153 MOLSBURG	Oranje Nassau Mijnen	710306	5636990
DB-154	DIEPBORING-154 BENZENRADE	Oranje Nassau Mijnen	709226	5639517
DB-155	DIEPBORING-155 WAHLBROEK	Oranje Nassau Mijnen	711709	5636022
DB-156	DIEPBORING-156 OOST VAN SIMPEL(VELD)	Oranje Nassau Mijnen	711754	5636482
DB-157	DIEPBORING-157 IMSTENRADE	Oranje Nassau Mijnen	710385	5638449
DB-158	DIEPBORING-158 GRACHT		713610	5637923

Gebruikte/geraadpleegde boringen				
Putcode	Putnaam	Eigenaar	X_RD	Y_RD
GRH-01	GRASHOEK-01	NAM	703954	5693812
GVK-01	GEVERIK-01	Ned. Energie Ontw. Mij.	695370	5645498
HDN-20	HELDEN-20	Rijksopsporing van Delfstoffen	707855	5686628
HEL-05-A	HELENAVEEN-05A	Rijksopsporing van Delfstoffen	703488	5696933
HEL-06	HELENAVEEN-06	Rijksopsporing van Delfstoffen	709299	5690863
HEL-07	HELENAVEEN-07	Rijksopsporing van Delfstoffen	701318	5703327
HEU-08	HEUGEM-01	Gemeente Maastricht	691150	5634271
HEU-09	HEUGEM-01-SIDETRACK1	Gemeente Maastricht	691150	5634271
HLH-GT-01	HEERLERHEIDE-GT-01	Gemeente Heerlen	706662	5645171
HLH-GT-02	HEERLERHEIDE-GT-02	Gemeente Heerlen	707989	5644638
HLLB-01	HILLENBERG-01		704453	5651394
HLLB-02	HILLENBERG-02		704491	5651424
KES-10	KESSEL-10	Rijksopsporing van Delfstoffen	712425	5686426
KPK-01	KEMPERKOUL-01	Rijks Geologische Dienst	702479	5653191
KST-02	KASTANJELAAN-02	Provinciale Waterstaat Limburg	688690	5637468
LBR-01	LIMBRICHT-01	Rijks Geologische Dienst	699418	5654640
LBR-01-S1	LIMBRICHT-01-SIDETRACK1	Rijks Geologische Dienst	699418	5654640
LHO-05	LOOHRST-05	Rijksopsporing van Delfstoffen	718835	5690898
MAB-13	MAASBREE-13	Rijksopsporing van Delfstoffen	709918	5692744
MAN-74	MAASNIEL-74	Staatsmijnen	714545	5677318
MEL-08	MELIEL-08	Rijksopsporing van Delfstoffen	702585	5692211
MHB-70	MELICK-HERKENBOSCH-70	Staatsmijnen	719748	5674938
MRS-18	MARIS-18	Rijksopsporing van Delfstoffen	704077	5694191
MS-BRB	MIJNSCHACHT BEERENBOSCH		716527	5640454
MS-BTR	MIJNSCHACHT BEATRIX		719776	5674897
MS-EMM	MIJNSCHACHT EMMA	DSM	706608	5646407
MS-HDK	MIJNSCHACHT HENDRIK	DSM	709334	5647343
MS-JUL	MIJNSCHACHT JULIA		715756	5642936
MS-LRA	MIJNSCHACHT LAURA		714639	5642602
MS-MRT	MIJNSCHACHT MAURITS	DSM	697659	5650760
MS-NLL	MIJNSCHACHT NULLAND		716199	5638786
MS-ON I	MIJNSCHACHT ORANJE NASSAU I		709006	5642263
MS-ON II	MIJNSCHACHT ORANJE NASSAU II		712384	5641472
MS-ON III	MIJNSCHACHT ORANJE NASSAU III		707649	5644556
MS-ON IV	MIJNSCHACHT ORANJE NASSAU IV		709867	5644560
MS-SPH	MIJNSCHACHT SOPHIA		711283	5636706
MS-WHM	MIJNSCHACHT WILHELMINA	DSM	712801	5640135
MS-WLL	MIJNSCHACHT WILLEM		716564	5638883
MS-WLL2	MIJNSCHACHT WILLEM2		713499	5638392
NDW-01	NEDERWEERT-01	Fina	693108	5688240
NER-71	NEER-71	Staatsmijnen	708804	5684550
RAA-01	RAATH-01	Rijks Geologische Dienst	706767	5651272
REU-76	REUVER-76	Staatsmijnen	716818	5685370
SEV-19	SEVENUM-19	Rijksopsporing van Delfstoffen	707832	5698105
SM-01	SM-I SCHAESBERG		712824	5640129
SM-02	SM-II AMSTENRADE	Staatsmijnen	707191	5647371
SM-3	SM-III KROESELENBERG	DSM	707031	5646312
SM-07	SM-VII WOLFSHAGEN	Staatsmijnen	703122	5648118
SM-08	SM-VIII BRUNSSUM	Staatsmijnen	708970	5647480
SM-09	SM-IX WOLFSHAGEN	Staatsmijnen	703398	5648314
SM-10	SM-X SCHINNEN	Staatsmijnen	703305	5647965
SM-11	SM-XI WOLFSHAGEN		703414	5647996
SM-12	SM-XII RUMPEN		709641	5647418
SM-13	SM-XIII RIJKSWEG GELEEN	SM Maurits	698971	5650820
SM-14	SM-XIV ZW VAN SITTARD	Staatsmijnen NV	699805	5651915
SM-15	SM-XV RIJKSWEG GELEEN	Staatsmijnen NV	698064	5649534
SM-16	SM-XVI RIJKSWEG GELEEN	SM Maurits	698841	5650587
SM-17	SM-XVII PUTH	DSM	701389	5648634
SM-18	SM-XVIII HEISTEBRUG	DSM	702416	5647667
SM-19	SM-XIX DOUVERGENHOUT	DSM	705794	5648710
SM-20	SM-XX LUTTERADE	SM Maurits	697679	5650736
SM-21	SM-XXI AMSTENRADE		704859	5647960
SM-22	SM-XXII AMSTENRADE		705986	5647385
SM-23	SM-XXIII AMSTENRADE		706028	5647600
SM-24	SM-XXIV HOENSBROEK		705688	5646246
SM-25	SM-XXV TERWEIJER (HEERLEN)		707403	5645554
SM-26	SM-XXVI TERWEIJER (HEERLEN)	Staatsmijnen	707619	5645676
SM-27	SM-XXVII TERWEIJER (HEERLEN)		707754	5645775
SM-28	SM-XXVIII RUMPEN		709324	5646884
SM-29	SM-XXIX SCHINNEN		704400	5647205
SM-30	SM-XXX BRUNSSUM		708836	5646941
SM-31	SM-XXXI BRUNSSUM		707520	5647592
SM-32	SM-XXXII BRUNSSUM		708376	5647017
SM-33	SM-XXXIII BRUNSSUM		708191	5647987
SM-34	SM-XXXIV HEERLEN		709170	5645922
SM-35	SM-XXXV BRUNSSUM		708404	5648273
SM-36	SM-XXXVI BRUNSSUM		711108	5647276
SM-37	SM-XXXVII BRUNSSUMMERHEIDE		711015	5646566
SM-38	SM-XXXVIII EINDE (HEERLEN)		708509	5646254
SM-39	SM-XXXIX SCHINVELD	DSM	711470	5648194
SM-4	SM-IV EINDE (HEERLEN)		708079	5646233
SM-40	SM-XL WIGGELRADERHOF	DSM	705818	5650449
SM-41	SM-XLI HEERLEN	Staatsmijnen	710910	5644950
SM-42	SM-XLII BOUWBERG	DSM	710248	5649313

Gebruikte/geraadpleegde boringen				
Putcode	Putnaam	Eigenaar	X_RD	Y_RD
SM-43	SM-XLIII NUTH	DSM	701248	5645021
SM-44	SM-XLIV UBACH/WORMS		712423	5646796
SM-45	SM-XLV JABEEK	DSM	707486	5651257
SM-46	SM-XLVI SITTARD	Staatsmijnen	695887	5651692
SM-47	SM-XLVII MELICK-HERKENBOSCH	Staatsmijnen	719435	5673455
SM-48	SM-XLVIII VLODROP	Staatsmijnen	718400	5672117
SM-49	SM-XLIX ROSENGARTEN (SITTARD)	Staatsmijnen NV	697765	5652570
SM-5	SM-V KOUVENRADE		705944	5646026
SM-50	SM-L SPAUBEEK	Staatsmijnen	699778	5647565
SM-51	SM-LI OIRSBEK	DSM	703700	5649753
SM-52	SM-LII BEESEL	DSM	711742	5682643
SM-53	SM-LIII GRUZE GRUBBEN	DSM	697080	5645543
SM-54	SM-LIV NUTH		703362	5645773
SM-55	SM-LV MUNSTERGELEEN	Staatsmijnen	701454	5650553
SM-56	SM-LVI WJUNANDSRADE	Staatsmijnen Limburg NV	704483	5644012
SM-57	SM-LVII SCHINNEN	Staatsmijnen	701514	5646571
SM-58	SM-LVIII SCHIMMERT	DSM	699731	5644897
SM-59	SM-LIX VOERENDAAL	Staatsmijnen Limburg	708430	5637444
SM-6	SM-VI SCHACHT EMMA		706694	5646380
SM-60	SM-LX NIEUWENHAGEN		712019	5645311
SM-61	SM-LXI NIEUWENHAGEN		711970	5645109
SM-62	SM-LXII HEERLEN		706523	5646309
SM-63	SM-LXIII VOERENDAAL	Staatsmijnen	708060	5639044
SM-64	SM-LXIV SIMPELVELD	Staatsmijnen Limburg	709515	5636759
SM-65	SM-LXIX HULSBERG	Staatsmijnen	702360	5641536
SM-66	SM-LXXV HELDEN	Staatsmijnen	708114	5689368
SM-67	SM-LXV GELEEN	Staatsmijn Maurits	697461	5650672
SMG-01	SINT-MICHELSGESTEL-01	Fina	664160	5724721
SWM-21	SWALMEN-21	Rijksopsporing van Delfstoffen	712508	5680495
SWM-73	SWALMEN-73	Staatsmijnen	713554	5680580
VDP-01	VLODROP-01	Rijksopsporing van Delfstoffen	716425	5670485
VDP-02	VLODROP-02	Rijksopsporing van Delfstoffen	719396	5672993
VDP-03	VLODROP-03	Rijksopsporing van Delfstoffen	719520	5673157
VRD-01	VOERENDAAL-01	NAM	706252	5641757
VRD-02	VOERENDAAL-02	NAM	707023	5641502
WNR-01	WJUNANDSRADE-01	NAM	704189	5642255
WWN-01-S2	WAALWIJK-NOORD-01	Wintershall	642786	5729529
WWS-01-S1	WAALWIJK-ZUID-01	Wintershall	644701	5721124
Gebruikte/geraadpleegde Belgische boringen				
HE-01	LOENHOUT-HEIBAERT-01 (KB129)	FIN	618661	5694614
KB-060	HELCHTEREN-60		668783	5661673
KB-113	NEEROETEREN-113		688389	5660618
KB-120	TURNHOUT-120		636019	5687743
KB-149	MEER-149		622577	5700965
KB-161	OPGLABBEEK-161	BGD	684191	5659504
KB-169	GRUITRODE-169	BGD	679645	5664168
KB-172	GRUITRODE-172	BGD	679737	5664168
KB-173	OPGLABBEEK-173	KST	680068	5659169
KB-174	HECHTEL-HOEF-174	BGD	665979	5663880
KB-179	HECHTEL-179	KST	662011	5666298
KB-183	PEER-183	BGD	670330	5662674
KB-186	LOMMEL-186	BGD	659704	5670723
KB-198	MOLENBEERSEL L4	BGD	693393	5672742
KB-201	BREE-201	BGD	678657	5667687
Gebruikte/geraadpleegde Duitse boringen				
SWLT-1001	Schwalmental-1001	Wintershall	731572	5681080
STRN-01	Straeten-01	Wintershall	729778	5701645
WCHT-01	Wachtendonk-01		720738	5659967

Nederlandse Seismische Lijnummers			Belgische Lijnummers		
7009	8215	B-8012	Loen90	9020	
791501	8216A	B-8202		9021	
791502	8216B	B-8205		9022	
791503	8217	B-8208			
81-01	8218	B-8410	Meb82	8202	
81-02	8425	B-8411		8203	
81-03	8426	B-8412		8204	
81-04	8427	B-8413N		8205	
8102	8428	B-8413S		8206	
8104	8501A	B-LSC-89-07		8207	
8104N	8502	B-LSC-89-08		8208	
8105A	8503	D-ARSROD-1		8209	
8105Aext	8504	D-ARSROD-2		8210	
8105B	8505	D-ARSROD-3			
8107	8506	D-ARSROD-4	Ner80	8002	
8107 EXT	8506m	D-KRMG-4		8003	
8109	8507	D-KRMG-5		8004	
8111	8508	D-KRMG-6		8005	
82-01	8509	D-KRMG-7		8006	
82-02	8510	N90-14		8007	
82-03	8511a	NBL80-2B		8008	
82-06	8511b	NBL80-3		8011	
82-07	8512	RGD 8204		8012	
82-08	99-01	RGD 8301		8013	
8211	99-02	RGD 8302			
8212	99-03	RGD 8303			
8213	B-8004	RGD 8304			
8214	B-8005	RGD 8305			

## B Petrofysische analyse put NDW-01

### B.1 Gebruikte gegevens

Een petrofysische analyse van een aantal Trias members (Lower Muschelkalk tot de Nederweert Sandstone) in de boring Nederweert-01 (NDW-01) is uitgevoerd. In deze boring is voor verschillende members in het reservoirtraject de netto-bruto verhouding, porositeit, permeabiliteit en watersaturatie bepaald. Delen van het reservoir in deze boring zijn gekernd, maar er is slechts een beperkte hoeveelheid kernmetingen beschikbaar. Het was mogelijk de logporositeiten te iken met de (*in-situ* gecorrigeerde) kernporositeiten. Hierdoor neemt de betrouwbaarheid van de petrofysische evaluatie van deze boring toe. Voor de bepaling van de permeabiliteit is gebruik gemaakt van kernmetingen, maar omdat deze slechts zeer beperkt beschikbaar waren is tevens gebruik gemaakt van kernmetingen van proximale boringen.

#### B.1.1 Putselectie

In tabel B.1 staan de gebruikte boringen met bijbehorende einddiepte en TD-formatie vermeld. Vier boringen zijn (deels) gekernd en hiervoor zijn kernanalyses uitgevoerd (Tabel B.1, kolom Kern). Verder is er voor vier boringen een composite set logs beschikbaar (Tabel B.1, Kolom S).

Tabel B.1. Selectie boringen voor de petrofysische evaluatie.

Boring	TD [m, (MD)]	TD-formatie	Kern	S
BKZ-01	2702	RBSHR	Kern	S
LBR-01	1059	DCCUK		
NDW-01	2942	DCCU	Kern	S
SMG-01	3337	RBSH		S
WWN-01-S2	3377	RBSHR	Kern	S
WWS-01-S1	3486	RBSHR	Kern	

#### B.1.2 Logs

In de NDW-01 boring is voor het reservoirtraject een composite set logs beschikbaar, deze bestaat uit een gamma-ray log (GR) en twee porositeitslogs (neutron, sonic). Verder is er ook een weerstand, spontane potentiaal en caliper log beschikbaar. De logs zijn van goede kwaliteit.

Tabel B.2. Beschikbare logs.

Boring	Gamma-ray	Neutron	Sonic	Resistivity	Caliper
NDW-01	GR	NEUT	DT	ILD	CAL

#### B.1.3 Kernmetingen

De boring NDW-01 is deels gekernd (Tabel B.1). Er zijn conventionele kernanalyses uitgevoerd, waaronder porositeit, permeabiliteit en korrel dichtheid, maar de hoeveelheid metingen is beperkt. Speciale kernanalyses zijn niet beschikbaar voor deze boring. Er zijn dus ook geen stressdata beschikbaar, waaruit de *in-situ* correctiefactor op de porositeit kan worden afgeleid. In deze analyse is daarom een correctiefactor van 0,95 gebruikt.



## B.2 Petrofysische analyse

### B.2.1 IP-evaluatie

De petrofysische evaluatie is uitgevoerd met het petrofysische interpretatie-programma Interactive Petrophysics (IP).

### B.2.2 Input curves

Voor de bepaling van het kleigehalte is de GR log gebruikt. De porositeit is berekend met behulp van de sonic log, waarbij gecorrigeerd is voor het kleigehalte. De beschikbare neutron log bestaat uit ruwe data (NAPI) en geeft niet de neutron porositeit. Daarom is gekozen voor de sonic log om de porositeit te berekenen. De logporositeit is geijkt aan de *in-situ* gecorrigeerde kernporositeit. Voor de berekening van de watersaturatie is gebruik gemaakt van de Indonesische formule. Een caliper log is beschikbaar voor de bovenste twaalf zones, welke is gebruikt als 'bad hole discriminator'.

De sonic log vertoont afwijkingen in de bovenste helft van de Upper Volpriehausen Sandstone Member die niet overeenkomen met de weerstand en neutron logs. Deze afwijking was terug te zien in een overschatting van de porositeit. De bepaalde porositeit in dit interval kwam niet overeen met de plugmetingen. Daarom is besloten de oorspronkelijke sonic log in dit interval te vervangen door een sonic log berekend uit de neutron log. De resulterende porositeiten zijn meer aannemelijk en komen beter overeen met de plug metingen. De volgende relatie is gebruikt om de neutron om te zetten naar een sonic in dit interval:

$$DT\_NEW = 103.158 - (0.03789 * NEUTRON)$$

Figuur B.1 toont de sonic- en porositeitslog voor en na de correctie en vergelijkt deze met de kernporositeiten. Tabel B.3 geeft een toelichting op de aanwezige kolommen in figuur B.1.

Tabel B.3. Toelichting op kolommen in Figuur B.1.

Kolom	Curves
1	Diepte [m,MD]
2	Zones
3	Sonic log [us/ft] (140-40)
4	Porositeitslog berekend met sonic log [-] (0.5-0), Kernporositeiten [-] (0.5-0)
5	Gecorrigeerde sonic log [us/ft] (0.5-0)
6	Porositeitslog berekend met gecorrigeerde sonic log [-] (0.5-0)

### B.2.3 Modelparameters

Het reservoirtraject van deze boring is onderverdeeld in veertien verschillende zones (Tabel B.4).

Tabel B.4. Zonering in NWD-01.

Nr.	Laagpakket code	Top (m, MD)	Basis (m, MD)
1	RBMH	2035	2092
2	RBMDU	2092	2111
3	RBMDL	2111	2120
4	RBMVU	2120	2215
5	RBMVL	2215	2237
6	RBSHN	2280	2572

Figuur B.1. Sonic log voor en na correctie vergeleken met kernporositeiten.

Voor de bepaling van het kleigehalte uit de GR log is een lineaire relatie gebruikt. De GR waarden voor 'schoon zand' en '100% klei' zijn gebaseerd op de minimale en maximale uitslag van de GR curve in het reservoirdomein. Er is een uniforme waarde van 23 GAPI voor '100% klei' en 128 GAPI voor 'schoon zand' bepaald op basis van de aanwezige Sandstone en Claystone formaties.

De porositeit is berekend met behulp van de sonic log (Wyllie equation). Hierbij is gecorrigeerd voor de aanwezigheid van klei. De parameters die gebruikt zijn in het sonic porositeitsmodel zijn weergegeven in tabel B.5.

Tabel B.5. Sonic porositeitsparameters NDW-01.

Nr.	Laagpakket code	Sonic Wet Clay	Sonic matrix
		us/ft	us/ft
1	RBMH	54	55.5
2	RBMDU	54	55.5
3	RBMDL	54	55.5
4	RBMVU	54	55.5
5	RBMVL	61	55.5
6	RBSHN	54.6	55.5

De berekende logporositeit is gekijkt aan de *in-situ* gecorrigeerde kernplugporositeit van boring NDW-01. Voor de *in-situ* correctiefactor is een waarde van 0.95 gebruikt.

Voor de werkelijke formatieweerstand is gebruik gemaakt van de ILD log. De saturatieberekening is gedaan met behulp van de Indonesische formule. Uniforme parameters zijn gebruikt voor alle zones in het reservoirtraject:

Voorfactor                    a = 1  
Cementatiefactor            m = 2

Saturatie-exponent  $n = 2$

De volgende eigenschappen van het formatiewater zijn aan de hand van Well Tests bepaald:

Specifieke weerstand  $R_w = 0.055 \text{ Ohmm @ } 87^\circ\text{C}$   
 Saliniteit  $S = 52000 \text{ mg/l}$   
 Sonic  $DT = 170 \text{ us/ft}$

Tabel B.6. Saturatieparameters.

Zone	$R_{cl}$	$R_w @ 87^\circ\text{C}$	$R_{mf} @ 14^\circ\text{C}$
	(Ohmm)	(Ohmm)	(Ohmm)
All zones	18	0.055	1.25

#### B.2.4 Permeabiliteit

Omdat voor de NDW-01 put slechts een beperkte hoeveelheid plugmetingen beschikbaar is, zijn plugmetingen van proximale putten (voornamelijk WWN-01-S2) gebruikt om een correlatie tussen de porositeit en permeabiliteit te maken per stratigrafische eenheid. Tevens was de kwaliteit van de plugmetingen in NDW-01 vaak niet voldoende om een accurate correlatie te maken. Daarom waren er, ook voor de intervallen in NDW-01 waar wel plugmetingen beschikbaar waren, plugmetingen van WWN-01-S2 nodig om de correlatie te maken.

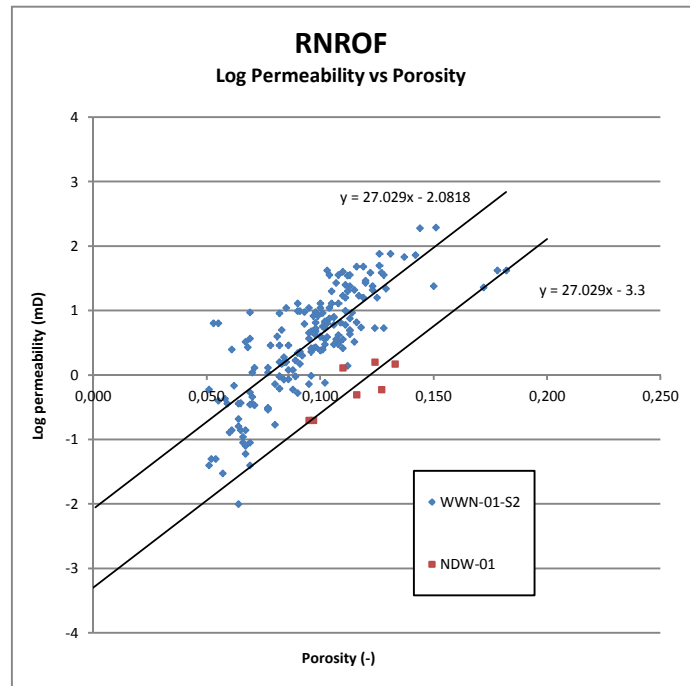
Voor de bepaling van de correlaties zijn metingen met een porositeit van 5% en lager buiten beschouwing gelaten. Om de correlaties in de NDW-01 put te bepalen is, voor de intervallen waar zowel van NDW-01 als van WWN-01-S2 plug metingen beschikbaar zijn, de logaritmische permeabiliteit tegen de porositeit geplot. Waar de kwaliteit van de NDW-01 metingen vaak onvoldoende was om een duidelijke correlatie te bepalen, waren die van WWN-01-S2 wel geschikt. Vaak lag de permeabiliteit van WWN-01-S2 wat hoger, maar de correlatiecoëfficiënt leek hetzelfde te zijn. Daarom is gekozen om de trendlijn door de WWN-01-S2 metingen alleen te transponeren naar een lagere permeabiliteit om de correlatie van NDW-01 te beschrijven. Vervolgens zijn ook de correlaties van de intervallen waar geen NDW-01 plug metingen beschikbaar waren in dezelfde mate getransponeerd. Tabel B.7 toont de berekende poro-perm relaties uit kernmetingen welke gebruikt zijn om een permeabiliteit log te vormen.

Tabel B.7. Poro-perm relaties gebruikt voor boring NDW-01.

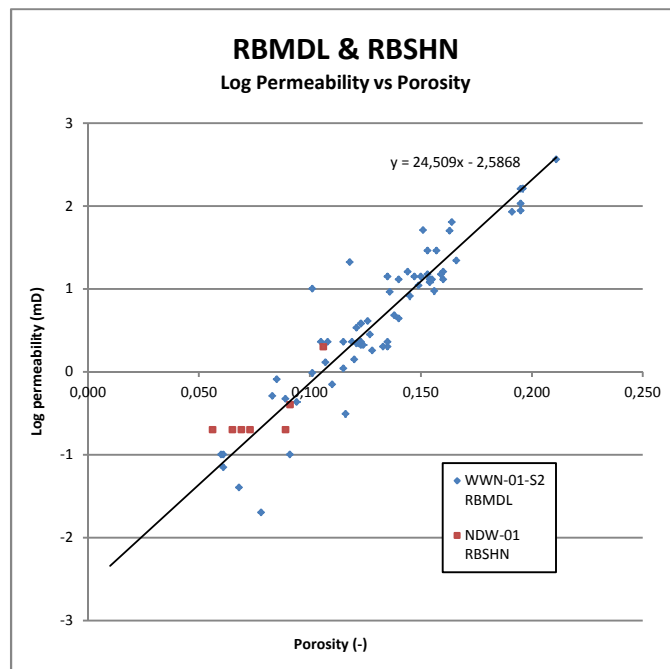
Nr.	Laagpakket code	Poro-Perm relatie
1	RBMH	$K = 10^{(24.283 \cdot PHIE) - 3.5}$
2	RBMDU	$K = 10^{(29.628 \cdot PHIE) - 4.0926}$
3	RBMDL	$K = 10^{(25.509 \cdot PHIE) - 3.2868}$
4	RBMVU	$K = 10^{(27.641 \cdot PHIE) - 3.9299}$
5	RBMVL	$K = 10^{(17.668 \cdot PHIE) - 2.7692}$
6	RBSHN	$K = 10^{(24.509 \cdot PHIE) - 2.5868}$

Figuur B.2 zijn twee van de plots die zijn gebruikt om de poro-perm relaties van de verschillende reservoirzones in boring NDW-01 te bepalen. In figuur B.2 is de logaritmische kernpermeabiliteit van de RNROF geplot tegen de porositeit voor zowel boring WWN-01-S2 als NDW-01. Omdat de data van boring NDW-01 niet voldoende is om een accurate poro-perm relatie te bepalen is besloten de relatie van WWN-01-S2 te transponeren naar de dataset van NDW-01. De resulterende poro-perm relatie geeft een goede correlatie tussen de permeabiliteit en porositeit

van de RNROF in boring NDW-01. Ook de relaties van de zones in NDW-01 waarvan geen kernmetingen beschikbaar zijn, zijn bepaald door de poro-perm relaties uit boring WWN-01-S2 te transponeren. Figuur B.3 toont de data van de RBMDL member van boring WWN-01-S2 en van de RBSHN van boring NDW-01. Hieruit blijkt dat de poro-perm relatie van de RBMDL ook goed past bij de RBSHN data. Daarom is besloten deze relatie ook te gebruiken om de permeabiliteit van de RBSHN in boring NDW-01 te berekenen.



Figuur B.2. Bepaling poro-perm relaties RNROF members.



Figuur B.3. Bepaling poro-perm relaties RBMDL & RBSHN members.

## B.3 Resultaten van de evaluatie

### B.3.1 Evaluatieplayback

In Figuur B.4 is de petrofysische evaluatie weergegeven van de NDW-01 boring met daarin de gecorrigeerde logs en resulterende curves uit de evaluatie (effectieve porositeit, kleigehalte en watersaturatie), maar ook de uit de logporositeit afgeleide permeabiliteit. Tabel B.8 geeft een toelichting op de aanwezige kolommen in figuur B.3.

Tabel B.8. Toelichting curves en kolommen voor petrofysische evaluatie in Figuur B.3.

Kolom	Curves
1	Diepte [m,MD]
2	Zones
3	Gamma-ray log [GAPI] (0-150)
4	Sonic log [us/ft] (140-40)
5	Weerstandlog [ohmm] (0,2-20)
6	Water weerstand [ohmm] (0.01-1, log-schaal)
7	Watersaturatie [-] (1-0)
8	Kleigehalte [-] (0-1), Porositeitslog [-] (1-0), Siltgehalte [-] (0-1), Bulk volume water [-] (1-0)
9	Porositeitslog [-] (0,5-0), Kernporositeit [-] (0,5-0)

### B.3.2

#### B.3.3 Porositeit

De porositeit is berekend uit de sonic log. De berekende logporositeit komt goed overeen met de in-situ gecorrigeerde kernporositeit.

#### B.3.4 Watersaturatie

De saturatie is berekend met de Indonesische formule uit de weerstandslog.

#### B.3.5 Permeabiliteit

De permeabiliteit is berekend uit de logporositeit, gebruik makende van poro-perm relaties verkregen uit kernmetingen van zowel boring NDW-01 als WWN-01-S2. De berekende permeabiliteit komt goed overeen met de permeabiliteit uit kernmetingen.

#### B.3.6 Reservoir eigenschappen

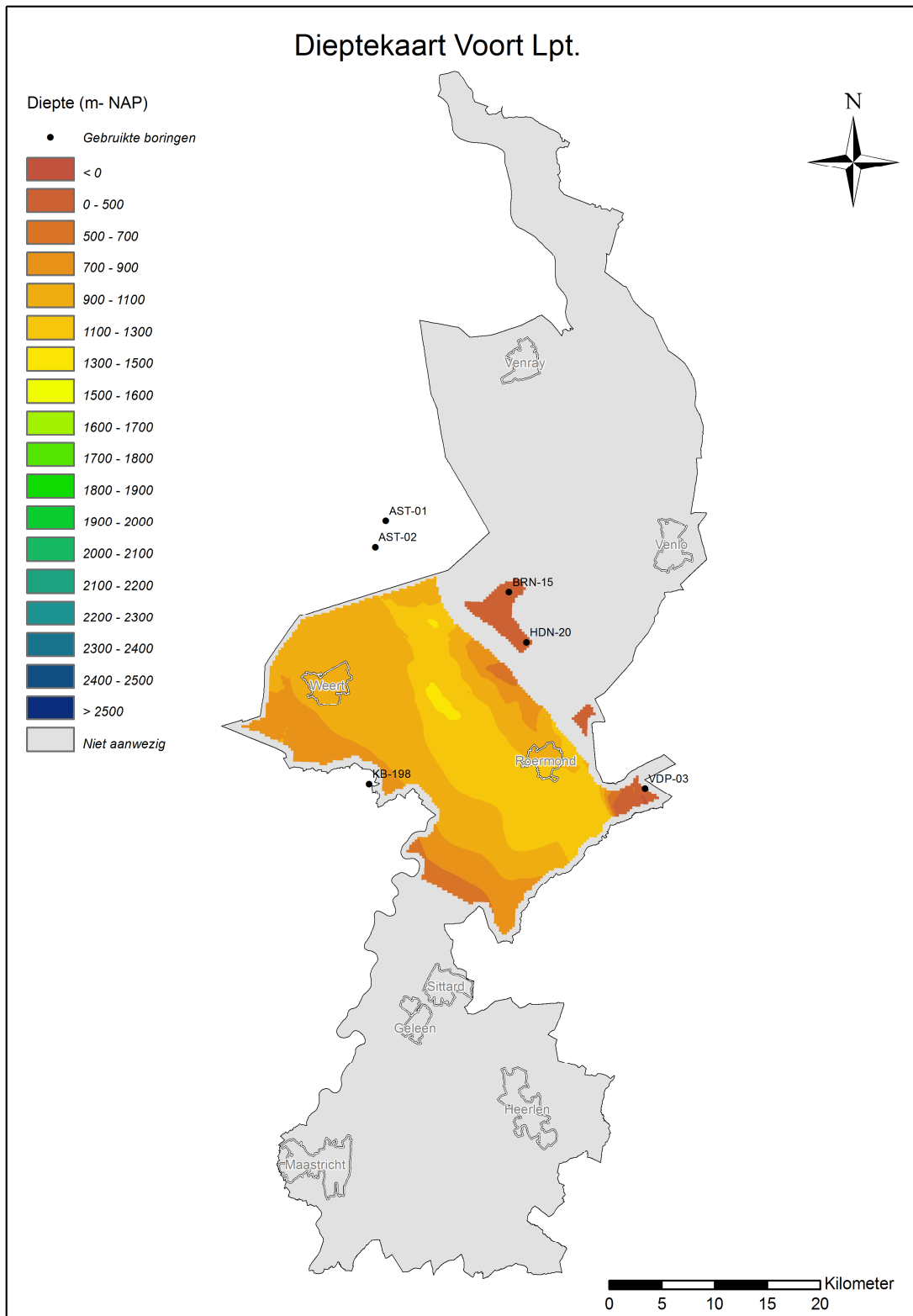
Voor het uitvoeren van de reservoirsommities is een cut-off op het kleigehalte van 50% toegepast. Voor de cut-off van de porositeit is een waarde van 5% gebruikt. De resulterende reservoirsommities van boring NDW-01 zijn weergegeven in tabel B.9.

Tabel B.9. Reservoirsommities voor het reservoirtraject in boring NDW-01.

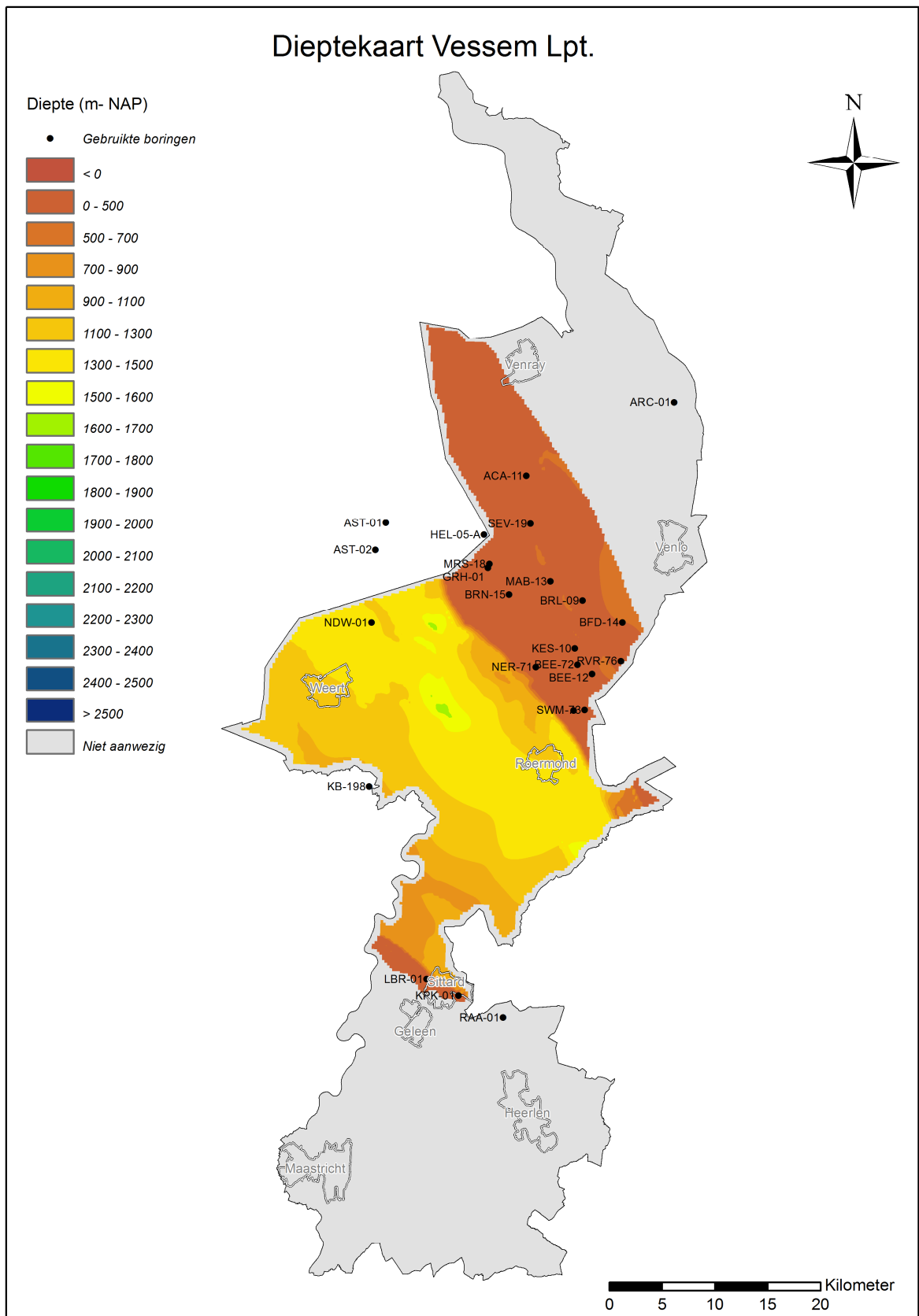
Indonesische formule; $R_w = 0.055 \text{ Ohmm @ } 87^\circ\text{C}$ ; $a=1$ ; $m=n=2$														
Zone nr.	Zone	Cut-	Off	Brut o	Netto	N/B	Phie	$S_w$	$V_{cl}$	$V_{cl}$	$V_{cl}$	K	K	K
		Phie	$V_{cl}$	[m]	[m]							[mD]	[mD]	[mD]
									Ar. Mean	Gm. Mean	Hr. Mean	Ar. Mean	Gm. Mean	Hr. Mean
1	RBMH	0,05	0,5	57	28,2	0,495	0,107	0,634	0,306	0,288	0,265	0,324	0,128	0,054
2	RBMDU	0,05	0,5	19	16	0,842	0,115	0,766	0,167	0,133	0,056	2,525	0,209	0,039
3	RBMDL	0,05	0,5	9	9	1	0,121	0,935	0,089	0,077	0,053	2,385	0,478	0,151
4	RBMVU	0,05	0,5	95	88,55	0,932	0,124	0,767	0,149	0,129	0,099	10,003	0,306	0,071
5	RBMVL	0,05	0,5	22	5,4	0,245	0,063	0,611	0,197	0,178	0,159	0,026	0,022	0,02
6	RBSHN	0,05	0,5	292	197,4	0,676	0,1	0,754	0,219	0,213	0,207	4,548	0,714	0,261

Figuur B.4. IP-evaluatie resultaatcurves voor de NDW-01 boring.

## C Diepte kaarten

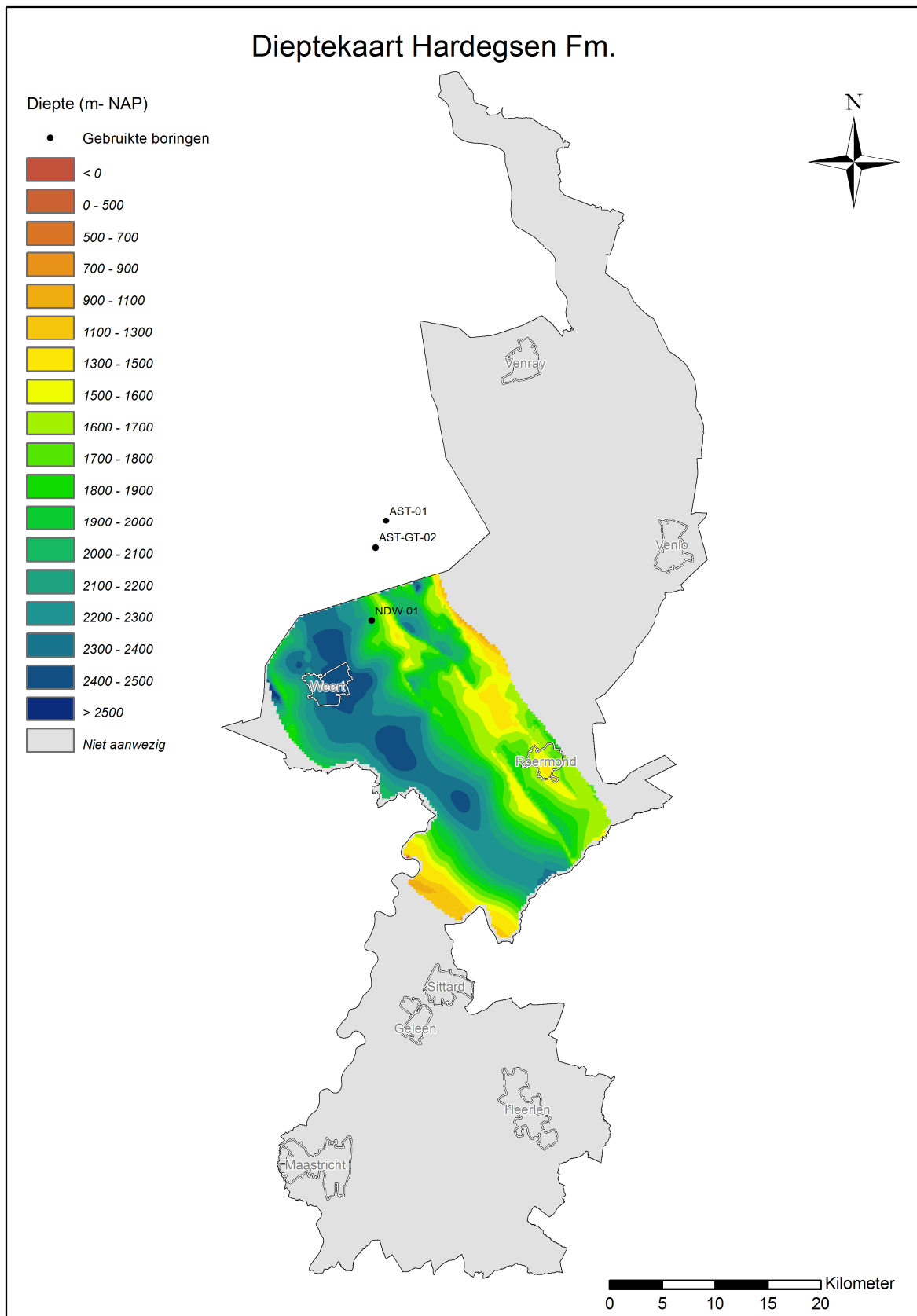


Figuur C.1. Diepte kaart van het Voort Laagpakket.

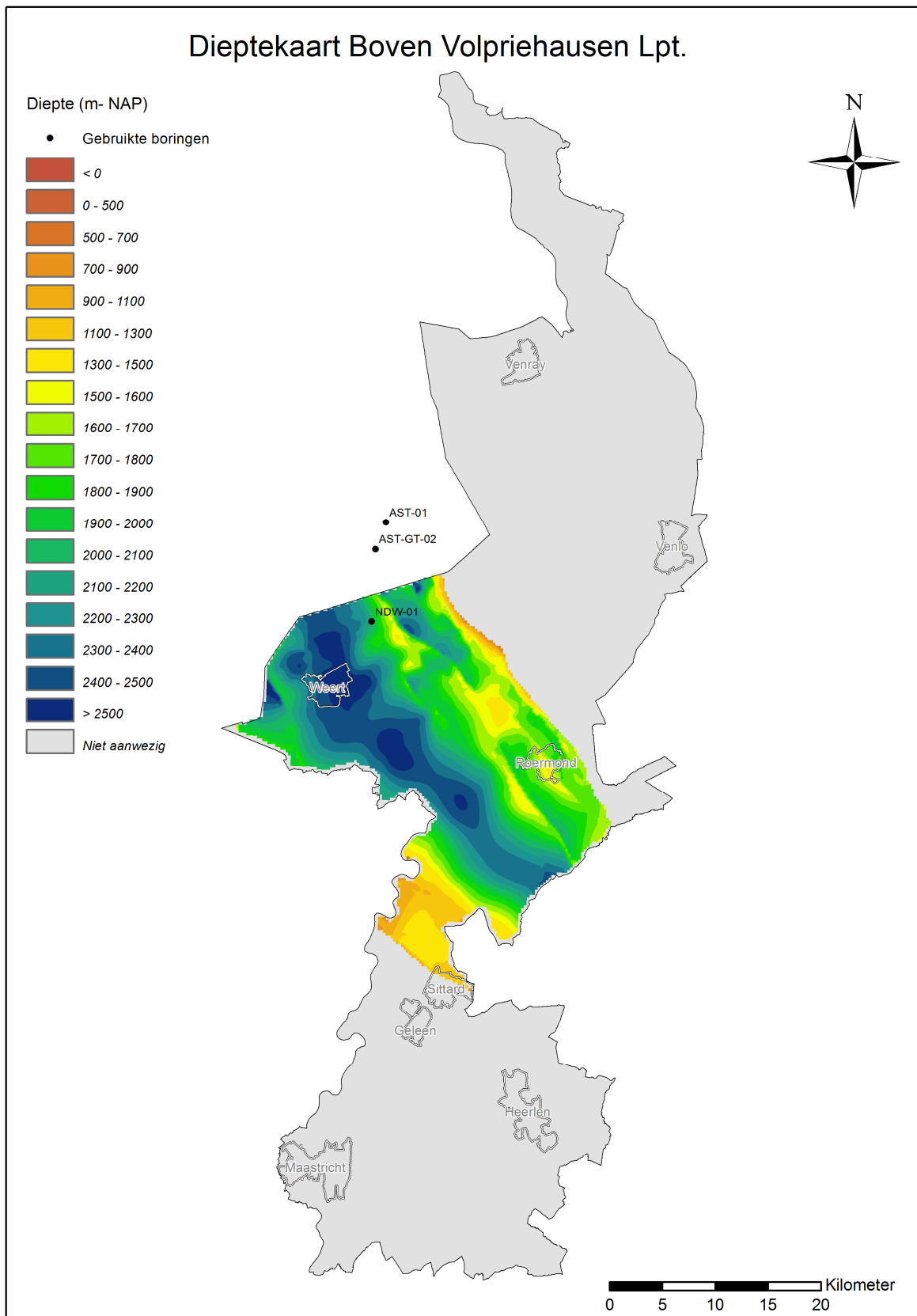


Figuur C.2. Dieptekaart van het Voort Laagpakket.

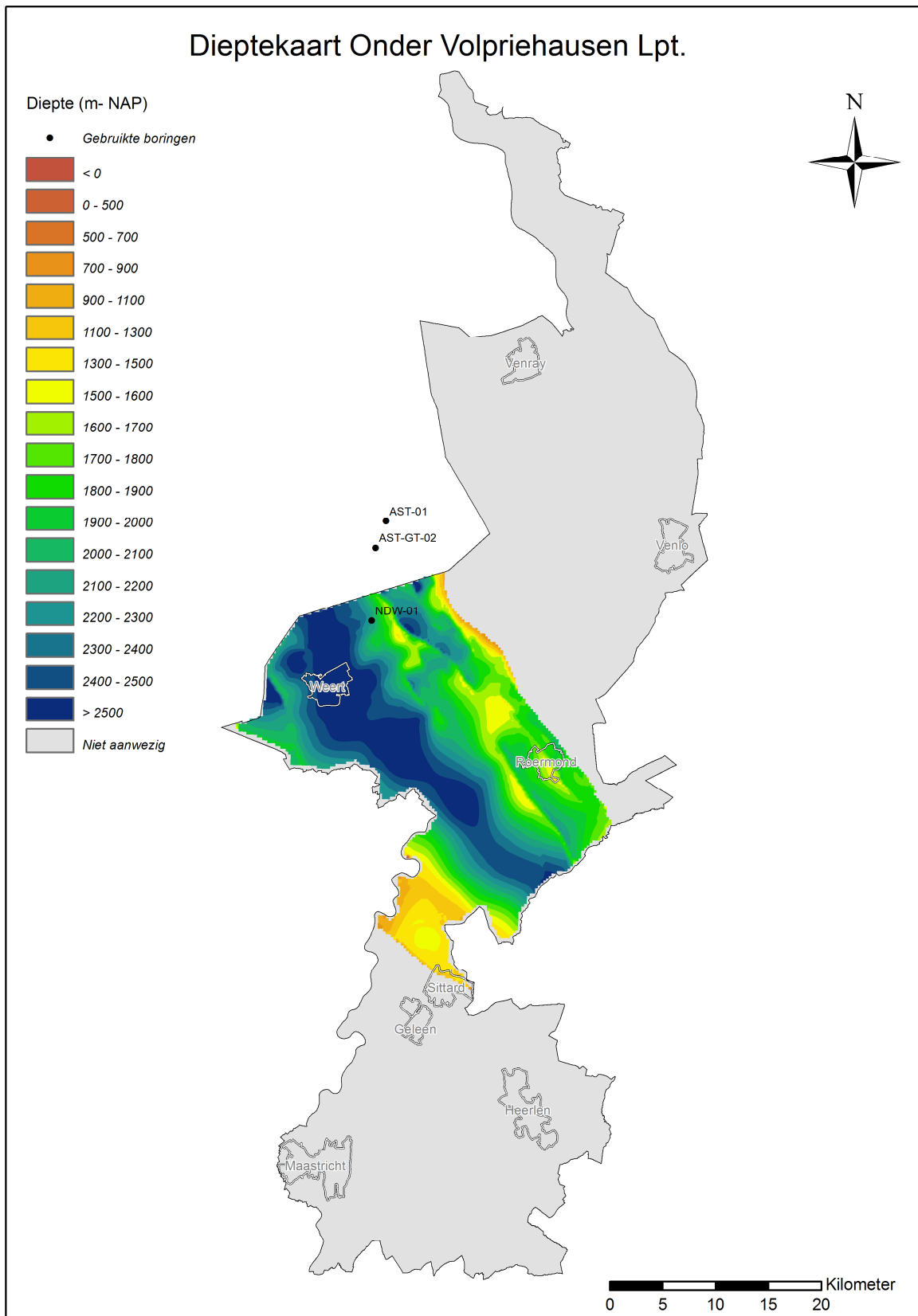




Figuur C.3. Dieptekaart van het Hardegsen Formatie.



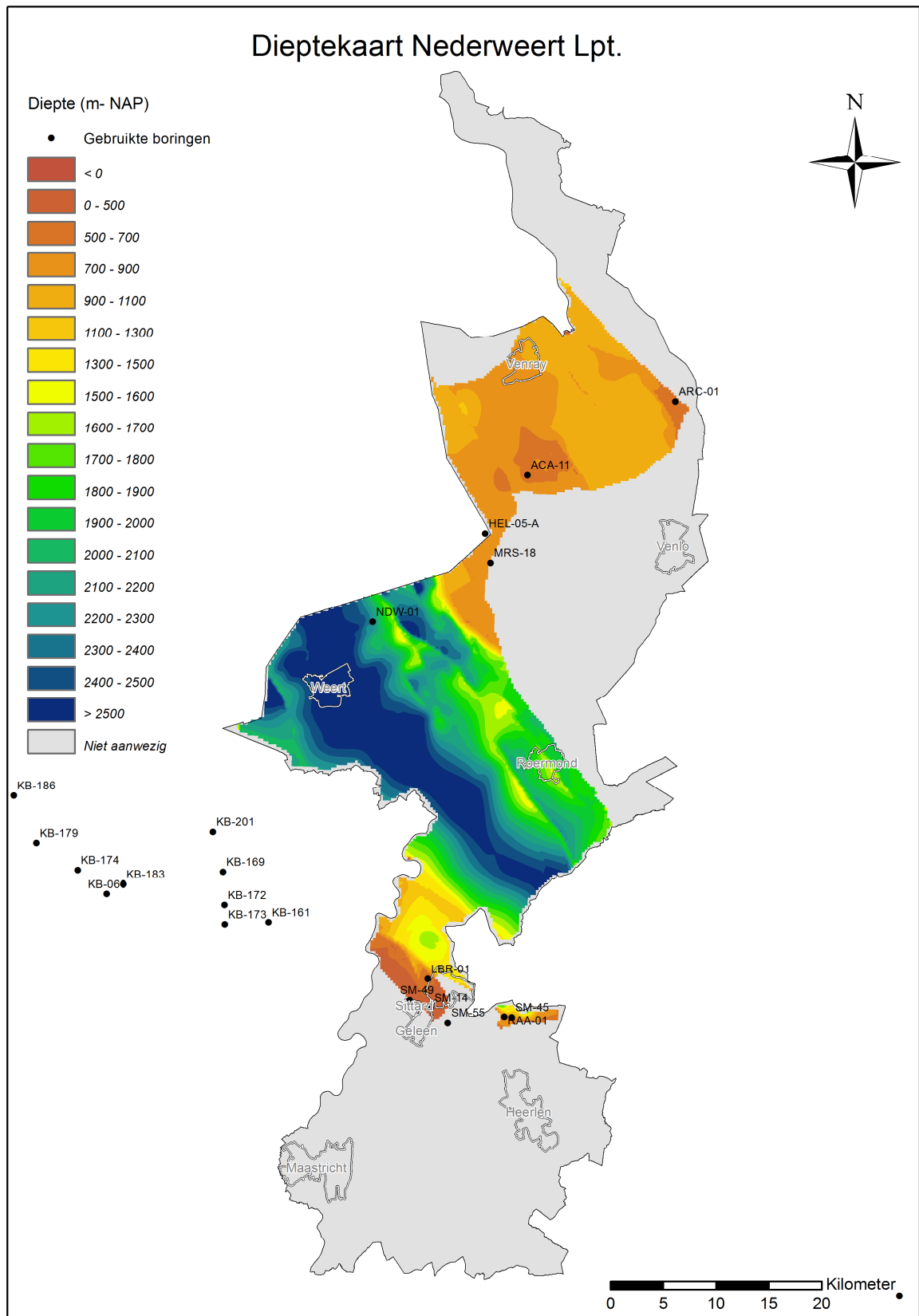
Figuur C.3. Dieptekaart van het Boven Volpriehausen Laagpakket.



Figuur C.4. Dieptekaart van het Onder Volpriehausen Laagpakket.

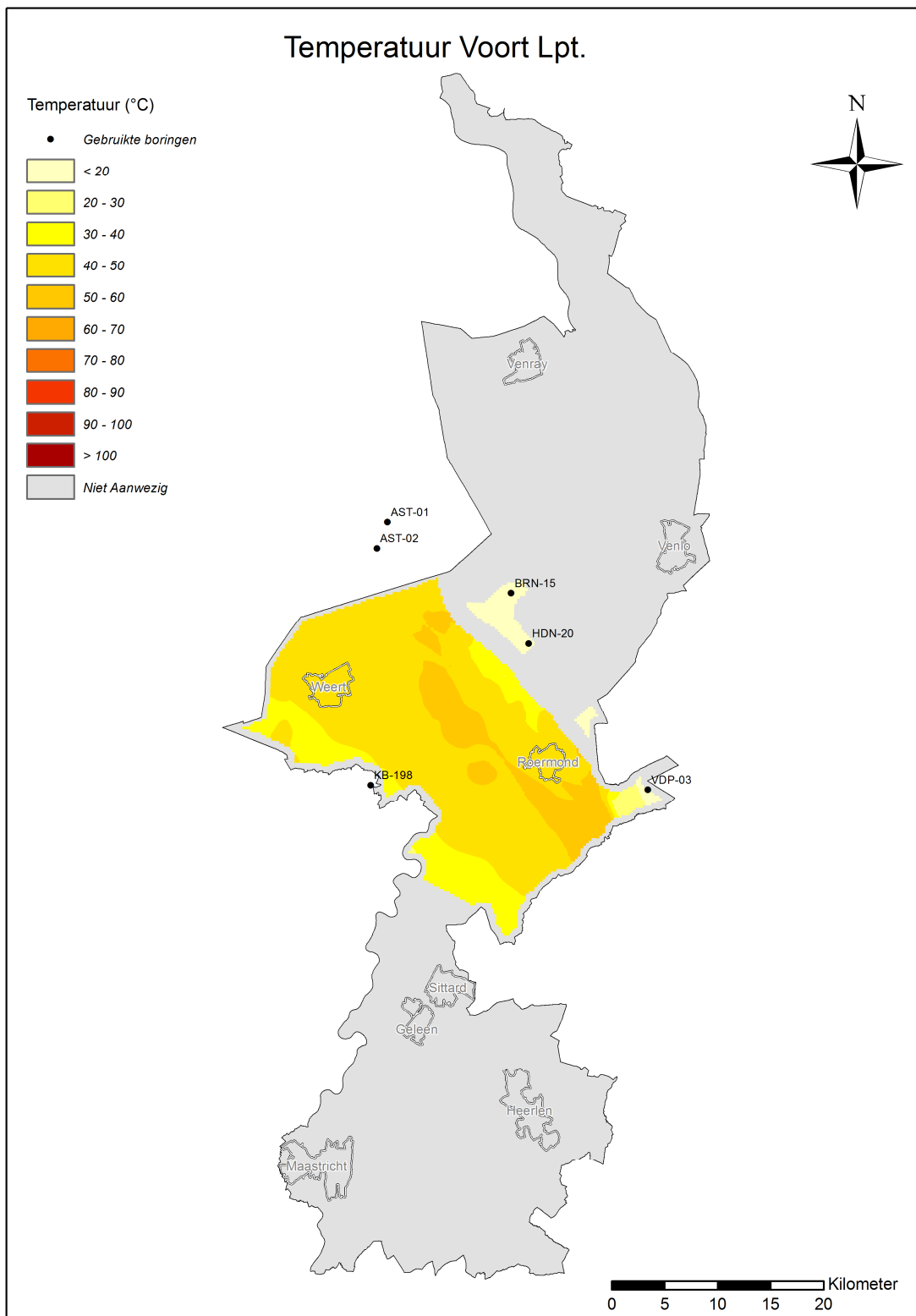
Figuur C.5. Dieptekaart van het Boven Detfurth Laagpakket.

Figuur C.6. Diepte kaart van het Onder Detfurth Laagpakket.

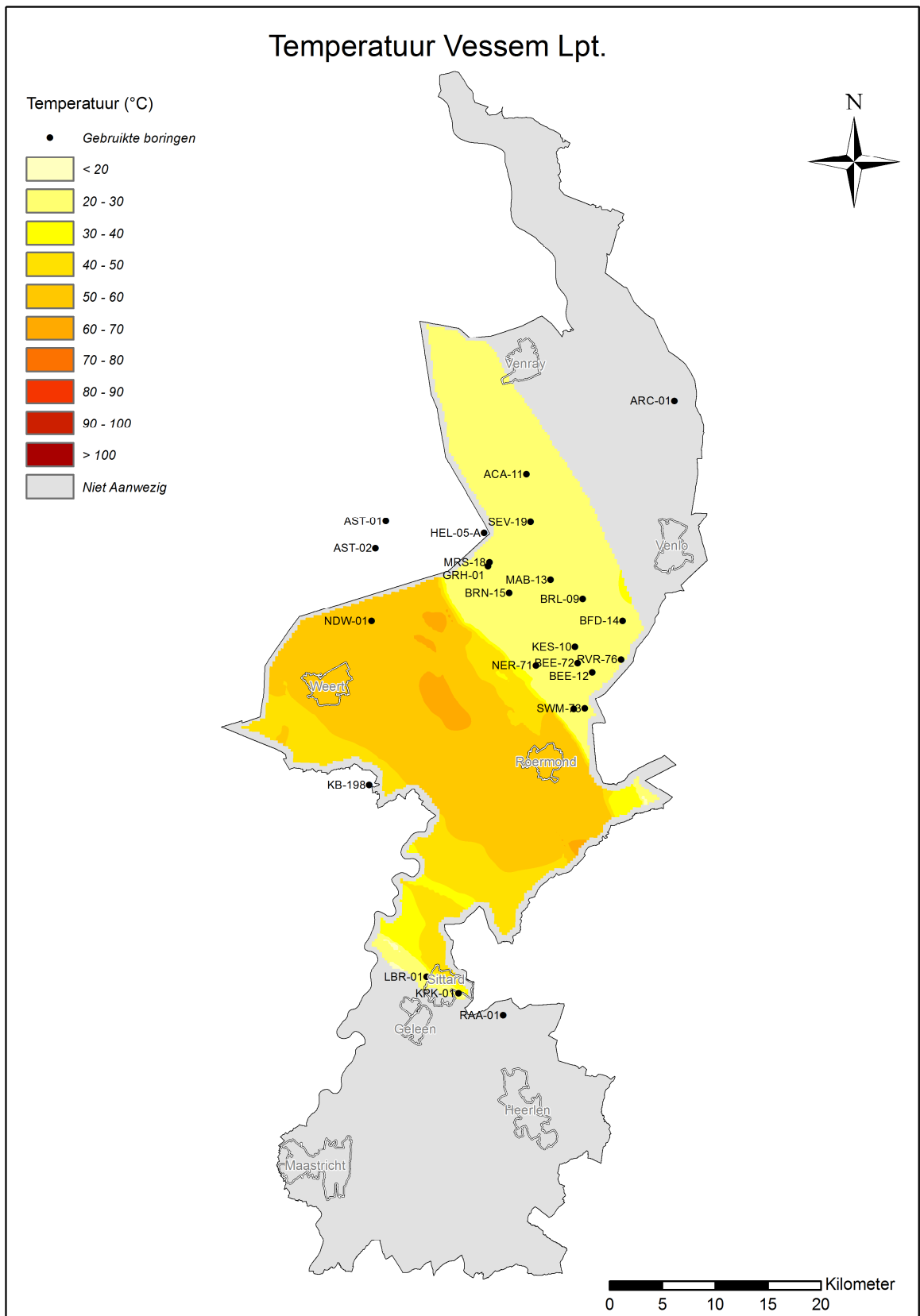


Figuur C.7. Dieptekaart van het Nederweert Laagpakket.

## D Temperatuurkaarten



Figuur D.1. Temperatuurkaart van het Voort Laagpakket.



Figuur D.2. Temperatuurkaart van het Vessem Laagpakket.



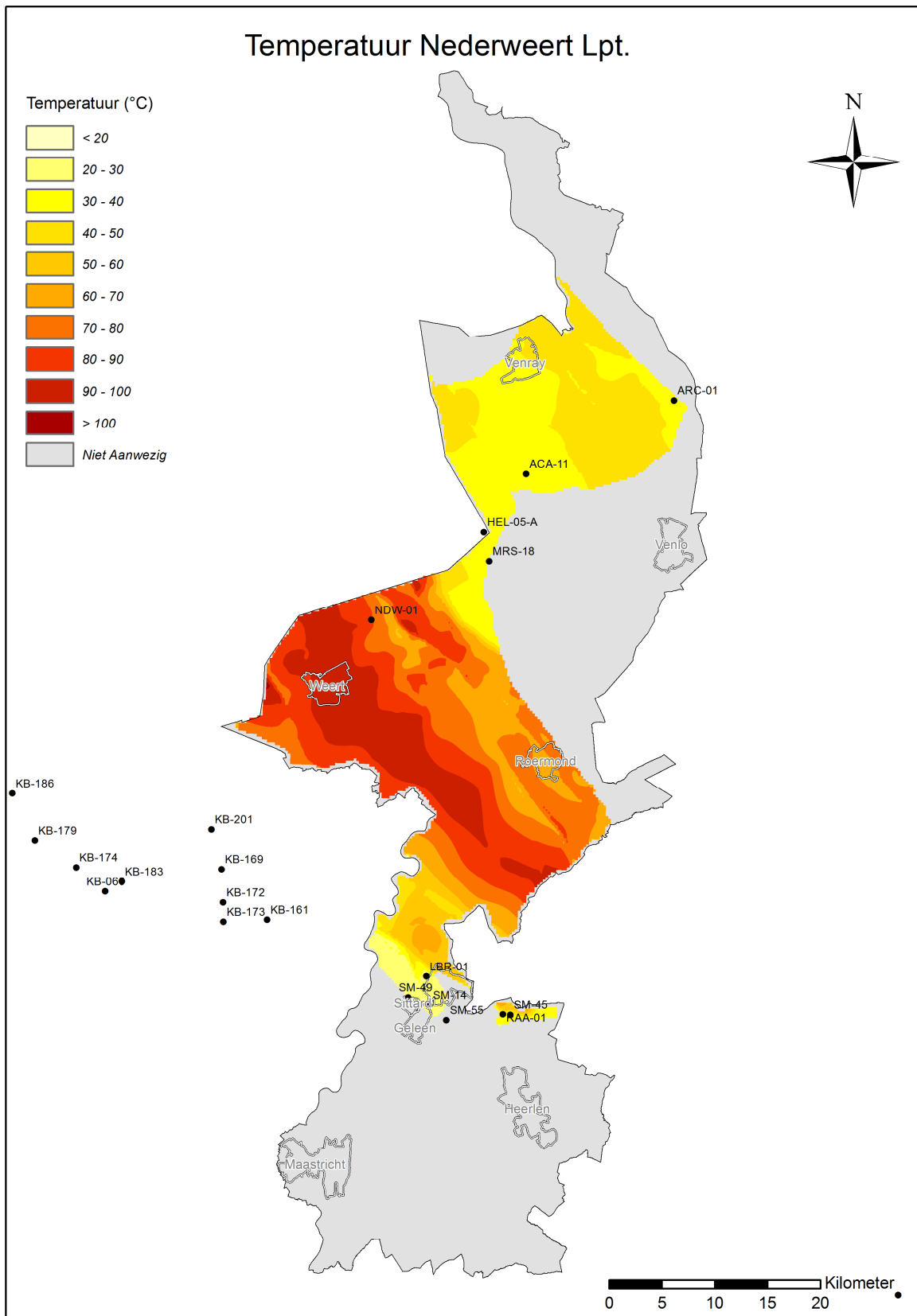
Figuur D.3. Temperatuurkaart van de Hardegsen Formatie.

Figuur D.4. Temperatuurkaart van het Boven Volpriehausen Laagpakket.

Figuur D.5. Temperatuurkaart van het Onder Volpriehausen Laagpakket.

Figuur D.6. Temperatuurkaart van het Boven Deifruith Laagpakket.

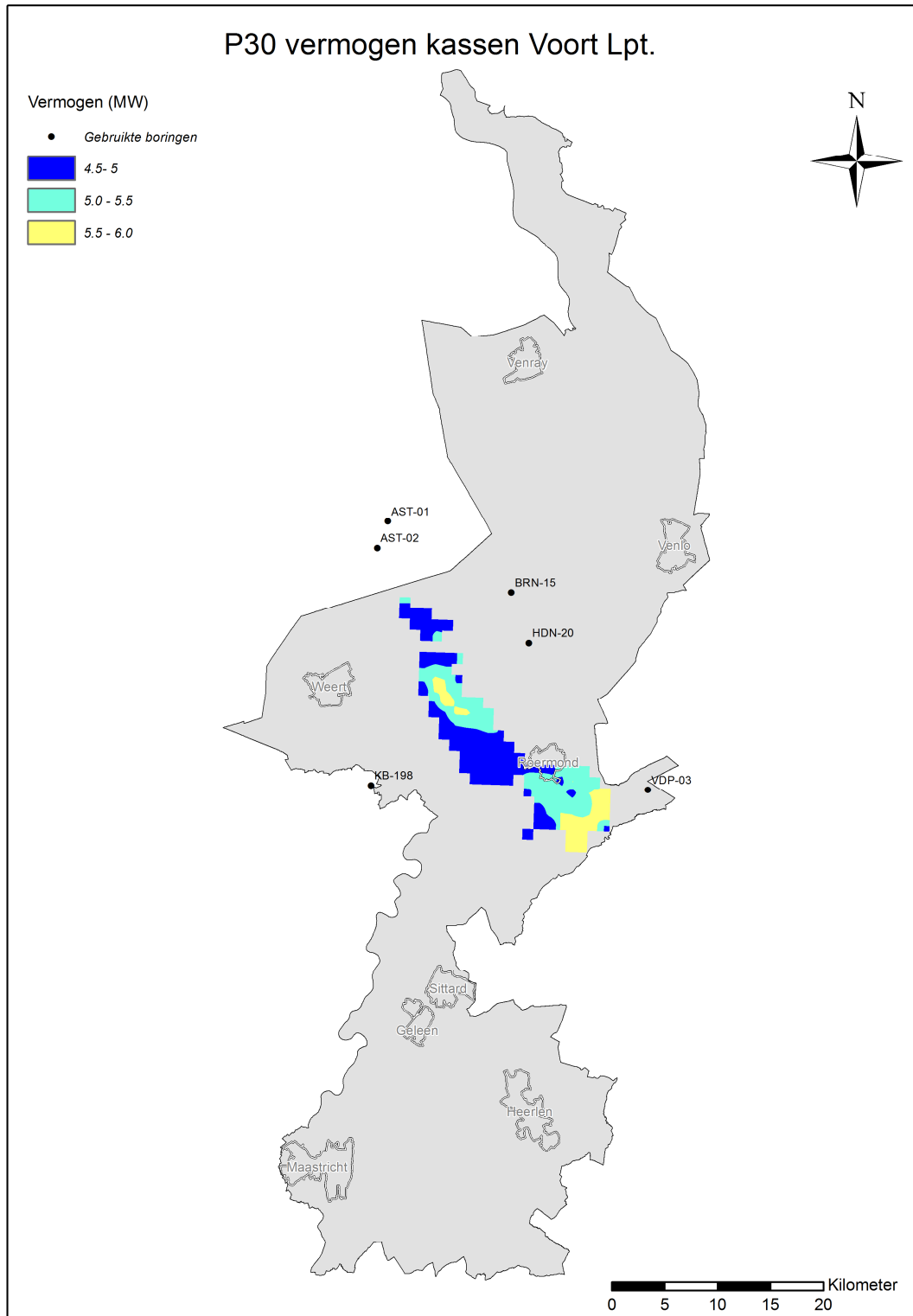
Figuur D.7. Temperatuurkaart van het Onder Detfruth Laagpakket.



Figuur D.8. Temperatuurkaart van het Nederweert Laagpakket.

Figuur D.9. Temperatuurkaart van het Kolenkalk Groep.

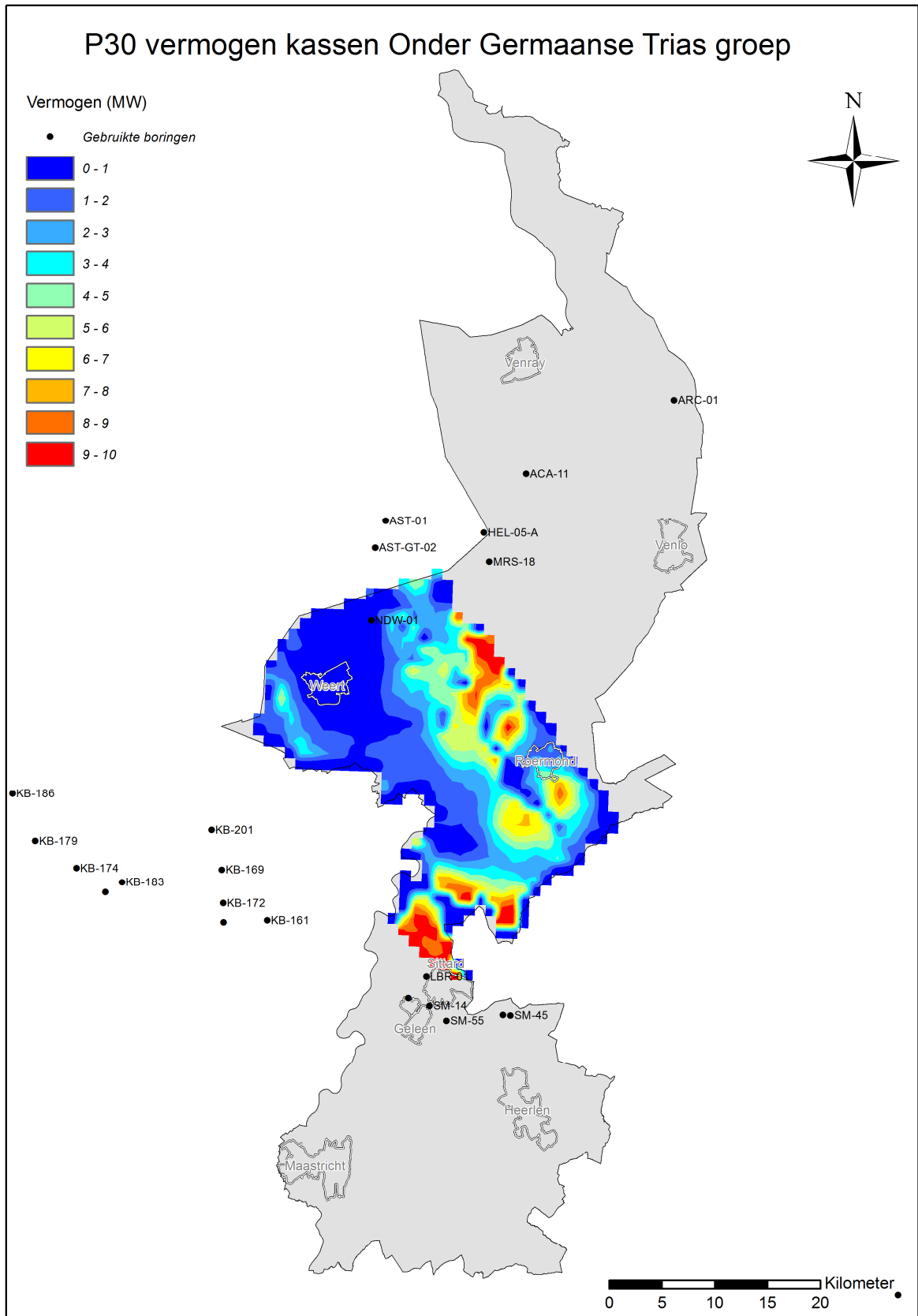
## E Vermogenskaarten bij P30



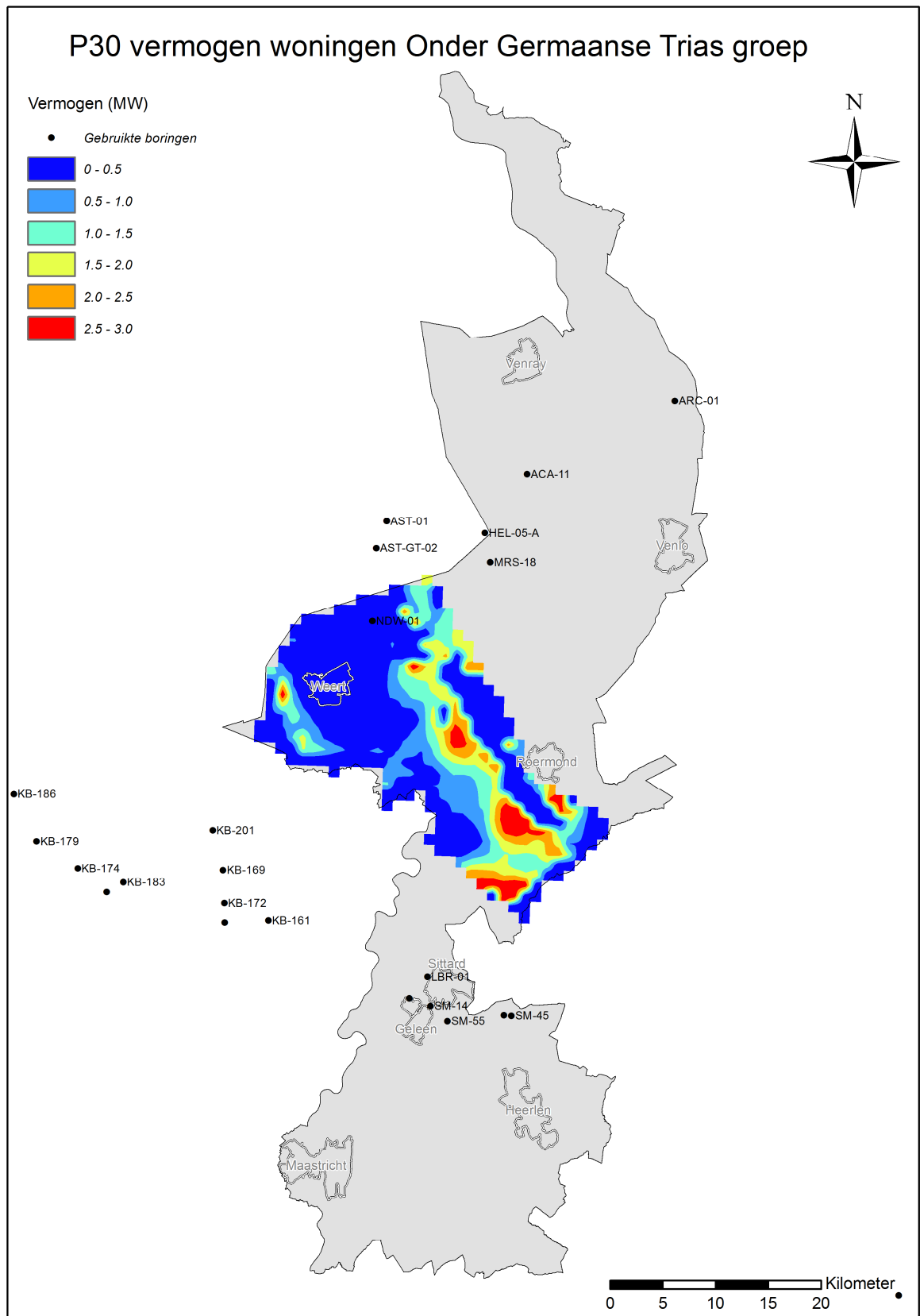
Figuur E.1. P30 vermogenskaart voor kassen van het Voort Laagpakket.



Figuur E.2. P30 vermogenskaart voor kassen van het Vessem Laagpakket.

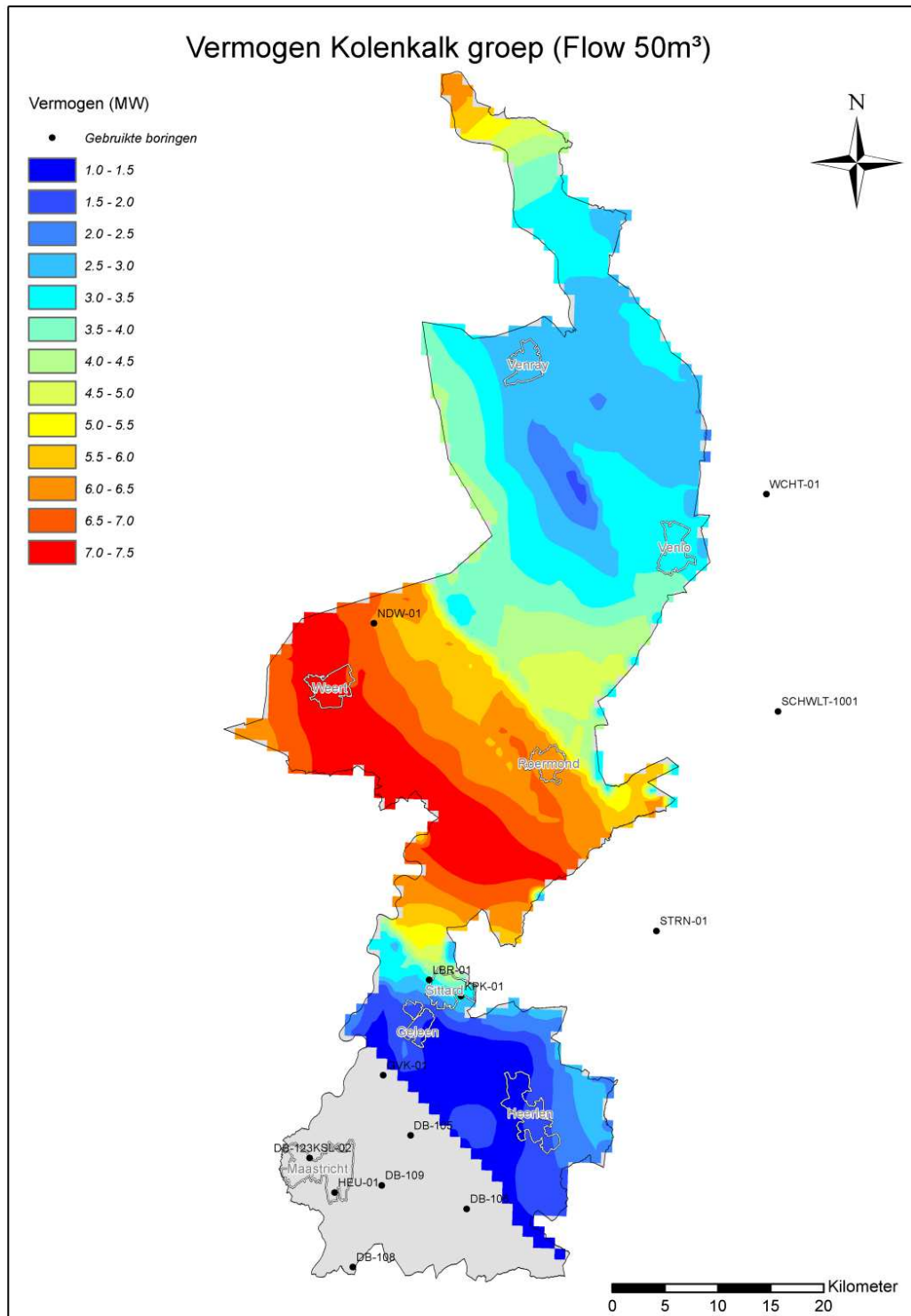


Figuur E.3. P30 vermogenskaart voor kassen van de Onder-Germaanse Trias Groep (exclusief Nederweer Laagpakket).



Figuur E.4. P30 vermogenskaart voor woningbouw van de Onder-Germaanse Trias Groep (exclusief Nederweert Laagpakket).

## F Vermogen indicatie Kolenkalk Groep



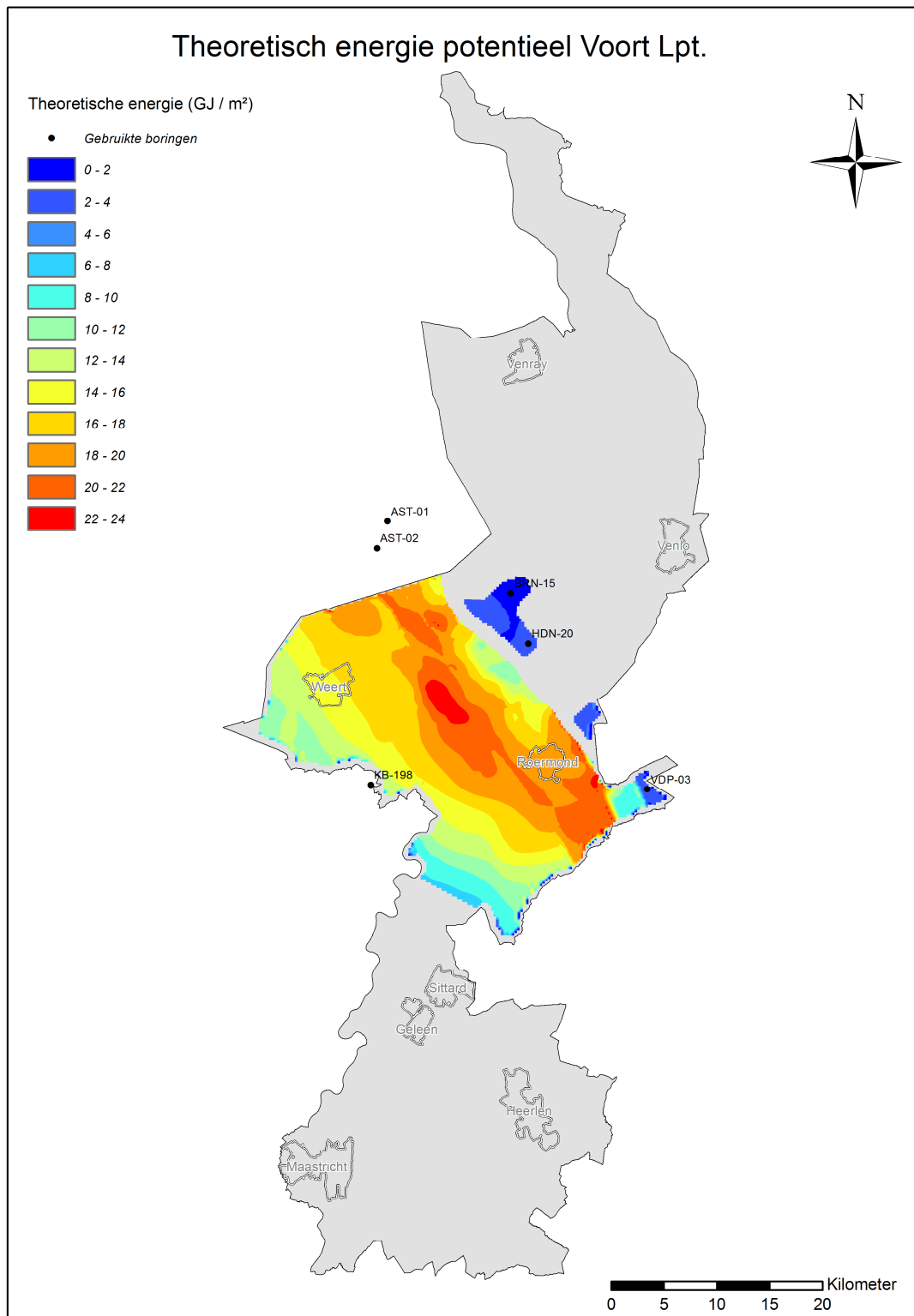
Figuur F.1. Grove indicatie van te winnen vermogen bij een debiet van 50 m<sup>3</sup>/u. Voor de berekeningen zijn het genoemde debiet en de temperatuur van de top Kolenkalk Groep gebruikt.

Figuur F.2. Grove indicatie van te winnen vermogen bij een debiet van  $100 \text{ m}^3/\text{u}$ . Voor de berekeningen zijn het genoemde debiet en de temperatuur van de top Kolenkalk Groep gebruikt.

Figuur F.3. Grove indicatie van te winnen vermogen bij een debiet van  $150 \text{ m}^3/\text{u}$ . Voor de berekeningen zijn het genoemde debiet en de temperatuur van de top Kolenkalk Groep gebruikt.

Figuur F.4. Grove indicatie van te winnen vermogen bij een debiet van  $200 \text{ m}^3/\text{u}$ . Voor de berekeningen zijn het genoemde debiet en de temperatuur van de top Kolenkalk Groep gebruikt.

## G Theoretisch energie potentieel kaarten



Figuur G.1. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Voort Laagpakket.



Figuur G.2. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Vessem Laagpakket.

Figuur G.3. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Hardegsen Formatie.

Figuur G.4. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Boven Volpriehausen Zandsteen Laagpakket.

Figuur G.5. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Onder Volpriehausen Zandsteen Laagpakket.

Figuur G.6. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Boven Detfurth Zandsteen Laagpakket.

Figuur G.7. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Onder Detfurth Zandsteen Laagpakket.

Figuur G.8. Theoretische hoeveelheid energie aanwezig in het Onder-Germaans Trias Groep (exclusief Nederweert Laagpakket).