

TNO-rapport

TNO 2016 R10803 | Eindrapport

Ultra-diepe geothermie: Overzicht, inzicht & to-do ondergrond

Earth, Life & Social Sciences

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

Datum	10 oktober 2016
Auteur(s)	T.A.P. Boxem, J.G. Veldkamp & J.D.A.M. van Wees
Aantal pagina's	53 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	EBN B.V.
EBN Projectnummer	B.5120.04
Projectnummer	060.22209

Inhoudsopgave

Overzicht van figuren	3
1 Inleiding	5
1.1 Leeswijzer	6
2 Ultradiepe geothermie	7
2.1 Relatie tot Hot Dry Rock/ Enhanced Geothermal Systems	9
2.2 Huidige kennis in Nederland	9
2.3 Vergelijkbare kennis in Europa	9
3 Play benadering voor ultradiepe geothermie	11
3.1 Verminderen van de onzekerheid	12
4 UDG Plays in Nederland	17
4.1 Plays in de Nederlandse ondergrond	17
4.2 Parametrisering plays	33
4.3 Ranking van de plays op ondergrondse potentie	34
4.4 Match met warmtevraag	36
4.5 Kennishiaten en te ontwikkelen ondergrondse kennis voor de Dinantien play	42
4.6 Outlook mogelijke Dinantien play ontwikkeling in Nederland 2017-2030	47
5 Conclusies en aanbevelingen	49
6 Referenties en overige relevante rapporten	51
6.1 Referenties	51
6.2 Relevante rapporten	52
Appendix 1: Overzicht van ervaring met UDG boringen/doubletten	53

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, 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 belanghebbenden is toegestaan.

Overzicht van figuren

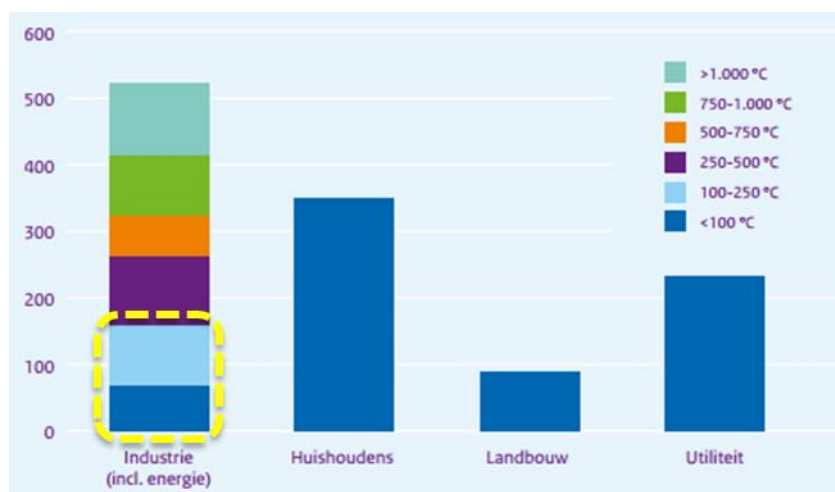
Figuur 1.1	Technische potentie voor warmtebesparing en duurzame warmte. (naar Energierapport Transitie naar duurzaam, EZ 2016)	5
Figuur 2.1	Overzicht van alle boringen op land uitgezet tegen de einddiepte. Blauw: olie- en gasboringen. 41 Putten zijn dieper dan 4 kilometer, 6 dieper dan 5. 7	
Figuur 2.2	Indicatieve typische temperatuurranges voor de verschillende gebruiksfunctie van warmte (Bron: pers.comm. A. Kalkman, TNO 2016).....	8
Figuur 3.1	Voorbeeld van een vermogensverwachtingscurve voor een conventioneel geothermisch project (Mijnlieff et al. 2014). De kans dat in dit geval van conventionele geothermie een vermogen groter dan 6.43 MW wordt gehaald is 90%. De kans dat een vermogen groter dan 11.22 MW wordt gehaald is 10%.	15
Figuur 3.2	Verwachtingscurve voor geothermisch vermogen voor en na onzekerheidsreductie voor een hypothetisch doublet.	16
Figuur 4.1	Paleo-geografische interpretaties van het Midden tot Vroeg-Laat Devoon (links) en Laat Devoon (rechts). De continentale afzettingen van de Old Red Sandstone in de Nederlandse onshore zijn waarschijnlijk zeer dun of afwezig. De Condroz Zandsteen is mogelijk aangetroffen in de geothermieboringen in Californië. Lithologische symbolen als in Figuur 4.2. Bron: Wong et al. 2007.	20
Figuur 4.2	Schematische stratigrafie van het pre-Silesien (Dinantien en ouder) op basis van boringen op het Mid North Sea High and het Brabant Massif (zie Figuur 4.1). De interpretatie tussen beide in is zeer speculatief. Kleurcodes: rood/oranje: continentaal, geel: marien, groen: grotendeels marien blauw: carbonaat. Bron: Wong et al. 2007.	20
Figuur 4.3	Schematische dwarsdoorsnede over het Groningen-platform (locatie 1 uit Figuur 4.6). Bron: Kombrink 2008. De carbonaten uit het Tournaisien zijn 'ramps', die uit het Visean 'platforms'.	22
Figuur 4.4	Schematische voorstelling van een Dinantien-platform, waarin de verschillende facies zijn aangegeven, en de plaatsen waar permeabiliteit mogelijk aangetroffen kan worden (locatie 4 uit Figuur 4.6). Aangepast naar Total, 2007.	22
Figuur 4.5	Vorming van secundaire permeabiliteit ('leached Ist') als gevolg van droogvallen (meteorische karst) of breukwerking (hydrothermale karst) in het Devoon van West-Canada. Bron: Graham Davies, in Grammer et al. 2014.....	22
Figuur 4.6	Onderverdeling van de gesteenten van Dinantien-ouderdom in Nederland. De zwarte stippen zijn boringen die dit gesteente hebben aangeboord. Bron: Boots (2015), Hoornveld (2013), Kombrink (2008), TNO...	24
Figuur 4.7	Overzicht van de verschillende UDG plays in Nederland naar type gesteente, type doorlatendheid en voorkomende geologische formaties.	25
Figuur 4.8	Verwachte formaties op de diepte van de 120°C isotherm.....	27
Figuur 4.9	Verwachte formaties op de diepte van de 140°C isotherm.....	28
Figuur 4.10	Verwachte formaties op de diepte van de 160°C isotherm.....	29

Figuur 4.11	Verticale doorsnede door de Nederlandse ondergrond. Het rode kader geeft bij benadering het temperatuurbereik vanaf 120°C aan. De dikte van het Dinantien is onzeker en daarom met een stippellijn aangegeven.	30
Figuur 4.12	De verticale doorsnedes Tilburg – Hengelo (C-D) en Haarlem – Dokkum (E-F) bevestigen het beeld van Figuur 4.11 voor wat betreft de verwachte formaties op grote diepte.	30
Figuur 4.13	Temperatuur op de diepte van de top van het Trias. Gesteenten van deze ouderdom bereiken een temperatuur van > 120°C in West Nederland. In het grootste deel van Nederland is de Trias koeler dan 120°C.	31
Figuur 4.14	Temperatuur op de diepte van de top van het Rotliegend. Gesteenten van deze ouderdom bereiken een temperatuur van meer dan 120°C vooral in West Nederland en in het gebied tussen Eindhoven en Den Bosch. De dikte van het Rotliegend is hier echter zeer beperkt.	32
Figuur 4.15	Temperatuur op de diepte van de top van het Dinantien. Vanwege de diepe ligging bereiken gesteenten van deze ouderdom een temperatuur van meer dan 120°C in een groot deel van Nederland. Een temperatuur van meer dan 240°C wordt problematisch verondersteld voor standaard boorapparatuur.	33
Figuur 4.16	Dwarsdoorsnede door het West-Nederland Bekken. De dikte van het Rotliegend is gering en neemt naar het zuiden toe verder af. De dikte van de Trias is het grootst in het centrum van het bekken.	35
Figuur 4.17	Momenteel bij TNO/EBN bekende locaties waar door partijen interesse is getoond in ultradiepe geothermie.	37
Figuur 4.18	Industriële warmtevragers in Nederland (chemische, papier(waren)- en voeding- en genotsmiddelenindustrie). Minimale warmtevraag 100 TJ/jaar. Bron: RVO Warmteatlas.	39
Figuur 4.19	Overzicht van de huidige warmtenetten in Nederland (bron: RVO Warmteatlas).	40
Figuur 4.20	Gecombineerd overzicht van de Dinantien-play en de industriële warmtevraag van Figuur 4.18.	41
Figuur 4.21	3D en digitale 2D seismiek in de Nederlandse onshore (links), en locaties waar het Dinantien op seismiek geïnterpreteerd is (rechts). In aanzienlijke delen van Nederland is het Dinantien op de huidige seismiek niet of moeilijk te interpreteren.	43
Figuur 4.22	Oblique aanzicht van de top van het Dinantien (paars = diep, rood = ondiep). De ellipsen geven de locaties van mogelijke maar nog niet aangetoonde platforms.	46
Figuur 4.23	Schematische weergave van de toename van kans op succes en geassocieerd thermisch vermogen, door het doorlopen van de leercurve van de play voor meerdere UDG projecten.	48

1 Inleiding

De Nederlandse samenleving staat voor een grote uitdaging met betrekking tot het verduurzamen van onze energievoorziening. Deze uitdaging staat geformuleerd in het Energieakkoord. Dit akkoord bepaald een doel van 14% duurzame energie in 2020, wat naar 2023 moet doorgroeien naar een aandeel van 16% in de totale energiemix. Het leveren van duurzame warmte kan een grote bijdrage leveren aan deze doelstellen. Per jaar is er circa 170 PJ aan industriële warmtevraag van 100 tot 200 °C. Daarnaast is er volgens het Ministerie van Economische Zaken nog een circa 650 PJ per jaar aan warmtevraag van minder dan 100 °C vanuit de glas- en tuinbouw en de gebouwde omgeving.

Hieronder is een specificatie van de kansen voor warmte weergegeven die het potentieel laat zien voor de warmtebesparing en hernieuwbare warmte. Hieruit is af te leiden dat er een match is met UDG die bestaat uit ca. 170 PJ vanuit de industrie, ca. 350 PJ vanuit huishoudens, ca. 90 PJ vanuit de landbouw en nog eens 225 PJ vanuit de utiliteit.



Figuur 1.1 Technische potentie voor warmtebesparing en duurzame warmte. (naar Energierapport Transitie naar duurzaam, EZ 2016)

Ook na 2030 blijft er een functionele warmtevraag van circa 75 PJ vanuit de industrie die aansluit bij UDG. Binnen deze industrie komt de grootste vraag uit de chemische industrie (~27 PJ), de papier(waren)- en kartonindustrie (~18 PJ) en de voedings- en genotsmiddelenindustrie (~27 PJ). Daarnaast kan er op de langere termijn natuurlijk ook gekeken worden naar de mogelijkheden voor conversie van geothermische warmte naar duurzame elektriciteit.

In dit project worden de mogelijkheden van ultra-diepe geothermie verkend, zodanig dat het een bijdrage kan leveren aan de doelstellingen uit het Energieakkoord voor 2020 en 2023, met als doel om tot een haalbaar voorstel te komen voor de ontwikkeling van UDG met concrete pilot projecten wat aan de Minister van Economische Zaken voorgelegd kan worden.

Als onderdeel van deze verkenning, wordt in dit rapport specifiek aandacht besteed aan de geologische component van UDG. Zo stelden een samenwerking tussen IF

Technology en ECN, in opdracht van RVO, nog in 2014 dat 'de onzekerheid en onbekendheid van de ondergrond in combinatie met de relatief hoge investeringen werken door in de besluitvorming op financieel en organisatorisch niveau'.

Voor warmte uit duurzame bronnen is er een potentieel berekend van ongeveer 200 tot 550 PJ. Geothermie vormt hiervoor de belangrijkste bron naast restwarmte. De temperatuur van circa 31% van de industriële warmtevraag ligt tussen 100 en 200°C. Verder is een grote potentiële warmtevraag voor lagere temperatuur warmte in de gebouwde omgeving en in de glastuinbouw (< 100°C Energierapport, 2016). Alleen UDG op een diepte tussen de 4 à 8 km kan in de hogere temperatuurvraag tussen van 100 tot 200°C voorzien. UDG kan het ook het segment met lagere temperatuur warmtevraag bedienen. Het optimaal benutten van een UDG bron is belangrijk voor het genereren van inkomsten om daarmee de investering terug te verdienen.

In het voortraject hebben EBN en TNO het volgende vastgesteld:

- Er is een aanzienlijke warmtevraag in Nederland waar ultra-diepe geothermie mogelijk in kan voorzien.
- De Nederlandse ondergrond biedt een groot potentieel voor duurzame warmtevoorziening. Dit deel van de ondergrond is nog zeer onbekend. Daarom is risico-reductie ('derisking') noodzakelijk.

Deze twee stellingen zullen in dit rapport verder onderbouwd worden.

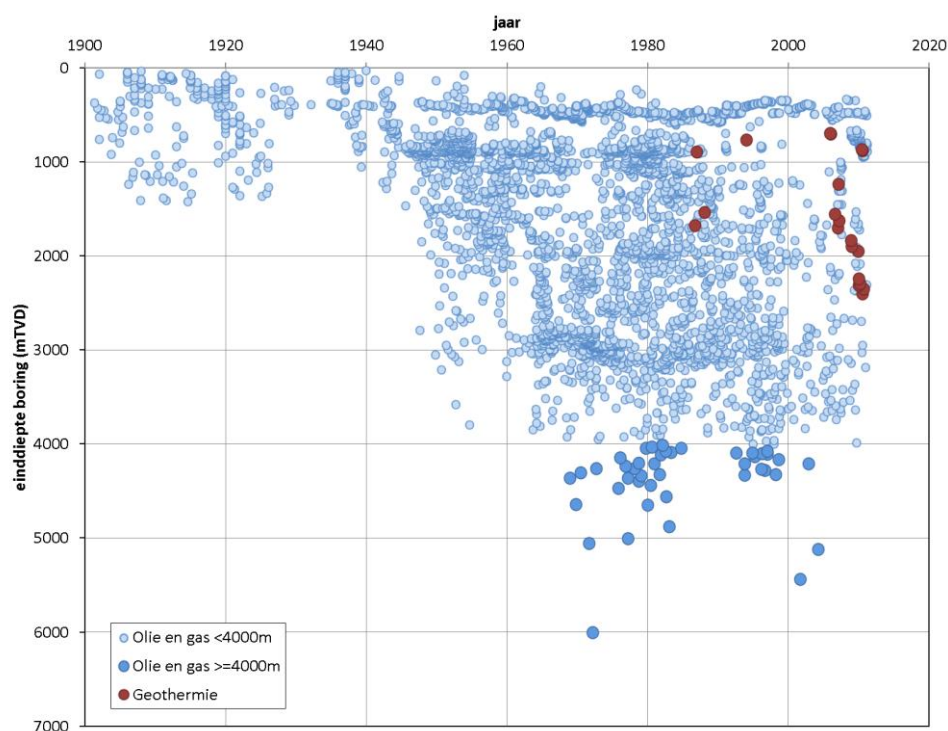
1.1 Leeswijzer

In het rapport wat hier voor u ligt kunt u een overzicht vinden van de stand van zaken en state-of-the-art kennis met betrekking op ultra-diepe geothermie, een synthese van inzichten voor de ontwikkeling van ultra-diepe geothermie in Nederland en een samenvatting van de mogelijke oplossingsrichtingen om het vermogen van ultra-diepe geothermie in Nederland te ontsluiten.

Hoofdstuk 2 gaat in op de definitie van ultra-diepe geothermie. Hoofdstuk 3 bevat een beknopt overzicht van bestaande kennis uit Nederlandse en Europese projecten waaruit geput kan worden, en geeft de relevantie voor de ontwikkeling van ultra-diepe geothermie in Nederland. Hoofdstuk 4 presenteert de principes van 'play-ontwikkeling'. In hoofdstuk 5 worden de in Nederland onderscheiden plays toegelicht. Ook wordt kort ingegaan op de match met de bovengrondse energievraag die past bij UDG. Afsluitend vat hoofdstuk 6 de conclusies samen, en geeft aanbevelingen voor het ontsluiten van de UDG-potentie in Nederland.

2 Ultradiepe geothermie

In Nederland is al ruim 4000 maal geboord op land naar een diepte van meer dan een kilometer. Wat als gevolg van de ontdekking van zout in de Nederlandse ondergrond door Jonkheer van Heeckeren van Wassenaar in 1886 begon, nam de jaren 50 een enorme vlucht. Al deze boringen leveren een schat aan informatie over de ondergrond. Nederland is een van de landen met de meest uitgebreide openbare dataverzameling van de ondergrond. Figuur 2.1 laat de relatie zien tussen de ouderdom van de boringen en de einddiepte. Hoewel er al sinds de jaren 70 tot grote diepte wordt geboord, is het aantal boringen dieper dan vier kilometer zeer beperkt. Olie- en gasvoorkomens beperken zich – met name door toenemende druk en temperatuur met de diepte – tot de bovenste circa vier kilometer van de ondergrond. De kennis van de ondergrond vermindert sterk met toenemende diepte.

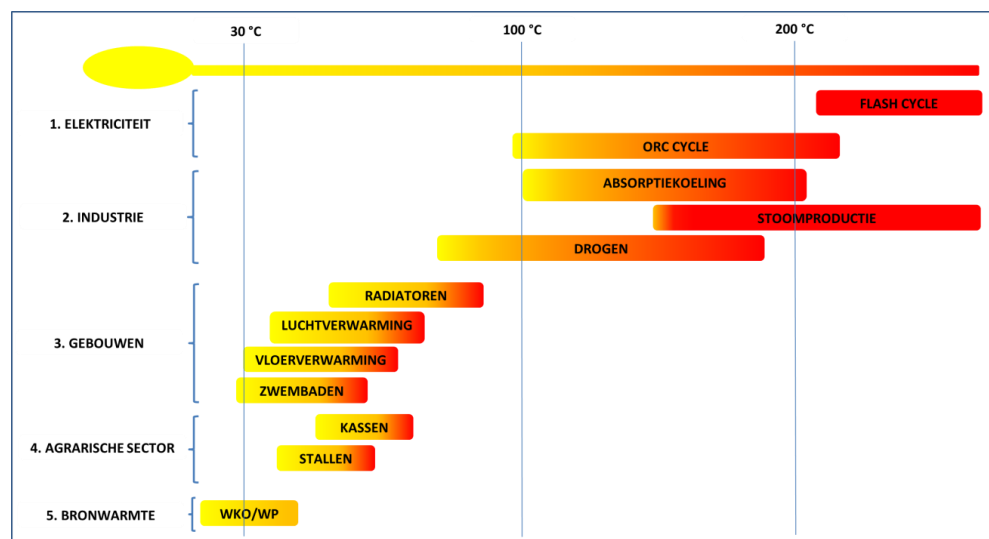


Figuur 2.1 Overzicht van alle boringen op land uitgezet tegen de einddiepte. Blauw: olie- en gasboringen. 41 Putten zijn dieper dan vier kilometer, 6 dieper dan 5.

Het gebruik van de term 'diep' in UDG suggereert dat diepte het voornaamste criterium voor de definitie is. Belangrijker dan diepte is echter temperatuur. De op dit moment bekende potentiële UDG-projecten vragen stoom en/of elektriciteit. Hoewel elektriciteitsopwekking al bij relatief lage temperatuur mogelijk is, is het rendement erg laag. Acceptabele rendementen worden pas gehaald wanneer de temperatuur van de stoom ruim boven de 100 °C ligt¹. Deze grens is niet hard –

¹ Elektriciteit wordt in Duitsland geproduceerd in 12 aardwarmtecentrales (zowel primair als secundair). De laagste temperatuur is 124 °C (Unterhaching, 3350 meter diepte, primair gebruik stadsverwarming, elektriciteit secundair), de hoogste 165 °C (Insheim, 3600 meter diepte). De debieten liggen bij benadering tussen de 250 en 500 m³/hr. Bron: GeoTis.de

hoe hoger de temperatuur, hoe hoger het rendement -, en kan verschillen per toepassing. Voor verschillende toepassingen zijn passende temperatuurranges. Figuur 2.2 laat bijvoorbeeld zien dat voor elektriciteitsopwekking middels ORC (Organic Rankine Cycle) het temperatuurbereik ongeveer tussen 100 en 220 °C ligt. Figuur 2.2 biedt ook een overzicht van de verschillende typische temperatuurranges voor het gebruik van (duurzame) warmte voor elektriciteit, industrie, de gebouwde omgeving, de agrarische sector en bronwarmte.



Figuur 2.2 Indicatieve typische temperatuurranges voor de verschillende gebruiksfunctie van warmte (Bron: pers.comm. A. Kalkman, TNO 2016)

In Nederland is een relatief stabiele geothermische gradiënt van 30 à 33 °C per kilometer in de ondergrond. Bij deze gradiënt wordt een temperatuur van 150 °C op ongeveer vier tot vijf kilometer diepte aangetroffen. Vanwege laterale en verticale variaties in de voorkomende typen gesteente in de ondergrond, en de verschillende geologische geschiedenis, kan de (ondiepe) bovengrens van het ultra-diepe temperatuurdomein lokaal dieper of ondieper liggen.

Definitie: de bronnen die onder ultra-diepe geothermie worden gegroepeerd worden gekarakteriseerd door een combinatie van grote diepte (ongeveer 4 kilometer en dieper) en een temperatuur hoger dan 120°C.

In eerste instantie wordt een ondergrens aangehouden die bepaald is op basis van de huidige staat van de techniek. De maximale productietemperatuur wordt op dit moment op 250°C gesteld, omdat bij hogere temperaturen meetinstrumenten niet meer werken en verschillende losse onderdelen van een boorgat tot problemen kunnen leiden.

Het gebrek aan gegevens en kennis van de ondergrond dieper dan ongeveer vier kilometer brengt extra uitdagingen met zich mee. De onzekerheden die gepaard gaan met de schaarste van data verhoudt zich direct tot de risico's aan de voorkant van een ultra-diep geothermie project.

2.1 Relatie tot Hot Dry Rock/ Enhanced Geothermal Systems

‘Hot Dry Rock’ (kort: HDR) en ‘Enhanced (of Engineered) Geothermal Systems’ (kort: EGS) zijn theoretisch speciale gevallen van UDG. UDG wordt gekenmerkt door een combinatie van hoge temperatuur (~120 – 240°C) op grote diepte (~4 – 8 km), maar zegt niet zo veel over de eigenschappen van het gesteente waaruit warmte wordt geproduceerd.

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

Bij een EGS geldt dat de natuurlijke eigenschappen van het gesteente te slecht zijn om voldoende debiet te halen, terwijl zich in het gesteente wel water bevindt. In dit geval worden de eigenschappen van de ondergrond verbeterd (enhanced) door middel van stimulatietechnieken, waaronder hydraulische stimulatie of zuren. In de praktijk is gebleken dat zogenaamde hot dry rock projecten veelal gekenmerkt worden door het voorkomen van vloeistoffen op grote diepte in basement gesteentes. Daarom wordt de term Hot Dry Rock niet meer gebruikt (zie bijvoorbeeld IEA geothermal energy roadmap).

De definities van HDR en EGS zijn niet eenduidig en overlappen deels. Ze worden daarom in dit rapport verder niet gebruikt.

2.2 Huidige kennis in Nederland

Degens et al. (2012) geven een overzicht van operationele problemen in conventionele Nederlandse doubletten. Omdat in Nederland nog geen zeer diepe doubletten zijn geboord, is er nog geen ervaring met of kennis van mogelijke problemen die gepaard gaan met zeer diepe geothermieboringen. In zijn algemeenheid werden en worden de voornaamste problemen in de doubletten veroorzaakt door onnauwkeurig handelen tijdens het boren, en onjuiste materiaalkeuzes. Tijdens de operationele fase zijn de voornaamste bekende problemen corrosie en scaling. Deze worden beheersbaar verondersteld wanneer de juiste maatregelen worden genomen met betrekking tot het gebruik van de juiste materialen en inhibitors (tegen corrosie en scaling).

2.3 Vergelijkbare kennis in Europa

Omdat de ondergrond niet buiten de landsgrenzen ophoudt, is het waardevol om te kijken naar geothermieprojecten in het buitenland die mogelijk relevant zijn voor de ontwikkeling van UDG in Nederland. Daarnaast kunnen de huidige geothermieprojecten, hoewel niet in het speelveld wat ultradiepe heet, ook inzichten brengen die van waarde kunnen zijn. Het verkrijgen van dit overzicht draagt bij aan het verkrijgen van een compleet overzicht van de kritische parameters, de bottlenecks en kansen voor het vermogen van een UDG project.

Appendix 1 biedt een overzicht van mogelijk relevante doubletten, waaruit leerervaringen bij kunnen dragen aan de ontwikkeling van UDG in Nederland. Het

aantal zeer diepe doubletten in sedimentaire gesteenten in Europa is beperkt. Wel zijn er diverse systemen waar water en stoom van hoge temperatuur wordt geproduceerd uit relatief ondiepe reservoirs (o.m. IJsland), of uit diepe reservoirs in verbreukt basement (systemen in de Rijnslenk zoals Soultz-sous-forêts, 3600-5400m diepte). Van het doublet in Gross Schönebeck, geboord in gesteenten uit het Rotliegend op ruim vier kilometer diepte, is veel bekend. Dit doublet is gefrackt.

Corrosie en neerslag van mineralen (waardoor m.n. de injectiviteit afneemt) lijken de voornaamste problemen te zijn (bijvoorbeeld Gross Schönebeck: Regenspurg et al. 2013, Soultz: Mundhenk et al. 2013).

In circa vier kilometer diepe doubletten in carbonaat gesteente in Zuid-Duitsland is stimulatie niet nodig, door uitstekende doorlatendheid van het reservoirgesteente dankzij de aanwezigheid van karst en/of natuurlijke fractures.

De analogie van de reservoirs die in het buitenland zijn aangeboord (appendix 1) met potentiële klastische en carbonaat reservoir lithologie in Nederland, laten zien dat er lering kan worden getrokken uit eerdere doubletten in het buitenland. Echter een uitgebreide literatuurstudie naar ervaringen met deze systemen is op dit moment nog niet uitgevoerd omdat dit buiten het doel van het huidige onderzoek valt.

Veel kennis over induced seismicity is opgedaan tijdens verschillende geothermieboringen, waaronder Basel, Soultz en Gross Schönebeck. In de eerste twee projecten is voelbare induced seismicity opgetreden, maar niet in Gross Schönebeck. Analyses van correlatie tussen geïnduceerde seismiciteit en geologische/tektonische condities en stimulatie scenario's, laten zien dat beide een grote invloed (kunnen) hebben. Seismisch actieve gebieden hebben waarschijnlijk een grotere kans op induced seismicity bij stimulatie. Er bestaat een sterke correlatie tussen hoeveelheid geïnjecteerd volume in een breukzone en hoeveelheid seismiciteit, en seismiciteit treedt niet of nauwelijks niet op in het geval van klassieke hydrofracking met visceuze gels en proppants.

3 Play benadering voor ultradiepe geothermie

In de olie- en gasindustrie is niet alleen veel kennis opgedaan door het boren in de ondergrond, maar ook in het omgaan met de onzekerheden die eigen zijn aan de ondergrond. Eén van de manieren om onzekerheden in de ondergrond te verminderen is het definiëren van delen van de ondergrond die bepaalde relevante karakteristieken overeenkomsten hebben. Traditioneel is een play een combinatie van een olie- of gasmoedergesteente ('source'), een laag waarin de olie of gas accumuleert ('reservoir') en een gesteente of structuur waaronder de olie of het gas gevangen wordt ('seal'). Om de play succesvol te maken is het nodig dat de drie samenstellende elementen op het juiste moment in tijd bestaan. Zo moet het reservoir bestaan op het moment dat het moedergesteente olie of gas genereert, etc. In de definitie van de Society of Petroleum Engineers (SPE):

'Play: Recognized prospective trend of potential prospects, but which requires more data acquisition and/or evaluation to define specific leads or prospects.'

De 'data acquisition and/or evaluation' in een nog relatief onbekende play ('under-explored') moeten leiden tot het verminderen van de onzekerheid omtrent het reservoir (aanwezigheid, dikte, gesteente-eigenschappen, temperatuur, etc.). Omdat de eigenschappen overall in de play gelijk worden verondersteld, leidt onderzoek op een plek in de play tot vermindering van de onzekerheid elders in de play. Een boring of ander soort onderzoek, uitgevoerd op een bepaalde plaats in de play, vergroot ook de kennis van (het aangetroffen gesteente op) andere plaatsen in dezelfde play. Hetzelfde principe voor het omgaan met onzekerheden in de ondergrond kan ook toegepast worden voor geothermie. Het play-concept voor geothermie is aanzienlijk eenvoudiger dan voor olie of gas, aangezien er geen sprake is van een moedergesteente en/of afdekkende laag.

Definitie: Een geothermisch potentieel gebaseerd op geschikte temperatuur, vergelijkbare geologische omstandigheden en eigenschappen gegeven een bepaalde bovengrondse warmtevraag

In de olie- en gasindustrie is het doel van exploratie het vinden van een combinatie van source, reservoir en seal die op de juiste momenten in tijd actief zijn geweest. Voor geothermie is het essentieel in de ondergrond een combinatie te vinden van voldoende dikte en doorlatendheid van het gesteente, en een juiste temperatuur die aansluit bij een bovengrondse warmtevraag. Dit is mede noodzakelijk omdat, in tegenstelling tot koolwaterstoffen, het in de regel niet economisch is warmte over grote afstand te transporteren². De warmtevraag is daarom mede leidend in de zoektocht naar een geschikte, passende bron in de ondergrond. Een succesvolle UDG play is derhalve een geothermisch potentieel dat:

- past bij de bovengrondse warmtevraag

² In Frankrijk is een project bekend waarbij industriële warmte over een afstand van 15 kilometer wordt getransporteerd, maar dit is uitzonderlijk ver.

- gekarakteriseerd wordt door geschikte temperatuur en vergelijkbare geologische omstandigheden en eigenschappen.

Geologische omstandigheden verwijzen naar de juiste vorming en dikte van het gesteente en de processen die daarop zijn gevolgd, en die hebben geleid tot de staat en diepte waarin het gesteente zich nu bevindt. Voor de vorming van het gesteente is het afzettingsmilieu belangrijk (zee/marien, rivier/fluviatiel, wind/eolisch, etc.). Het afzettingsmilieu bepaalt het soort gesteente dat wordt gevormd (zand/siliciclastisch, kalk/carbonaten, etc.). De processen die het gesteente na de afzetting of vorming veranderen zijn tectonische processen als begraving, plooiing, verbreuking en opheffing, en ook mineralisatie en oplossing (onder meer karst).

De eigenschappen van het gesteente zijn die parameters die het gesteente karakteriseren en die van belang zijn voor de ontwikkeling van een ultra-diepe geothermisch project. Cruciaal zijn de doorlatendheid, de mineraalinhoud en de hardheid van het gesteente. Ook de staat en richting van de druk op het gesteente zijn zeer belangrijk, en de aanwezigheid van (natuurlijke) scheuren.

Dikte is weliswaar geen eigenschap van een gesteente maar van het reservoir, maar is eveneens belangrijk.

Door de – door schaarste van informatie en kennis gekenmerkte – zeer diepe ondergrond op systematische manier te benaderen in een zgn. ‘play approach’, kan het leereffect van iedere nieuwe locatie gemaximaliseerd worden en kunnen de risico's van een geïdentificeerde play strategisch teruggedrongen worden.

3.1 Verminderen van de onzekerheid

Risico's en onzekerheden kunnen teruggebracht worden nadat de play is gedefinieerd. Drie fasen worden onderscheiden voor de ontwikkeling van een geothermische play (Tabel 3.1)

- 1 verkennen van de play;
- 2 vergroten van de kennis van de eigenschappen van het reservoir;
- 3 vaststellen van mogelijke ontwikkelscenario's.

Deze stappen kunnen voor iedere play anders uitpakken en sterk in intensiteit verschillen. De fasen kunnen op verschillend detailniveau iteratief doorlopen worden. Bij een eerste iteratie worden fase 1 en 2 op hoofdlijnen doorlopen. Op basis van volledige(r) informatie kan in tweede instantie in meer detail ingegaan worden op de (lokale) reservoir eigenschappen. Tot slot worden de ontwikkelscenario's geoptimaliseerd.

Derisking Nederlandse Geothermische Plays			Status van de Play				
FASE	OBJECTIVE & ACTIVITEIT		RISICOREDUCTIE	NOORD	MIDDEN	ZUID	WNB/RVG
1 Verkennen van de UDG play	a	Opstellen Referentiemodel: Inventarisatie aanwezige kennis van de UDG Formaties ten einde een referentiemodel (state-of-the-art) op te stellen (diepte en dikte variaties en conceptontwikkeling voor de interne structuur). Keuze voor preferente plays	Het referentie ondergrondmodel verschaft een eerste orde inzicht in kansen voor UDG en is daarmee de eerste stap om tot een optimale locatiekeuze te komen en marktfalen af te vangen	Resterende doorlooptijd tot boring = 12 maanden	Resterende doorlooptijd tot boring = 17 maanden	Rest. DLT tot boring = 19 mnd	Rest. DLT tot boring = 21 mnd
	b	Wat mist: Identificeren basislacunes voor de geselecteerde UDG plays (Dinantien Carbonaten). Deze gaten in de data moeten strategisch ingevuld worden door bijv. nieuwe 2D seismiek of indien mogelijk reprocessing van de bestaande data ten einde de Terra Incognita in te vullen	Aanscherping van de regionale verbreiding van de plays, en identificatie/afwijzing van potentiële locaties voor de optimale leercurve				
	c	Verbeteren/updaten referentiemodel: Aanscherping van regionale structuur en opbouw van Dinantien carbonaten door gebruik te maken van nieuwe data (uit 2) en extra technieken (toegepast	Update van het referentiemodel vermindert onzekerheid in de inschatting van diepte, dikte en interne structuur				
2 Bepaling eigenschappen geothermiebron Niveau leercurve: PLAY & PROJECT (interface) Typische duur: 6 - 9 maanden	d	Temperatuur: Inzicht vergaren in temperatuurbeeld, -variaties en afwijkingen	Vergroot het inzicht in de spreiding van de doorlatendheid en temperatuur en de bijbehorende basisprincipes hiervan. Dit draagt bij aan de aanscherping van de slagingskans				
	e	Doorlatendheid: Vergroten van de kennis van de natuurlijke doorlatenheid op zowel grote als kleine schaal binnen de play					
	f	Stimulatie: Identificatie van de eigenschappen die bepalend zijn voor het ontwerp en succes van de stimulerings techniek	Inschatting en onzekerheid in het stimulatie-potentieel wordt verbeterd door uitgebreide analyse van gesteente-eigenschappen, verbreukingen en fracture networks. Het is cruciale kennis voor het ontwerp en de benodigde				
	g	Optimale locatieselectie: Bepalen van locatie met voldoende performance en leercurve-optimum (uitstralingspotentie voor de leercurve van de play) De aansluiting bij bovengrondse vraag geeft de doorslag bij gelijke ondergrondse potentie	Locatieselectie voor de optimale generieke leercurve. Het definiëren van een locatie met de beste leercurveuitstraling draagt direct bij aan het vergroten van de slagingskans van daarop volgende projecten. Daarnaast is een goede performance - ingeschat op basis van typische cost-engineering scenarios voor h, i - cruciaal voor een positieve businesscase				
Op het moment dat er een locatie met een grote leerpotentie voor de desbetreffende play is geïdentificeerd, moeten bovengenoemen stappen opnieuw doorgelopen worden om het model locatiespecifiek te maken. Zo is het van belang een lokaal geologisch model te maken op basis van 3D seismiek, en de reservoir-eigenschappen met een grotere zekerheid vast te stellen. Op basis van een adequate aanscherping kan de stap naar stap h gemaakt worden:							
3 Optimalisatie ontwikkelscenarios Niveau leercurve: PROJECT Typische duur: 4 maanden (exclusief aanbesteding)	h	Boorontwerp: Scenario-ontwikkeling voor snelle, voorspelbare boring en optimalisatie voor geothermische doeleinden, waarbij de randvoorwaarden veiligheid en de duurzaamheid een vereiste vormen	Een geoptimaliseerd boorprogramma, putontwerp en gekozen verbuizing draagt bij aan het verhogen van het geothermische vermogen en het verlagen van de kosten				
	i	Stimulatieontwerp: Scenario-ontwikkeling voor optimale stimulatie met minimalisatie neveneffecten, waarbij eveneens de veiligheid en de duurzaamheid vereiste randvoorwaarden vormen	Door de ondergrond te stimuleren kan het geothermische vermogen verhoogd worden				
Validatie van de play Niveau leercurve: PLAY & PROJECT Typische duur: 6 maanden	j	Boring: Testen en valideren van playconcept door middel van een boring en het bijwerken van het playconcept na de boring met een sterke nadruk op kennisboring	De opgedane kennis wordt gebruikt bij volgende putten.				

* Typische doorlooptijd is de typische netto doorlooptijd voor die gehele fase. De bruto doorlooptijd bevat ook de benodigde tijd voor aanbestedingen en vergunningsverleningen. Deze is afhankelijk van derden

Tabel 3.1 Fasen voor het risico-reductie van een geothermische play.

Fase 1:

De eerste fase is een verkenning van de play of het beoogde doelgesteente. Daarbij is het van belang om de kennis die op dit moment bestaat te inventariseren. Dit vormt het eerste conceptuele referentiemodel (a). Op basis van het referentiemodel kan er bepaald worden welke kennislacunes (b) er zijn. Denk daarbij aan het ontbreken van seismiek van voldoende kwaliteit of van een nabije boring die het reservoir heeft aangetoond. De ontbrekende kennis, voor zover van belang, moet strategisch aangevuld worden. Dat wil zeggen dat met een zo klein mogelijke inspanning een zo groot mogelijke stap gemaakt moet worden ter verbetering van het eerste conceptuele referentiemodel (c) tot een dusdanig niveau dat er een schatting van de eigenschappen van de geothermiebron gemaakt kan worden.

Fase 2:

De verdiepingsslag in de tweede fase van de play-ontwikkeling richt zich op de eigenschappen van het gesteente. Eigenschappen die de potentie van de bron karakteriseren, die van belang zijn voor een succesvolle ontwikkeling van een geothermieproject. Volgende de definitie van een UDG play is de temperatuur die past bij de warmtevraag leidend. Het is dus nodig inzicht in het temperatuurbeeld van de ondergrond te krijgen, en in de variaties en afwijkingen daarvan (d). Naast de temperatuur wordt het succes van een geothermisch project ook in grote mate bepaald door de doorlatendheid (e). Dit is naast de temperatuur de tweede eigenschap waar de play-ontwikkeling zich op richt. Indien deze doorlatendheid in eerste instantie ontoereikend lijkt voor het beoogde geothermische systeem, is het van belang die natuurlijke eigenschappen te identificeren die van belang zijn voor het ontwerp en succes van een stimulatietechniek (f). Op basis van het met bovenstaande verkregen inzichten verrijkte referentiemodel, kan een optimale locatieselectie (g) gemaakt worden die aansluit bij de gedefinieerde bovengrondse behoefte.

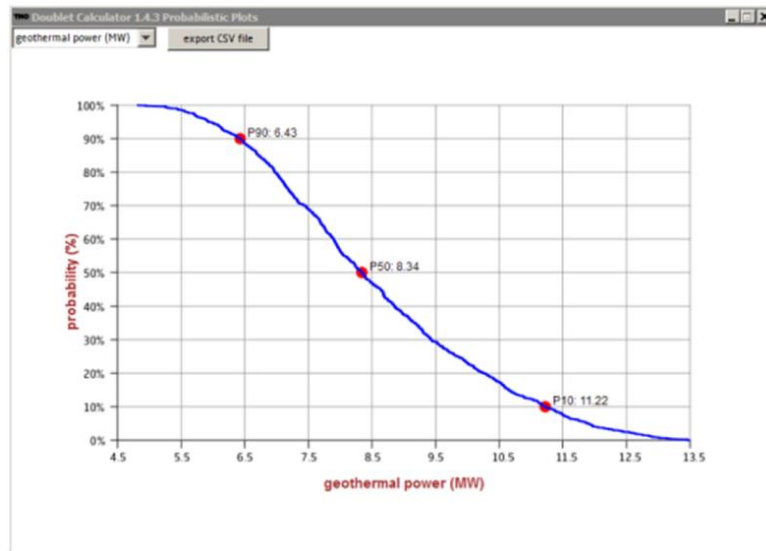
Op dit moment in het proces loont het om op basis van de gekozen locatie terug te gaan naar het referentiemodel (a) om een groter detailniveau aan te brengen. In deze fase kan bijvoorbeeld het schieten van nieuwe seismiek passender zijn, waarin in de eerste iteratie volstaan kon worden met het reprocessen van huidige seismiek. Op basis van een adequate aanscherping loont het om door te gaan naar de derde fase.

Fase 3:

In de derde fase staat de optimalisatie van de ontwikkelscenario's centraal. Deze bestaat uit een HPHT-boorontwerp (h) die zo efficiënt en veilig mogelijk een passend systeem aanlegt in de ondergrond die past bij de heersende drukken (HP = high pressure) en temperaturen (HT = high temperature). Daarnaast – indien van toepassing – kan er ook gekeken worden naar een stimulatieontwerp om de ondergrond geschikt te maken om het beoogde of benodigde debiet te behalen. Het ontwerp van de boring en de stimulatie gaan hand in hand, omdat deze specifieke eisen en belemmeringen aan elkaar opdragen.

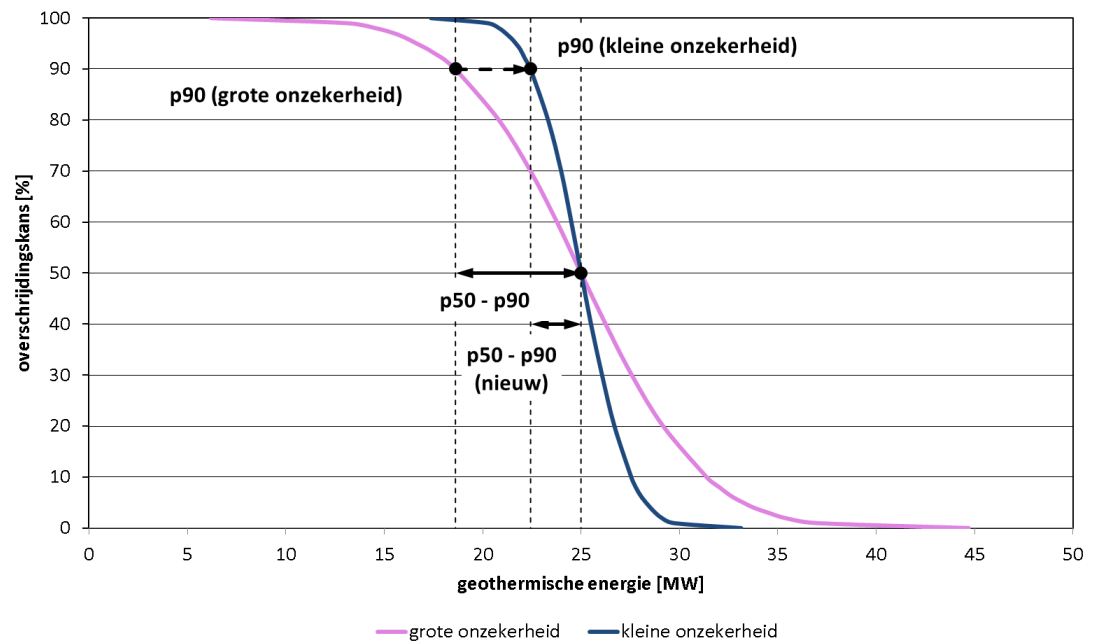
Het doel van deze play approach is het systematisch reduceren van de risico's en onzekerheden van de ultra-diepe ondergrond. Deze risico reductie kan ook uitgedrukt worden als optimalisatie van de vermogensverwachtingscurve voor een ultra-diep geothermieproject. Deze curve wordt gekenmerkt door de P90, P50 en P10 waardes.

Definitie: de P90 is de waarde die met 90% zekerheid overschreden zal worden



Figuur 3.1 Voorbeeld van een vermogensverwachtingscurve voor een conventioneel geothermisch project (Mijnlieff et al. 2014). De kans dat in dit geval van conventionele geothermie een vermogen groter dan 6.43 MW wordt gehaald is 90%. De kans dat een vermogen groter dan 11.22 MW wordt gehaald is 10%.

Voor een geothermisch systeem gerealiseerd is, bestaat er onzekerheid over het te behalen geothermische vermogen. De onzekerheid wordt uitgedrukt in de P10-, P50- en P90-waarden (Figuur 3.1, Figuur 3.2). De P90-waarde van het vermogen is het vermogen dat in de realisatiefase met 90% zekerheid overschreden zal worden. Op het moment dat er zeer weinig bekend is, is de onzekerheid groot en is het verschil tussen P10 en P90 dus groot. Dit wil zeggen dat de kans dat een zeer laag vermogen tenminste overschreden zal worden, zeer groot is, en die op een zeer groot vermogen zeer klein. Het verminderen van het risico door ontwikkeling van de play betekent dat verschil tussen de P10- en P90-waarden kleiner wordt. Hoe kleiner het verschil tussen het slechte/pessimistische en het beste/optimistische scenario is, hoe kleiner ook het risico. Figuur 3.2 laat zien dat reductie van de onzekerheid de P90-waarde op laat schuiven naar een hogere waarde. Het verschil tussen P90 en P50 (het risico) wordt kleiner.



Figuur 3.2 Verwachtingscurve voor geothermisch vermogen voor en na onzekerheidsreductie voor een hypothetisch doublet.

N.B.: De P-waarde van een project (de vermogensverwachting) is iets anders dan de verwachte slagingskans van een project. De slagingskans wordt in sommige gevallen aangeduid met de afkorting 'POS' (probability of success). Dit is een indicatie van de algehele slagingskans als som van alle afhankelijkheden voor slagen. Soms wordt onderscheid gemaakt in de technische POS en de economische POS. De technische POS is de kans dat het reservoir watervoerend wordt aangetroffen, ongeacht de economische winbaarheid. De economische POS is de kans dat het aangetroffen water economisch winbaar is.

4 UDG Plays in Nederland

In dit hoofdstuk worden de UDG plays geïdentificeerd.

4.1 Plays in de Nederlandse ondergrond

In hoofdstuk 2 is een UDG play gedefinieerd als geothermisch potentieel gebaseerd op vergelijkbare geologische omstandigheden en eigenschappen gegeven een bepaalde warmtevraag. Het gaat er dus om geschikt gesteente van de juiste temperatuur te vinden. Geschikt is in dit geval doorlatend (permeabel).

4.1.1 Hiërarchie

De gesteenten in de Nederlandse ondergrond worden hiërarchisch opgedeeld. Namen van gesteenten en tijdvakken worden vaak door elkaar gebruikt. Zo worden de platformkalken die tijdens het Dinantien tijdvak zijn afgezet ook onder meer aangeduid als Carboonkalken, Zeeland Formatie of Kolenkalk. Daarom wordt in deze paragraaf een overzicht gegeven van de meest relevante eenheden en hun namen.

Het hoogste niveau is de (super/sub)Groep. Een (super/sub)Groep bestaat uit een of meer Formaties. Een Formatie bestaat uit een of meer Members. Een Member bestaat uit een min of meer homogene stapeling van gesteente. Groepen zijn vaak vernoemd naar geologische tijdvakken (ouderdom), bijvoorbeeld de Carboon Supergroep. Het Carboon is het tijdvak dat van 359 tot 299 miljoen jaar geleden duurde. Tabel 4.1 bevat een opsomming van mogelijk relevante Groepen en Formaties, en het voornaamste gesteente. Verder in dit hoofdstuk (paragraaf 4.1.5) wordt besproken wat de relevantie van deze eenheden is, en waarom andere eenheden dan deze als irrelevant worden beschouwd. Figuur 4.11 laat zien hoe deze eenheden ten opzichte van elkaar voorkomen in de Nederlandse ondergrond. De potentie voor geothermie van gesteenten uit Perm en Trias is beschreven in ThermoGIS / ThermoGIS Expert (www.thermogis.nl). Gesteenten uit deze eenheden zijn al door diverse Nederlandse geothermieboringen aangeboord. Deze eenheden worden daarom in de komende paragrafen alleen summier behandeld.

groep	tijdvak	formatie(s)	gesteente
Trias Supergroep	Trias	Hardegens Formatie Detfurth Formatie Volprieausen Formatie Onder Buntsandstein,	zand
Perm Rotliegend Supergroep	Perm	Slochteren Formatie	zand
Carboon Supergroep	Carboon	Zeeland Formatie	kalk
Devoon Supergroep	Devoon	Bosscheveld Formatie	zand?

Tabel 4.1 Overzicht van de voor ultradiepe geothermie belangrijkste geologische eenheden.

systeem	serie	stage
Perm		
Carboon	Silesien	Stephanien
		Westphalien
		Namurien
	Dinantien	Visean
		Tournaisien
Devoon		

Tabel 4.2 Onderverdeling van het Carboon.

4.1.2 Gesteenten

De belangrijkste soorten gesteente (*lithologie*) in de Nederlandse ondergrond tussen ongeveer 4 en 8 km diepte zijn kleisteen (= schalie), zandsteen en kalksteen. Zeer lokaal zijn er ook intrusieven (magmatisch gesteente) te vinden. Deze laatste zijn alleen al vanwege hun beperkte voorkomen niet relevant voor UDG. Ook steenkool is niet overwogen vanwege de ongeschikte eigenschappen voor geothermie.

Gesteenten kunnen verschillende soorten porositeit of permeabiliteit hebben:

- Bij afzetting blijft er tussen de korrels van het gesteente ruimte vrij. Dit heet de poriënruimte. Deze ruimte blijft in sommige gevallen leeg, maar wordt in andere gevallen op een later moment gevuld met kleinere korrels of gecementeerd met bijvoorbeeld kalk. De verzamelde korrels die het gesteente vormen worden de 'matrix' genoemd. Deze kan – al dan niet gestimuleerd – de basis zijn voor de doorlatendheid.
- Een netwerk van zeer kleine scheuren of breukjes kan ontstaan wanneer het gesteente onder druk komt of wordt vervormd. Een dergelijk netwerk kan de doorlatendheid van het gesteente vergroten. Dit soort gesteentes wordt 'natural fractured reservoir' genoemd.
- Grotere breuksystemen ontstaan bij intensere deformatie (bijv. tektoniek). Grote breuken komen op veel plaatsen in Nederland voor. Deze zijn veroorzaakt door hetzelfde soort processen dat gebergten als de Pyreneeën en de Alpen hebben gevormd. De directe omgeving van deze grote breuken is mogelijk doorlatend.
- Karst is een proces waarbij kalksteen oplost in water en daarmee voor doorlatendheid zorgt. Dit kan regenwater zijn (meteorisch water, bij kalksteen dat aan het oppervlakte ligt), of geothermisch water. De Grotten van Han zijn een voorbeeld van (grote) karst. Karst komt op diverse schaalgroottes voor.

4.1.3 Afzettingen per tijdvak

De Trias en het Rotliegend zijn in Nederland bewezen geothermische plays. Meerdere doubletten zijn succesvol in deze reservoirs geboord. Dit geldt overigens in nog meerdere mate voor de ondiepere gesteenten van Jura- en Krijt-ouderdom die in het Westland zijn aangeboord. Vijf geothermieboringen zijn in noord-Limburg in gesteenten van Carboon-ouderdom geboord (Zeeland Formatie - onder Carboon - Dinantien). Deze hebben het reservoir allemaal op 'conventionele' diepte aangetroffen (tot maximaal ongeveer 3000 meter diepte). Het Devoon is Nederland nog zeer zelden aangeboord (zie table 4.3). Het tweede doublet in Californië (Limburg, NL) produceert wel (deels) uit gesteenten van Devoon-ouderdom.

4.1.3.1 Devoon

Gesteenten van Devoon-ouderdom en ouder zijn in Nederland in het verleden aangeboord in 12 boringen, waarvan een aantal offshore (Tabel 4.3 & Figuur 4.2). Er is daarom weinig van bekend. Met name van ontsluitingen in België, waar gesteenten van deze ouderdom aan de oppervlakte liggen, is bekend dat er zandstenen in voorkomen. Deze kunnen zowel impermeabel zijn (kwartsiet) als mogelijk permeabel (onrijpe zandsteen met verweerde veldspaat). Van Hulten (2012) stelt mede op basis van seismische data van het Groningen-platform dat de carbonaatplatforms van Dinantien-ouderdom mogelijk zijn gevormd op oudere platforms van Devoon-ouderdom. Dit is in Nederland nog niet aan de hand van boorinformatie bevestigd. Devonische gesteenten zijn in Nederland ook aangeboord in de doubletten van Californië. Het is niet goed bekend wat de gesteente-eigenschappen van de Devonische gesteenten in Nederland op grote diepte zijn. Evenmin is bekend of het Devoon in Nederland overal aanwezig is, en in hoeverre de gesteenten uit zandsteen, kleisteen of kalksteen bestaan.

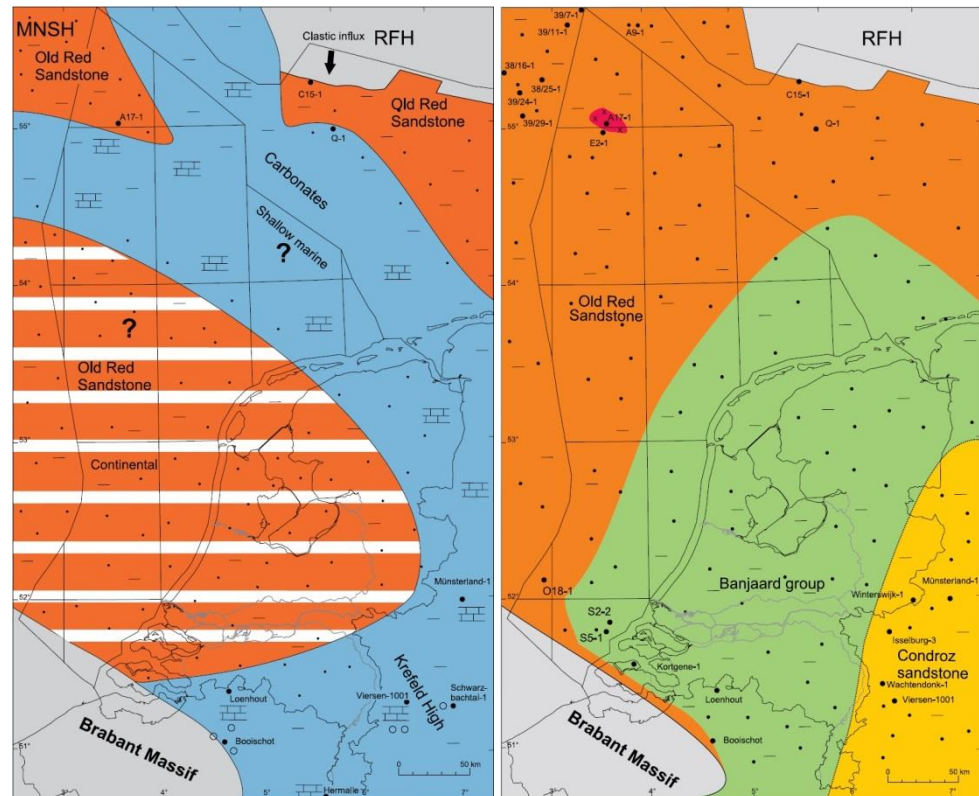
	BHG-01	KSL-02	KTG-01	LTG-01	UHM-02	WSK-01	A17-01	E02-01	E06-01	O18-01	S02-02	S05-01
Banjaard Group			334	38	88	364				37		
Bosscheveld Fm	28	119				49						9
Bollen Claystone Fm	226		305			135					42	224
Old Red Group			206							99		
Tayport Fm								203	445			
Buchan Fm							73					
Buchan Rhyolite Mbr							139					
Buchan Fm							421					
Patch Fm							296					
Formatie @TD	Bollen	Bosch.	Siluur	Banj.	Banj.	Banj.	Plut.	Tayport	Tayport	Siluur	Bollen	Bollen
Diepte top Devoon [mAH]	2647	382	1043	5124	5344	4461	2084	2392	2755	2915	2836	1997

Tabel 4.3 Minimale dikte in meters van het Devoon in boringen in Nederland. Met uitzondering van KTG-01 en O18-01 is de basis van het Devoon nergens geheel doorboord. De vet gedrukte boringen zijn het meest relevant voor de Nederlandse onshore. De boringen van de Californië-doubletten in Grubbenvorst hebben mogelijk het Devoon bereikt, maar de stratigrafie ervan is nog niet openbaar.

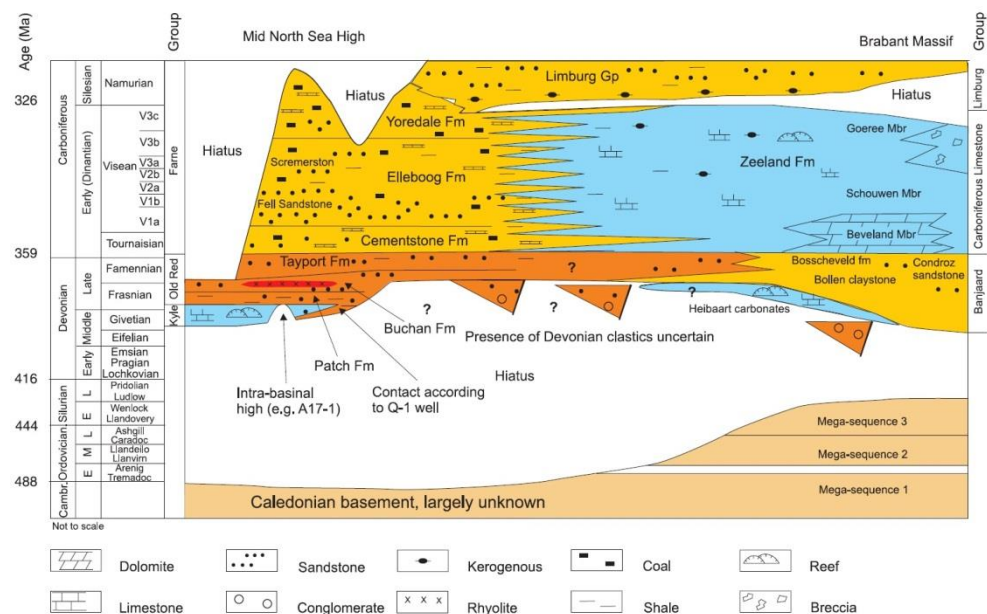
De Banjaard Group omvat de Bosscheveld en Bollen Claystone Formaties (Figuur 4.2). Beide zijn van mariene oorsprong. De eerste bestaat uit mudstones, fijnkorrelige zandsteen en kalksteen, en de tweede uit een monotone reeks mudstones. De doorboorde dikte van de Banjaard Group varieert van 40 tot meer dan 600 meter. In de equivalente buitenlandse boringen Booischot (B) en Wachtendonk 1 (D) zijn massieve zandstenen beschreven.

De continentale gesteenten van de Old Red Group komen vooral voor in de offshore (A-, E- en O-blokken), hoewel ook 206 meter in de boring Kortgene (KTG-01) is beschreven (Figuur 4.1).

De beperkte kennis over de gesteenten uit het Devoon in Nederland, in combinatie met de wetenschap dat de op land gevonden afzettingen van mariene oorsprong voornamelijk mudstones betreffen, maken dat het risico van deze play zeer groot is.



Figuur 4.1 Paleo-geografische interpretaties van het Midden tot Vroeg-Laet Devoon (links) en Laet Devoon (rechts). De continentale afzettingen van de Old Red Sandstone in de Nederlandse onshore zijn waarschijnlijk zeer dun of afwezig. De Condros Zandsteen is mogelijk aangetroffen in de geothermische boringen in Californië. Lithologische symbolen als in Figuur 4.2. Bron: Wong et al. 2007.

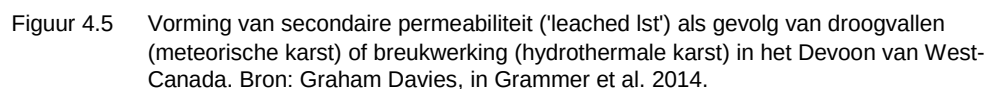
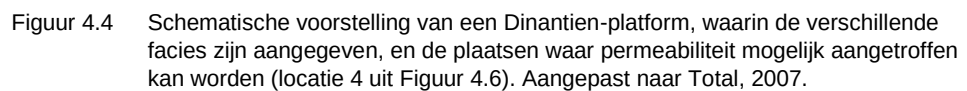
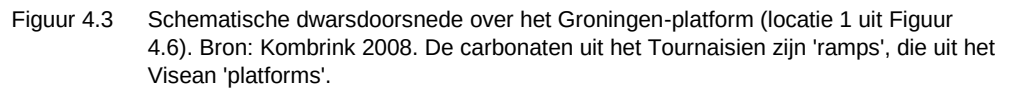


Figuur 4.2 Schematische stratigrafie van het pre-Silesien (Dinantien en ouder) op basis van boringen op het Mid North Sea High and het Brabant Massif (zie Figuur 4.1). De interpretatie tussen beide in is zeer speculatief. Kleurcodes: rood/oranje: continentaal, geel: marien, groen: grotendeels marien blauw: carbonaat. Bron: Wong et al. 2007.

4.1.3.2 Carboon

Het Carboon is in Nederland goed bekend uit boringen in Limburg voor de steenkoolwinning. Ook in Zeeland en in de nabije offshore is een aantal boringen dat het gehele of tenminste een groot deel van het Carboon heeft doorboord, evenals in Flevoland (Luttelgeest) en Groningen (Uithuizermeeden) en in België en Duitsland. Verder is het zo dat zeer veel boringen in Nederland die het Rotliegend hebben doorboord daarna nog een paar meter van het meest ondiepe deel van het Carboon hebben aangetoond. Het Carboon is echter in het grootste deel van Nederland zeer dik. Het onderste deel van het Carboon (Dinantien) in Nederland wordt gevormd door de Zeeland Formatie, ook wel bekend als de Kolenkalk. Gesteenten uit het Dinantien komen waarschijnlijk in heel Nederland in de ondergrond voor. Een deel van de gesteenten van de Zeeland Formatie is gevormd op carbonaatplatforms, te vergelijken met moderne equivalenten als de Bahama's of het Great Barrier Reef. Figuur 4.3 toont een schematische weergave van het Groningen platform (Kombrink 2008). Dit platform-carbonaatgesteente is het reservoir in de doubletten van Californië en Mol (B), en de gasopslag in Loenhout (B). Of deze play, die dus in het ondiepe bereik in Zuid-Nederland en België bewezen is, ook in de rest van Nederland werkt, is nog onbekend. Tussen deze platforms in ('intra-platform' (Wong et al. 2007) of 'through/basin' (Figuur 4.3)) werd waarschijnlijk een mengsel van klei en kalk afgezet ('kalkmudstone'). Deze facies is in Nederland waarschijnlijk niet aangeboord. Op paleo-geografische reconstructies (Wong et al. 2007) wordt de boring Winterswijk-01 weliswaar in het 'intra-platform basin' getekend. De 'starved basin Kulm' facies ten oosten van Winterswijk is ingetekend. De lithostratigrafische interpretatie van Winterswijk-01 beschrijft het Dinantien echter ook als 'Kulm'. Uit Duitsland zijn voorbeelden bekend, o.m. de boring Münsterland-01, waar de dikte van het Dinantien ongeveer 200 meter is, vergelijkbaar met Winterswijk-01. De Kulm facies wordt in principe minder geschikt geacht voor geothermie vanwege het grotere kleigehalte: kleiige en siltige, meestal pyrietrijke gesteenten domineren over de carbonaten. Het is echter niet uit te sluiten dat ook in dit gesteente karst is opgetreden als gevolg van breukwerking.

Verschillende auteurs, zoals Kombrink (2008) stellen dat ook in de bekkens carbonaten zijn gevormd in het vroeg Dinantien (Tournaisien carbonaten, zie Tabel 4.2 en Figuur 4.3). Het gaat hierbij niet om platformen maar 'ramps'. In Noord-Nederland zijn wel de platformen van het Dinantien aangeboord, maar niet de ramps. De platformcarbonaten dateren uit het laat Dinantien (Visean). Een publicatie van Total (2007), gebaseerd op voorkomens van de carbonaten in de Zuidelijke Noordzee, België en Zuid-Nederland, laat een soortgelijk diagram zien als Kombrink maar met meer detail (Figuur 4.4). Het is niet zeker of de karstfenomenen die hier zijn waargenomen ook in de rest van Nederland bestaan. Behalve karst door het droogvallen van het platform (meteorische karst, ook wel 'platform abandonment karst') kan kalk ook oplossen door geothermische vloeistoffen die langs breuken bewegen (hydrothermale karst) (Figuur 4.4, Figuur 4.5).

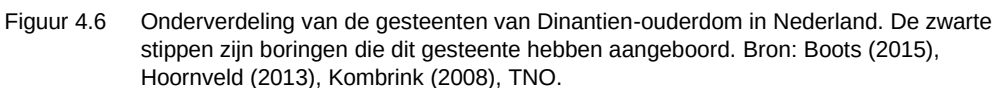


Op de gesteenten van de Zeeland Formatie liggen afzettingen uit het Boven Carboon. De Geul Subgroep, ook wel bekend als Namuur, bestaat uit een dikke sequentie kleisteen. De gesteenten van de hierop liggende Caumer, Dinkel en Hunze Subgroepen bevatten vooral kleisteen en steenkool. Er zijn weliswaar voorbeelden van gasvelden die produceren uit zandsteen uit de Hospital Ground en Step Graben Formaties, die in deze Groepen thuishoren, maar deze zandstenen

zijn niet erg dik en hebben lateraal een geringe verbreiding, wat ze voor grootschalige geothermie waarschijnlijk ongeschikt maakt.

Figuur 4.6 toont de verbreiding van de kalkstenen uit het Dinantien. De zwarte stippen zijn boringen die het Dinantien hebben aangeboord. In het noorden zijn platformkalken zichtbaar op 3D seismiek (locaties 1, 2). Op locatie 1 zijn deze ook aangetoond door een boring. Hetzelfde geldt voor de Noordoostpolder (3) en Zuid-Nederland (4), op 2D seismiek. In gebied 5 is op seismiek een structuur zichtbaar die mogelijk een platform is. In de gebieden 6 en 7 zijn mogelijk ook platformkalken gevormd. Voor de rest van Nederland (8) is het onduidelijk waaruit de gesteenten van Dinantien-ouderdom bestaan, en of deze geschikt zijn om als geothermie-reservoir te dienen. De begrenzing van de platformen is onzeker³. Dit is afhankelijk van de kwaliteit van de gegevens (m.n. seismiek). De mate van onzekerheid verschilt van plaats tot plaats.

³ In het zuiden zijn (relatief oude) platformen van Tournaisian-ouderdom meegenomen in de omgrenzing. In het noorden zijn alleen de platformen van Viséan-ouderdom, zoals zichtbaar op de seismiek, meegenomen.



Veel gasvelden in Noord-Nederland, waaronder het Groningen gasveld, hebben gesteenten van Rotliegend-ouderdom als reservoir. Dit zijn zandstenen met in het algemeen goede porositeit en permeabiliteit. Wel moet opgemerkt worden dat de diepte van de meeste gasvelden maximaal ongeveer drie kilometer is, wat voor ultradiepe geothermie minder relevant is. De eigenschappen van gesteenten van Rotliegend-ouderdom op grote diepte verschillen van die op geringe diepte (i.h.a. zijn zowel porositeit als permeabiliteit ongunstiger). De potentie van het Rotliegend voor geothermie is beschreven in ThermoGIS.

Veel gasvelden in West-Nederland hebben gesteenten van Trias-ouderdom als reservoir. Dit zijn zandstenen met in het algemeen goede porositeit en permeabiliteit. Wel moet opgemerkt worden dat de diepte van de meeste gasvelden maximaal ongeveer drie kilometer is, wat voor ultradiepe geothermie minder

relevant is. De eigenschappen van gesteenten van Trias-ouderdom op grote diepte verschillen van die op geringe diepte (i.h.a. zijn zowel porositeit als permeabiliteit ongunstiger). De voor 2017 geplande geothermieboring in het Westland heeft dit reservoir als secundair doel. De potentie van de Trias voor geothermie is beschreven in ThermoGIS.

4.1.4 Overzicht plays

De combinatie van type gesteente en type doorlatendheid kan gekoppeld worden aan de verschillende geologische tijdvakken waarvan de gesteenten in de Nederlandse ondergrond voorkomen. De combinatie van type gesteente, verwachte doorlatendheid en ouderdom / diepte / temperatuur bepaalt de potentie van de play (Tabel 4.1).

	Breuksystemen <i>Natuurlijk (gestimuleerd)</i>		Karst <i>Natuurlijk (gestimuleerd)</i>		Natural fractured reservoirs <i>Natuurlijk (gestimuleerd)</i>		Matrix <i>Gestimuleerd</i>	
Kalk	Dinantien	Devoon	Dinantien	Devoon	Dinantien	Devoon	Dinantien	Devoon
Zand	Trias	Rotliegend	Komt niet voor		Trias	Rotliegend	Trias	Rotliegend
	Carboon	Devoon			Carboon	Devoon	Carboon	Devoon
Klei	Carboon	Dinantien			Carboon	Dinantien	Carboon	Dinantien
	Devoon				Devoon		Devoon	

Figuur 4.7 Overzicht van de verschillende UDG plays in Nederland naar type gesteente, type doorlatendheid en voorkomende geologische formaties.

4.1.5 Voorkomende formaties op grote diepte

Uit het 3D temperatuurmodel van Bonté et al. (2013) is de diepte afgeleid waarop de temperatuur ongeveer 120, 140 en 160°C is. Deze temperaturen zijn gekozen omdat het mogelijke temperatuur-ondergrenzen zijn voor ultradiepe geothermie. Door dit te snijden met het Digitaal Geologisch Model (TNO 2013, zie www.dinoloket.nl) wordt duidelijk welke gesteenten (formaties) zich op deze diepte bevinden. Dit zijn de gesteenten die de relevante plays bepalen. Onderstaande figuren tonen de subcropkaarten⁴ voor 120, 140 en 160°C. Gesteenten van formaties die op deze dieptes niet meer voorkomen zijn dus ongeschikt voor ultradiepe geothermie.

De 120°C subcrop is minder relevant voor UDG vanwege de relatief lage temperatuur. Deze wordt getoond omdat het een temperatuurbereik aangeeft dat in Nederland voor geothermische doeleinden tot nog toe niet aangeboord is. De hoogst gehaalde temperatuur in een operationeel Nederlands doublet is momenteel ongeveer 100°C. Het beeld op deze temperatuur / diepte kaart is gevarieerd. Veel verschillende formaties komen voor. Van oud naar jong zijn dit:

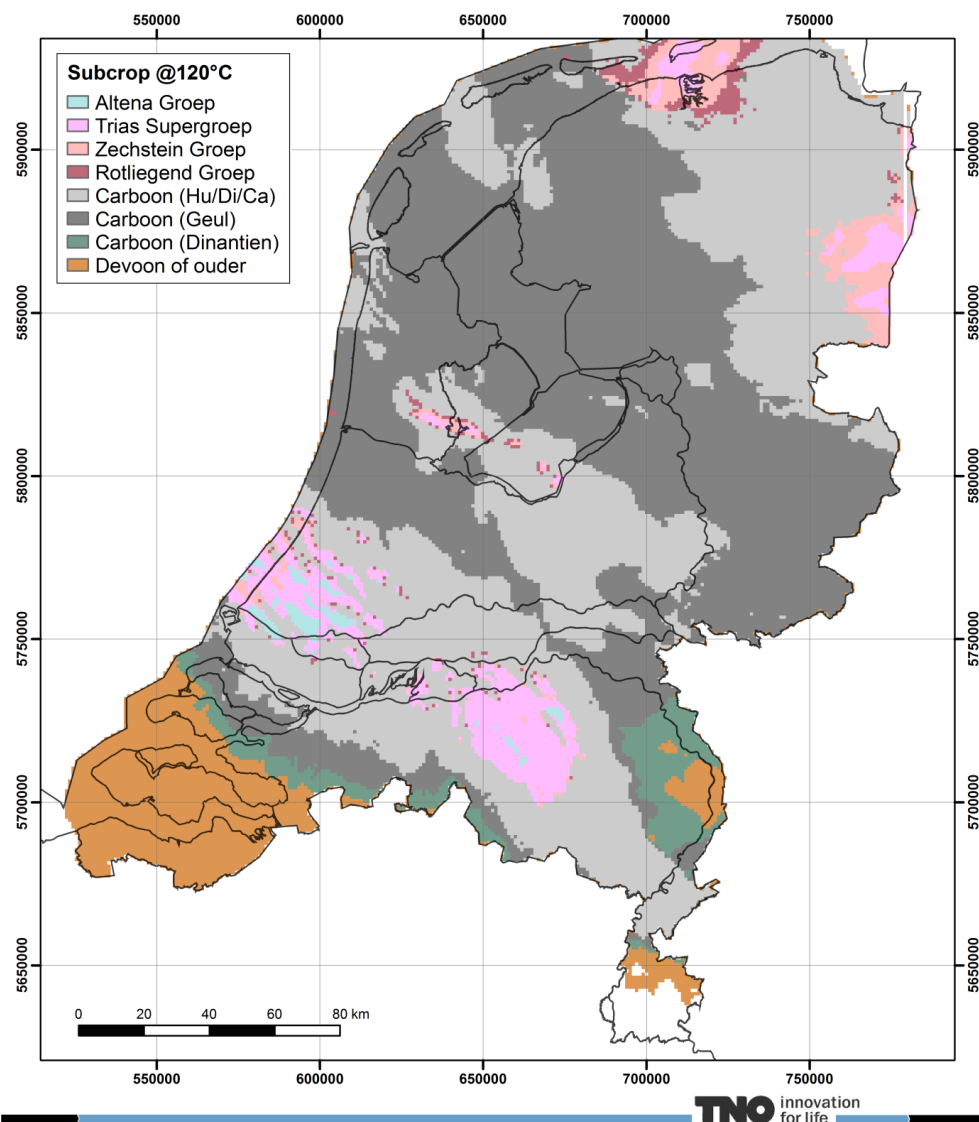
- Het Devoon komt in Zeeland en delen van Limburg waarschijnlijk voor.

⁴ Een subcropkaart laat zien welke gesteenten op de diepte van een bepaald vlak worden aangetroffen. De subcrop 120°C laat bijvoorbeeld zien welke formaties voorkomen op de diepte waarop deze temperatuur heerst.

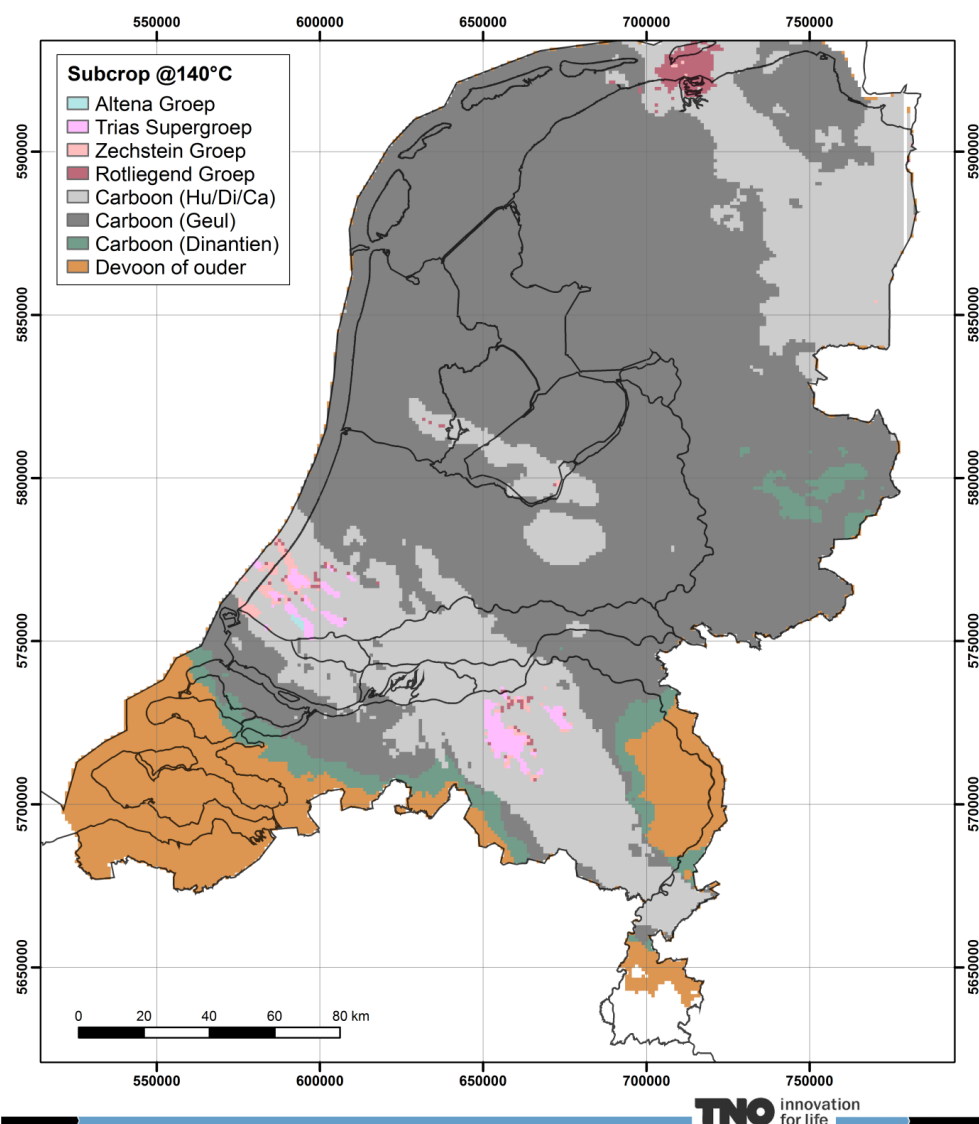
- In het grootste deel van Nederland wordt 120°C bereikt in gesteenten van Carboon ouderdom. De Zeeland Formatie (Dinantien) komt voor in een smalle strook in het noorden van Zeeland, het zuidwesten van Noord-Brabant, oostelijk Noord-Brabant en het noorden van Limburg.
- In het West Nederland Bekken en de Roerdalslenk liggen op deze diepte ook gesteenten van Trias ouderdom, en in mindere mate van de Altena Groep. Figuur 4.11 en Figuur 4.12 laten echter zien dat de combinatie van grote laterale verbreiding en diepe ligging beperkt is.
- In Oost Drenthe en rond de Lauwerszee Trog liggen gesteenten van Trias, Zechstein en Rotliegend ouderdom.

De 140°C subcrop toont een licht afwijkend beeld. In vergelijking met de 120°C subcrop is de ongeschikt veronderstelde Geul Subgroep (Namuur) nog dominanter aanwezig, evenals de Hunze/Dinkel/Caumer Subgroepen. De verbreidingen van de Zeeland Formatie (Dinantien) en het Devoon zijn ongeveer vergelijkbaar met die van de 120°C subcrop. De verbreiding van formaties van Trias en Rotliegend ouderdom is zeer beperkt tot kleine voorkomens in het West Nederland Bekken (waar de Trias het doel is van de Trias Westland boring), de Roerdalslenk (Trias) en de Lauwerszee Trog (Rotliegend). In het West Nederland Bekken is de dikte van het Rotliegend zeer beperkt (< 25m).

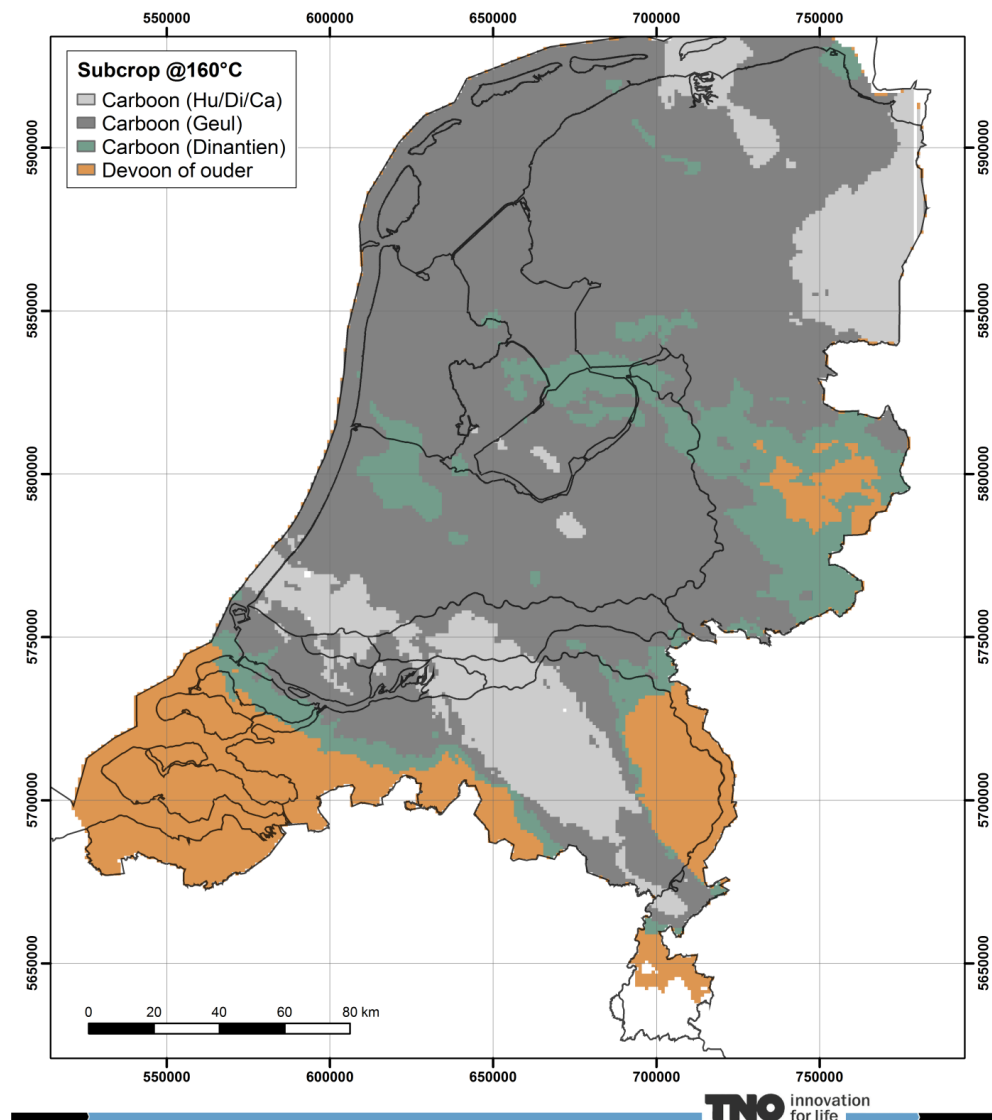
De 160°C subcrop laat zien dat dergelijke hoge temperaturen in Nederland alleen behaald worden in gesteenten van Carboon ouderdom of ouder.



Figuur 4.8 Verwachte formaties op de diepte van de 120°C isotherm.

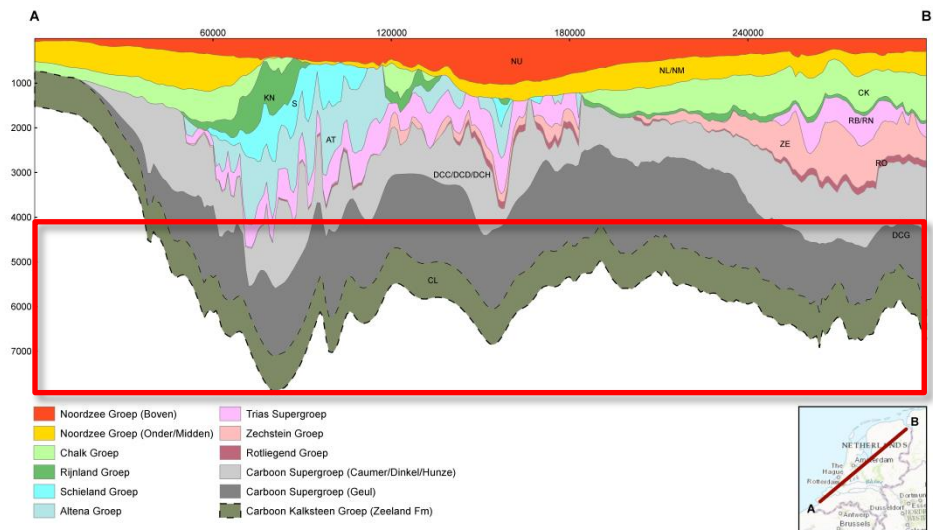


Figuur 4.9 Verwachte formaties op de diepte van de 140°C isotherm.

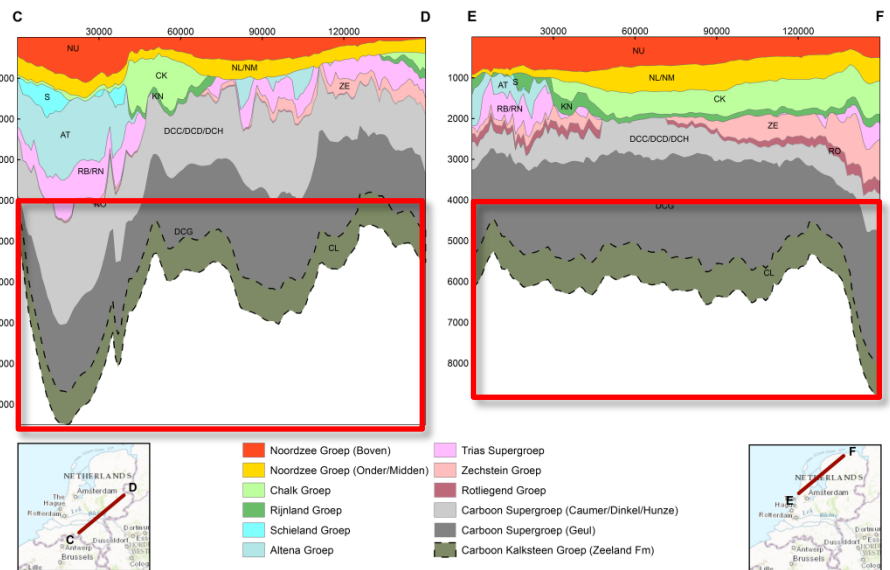


Figuur 4.10 Verwachte formaties op de diepte van de 160°C isotherm.

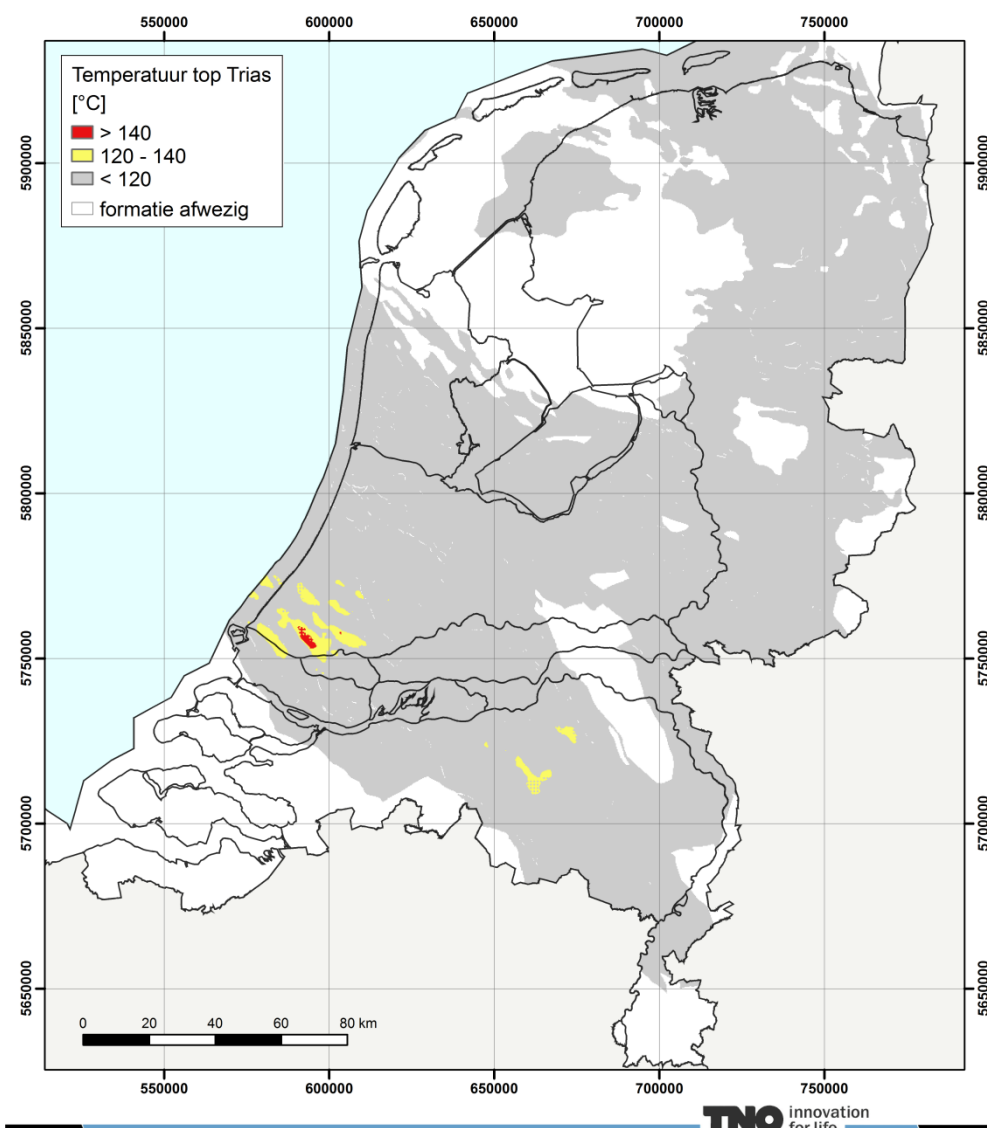
Figuur 4.11 toont een verticale doorsnede door de Nederlandse ondergrond van Middelburg naar Delfzijl. Op basis van een minimale vereiste temperatuur van 120°C is het duidelijk dat de meeste formaties niet in aanmerking komen voor diepe geothermie. In het Westland komt op sommige plaatsen Trias en Rotliegend voor tussen vier en vijf kilometer diepte, maar over het grootste deel van het profiel horen de aangetroffen gesteenten tot het Carboon en Devoon (niet in het profiel aangegeven; het Devoon ligt direct onder het Dinantien). De doorsneden van Figuur 4.12 laten eenzelfde beeld zien.



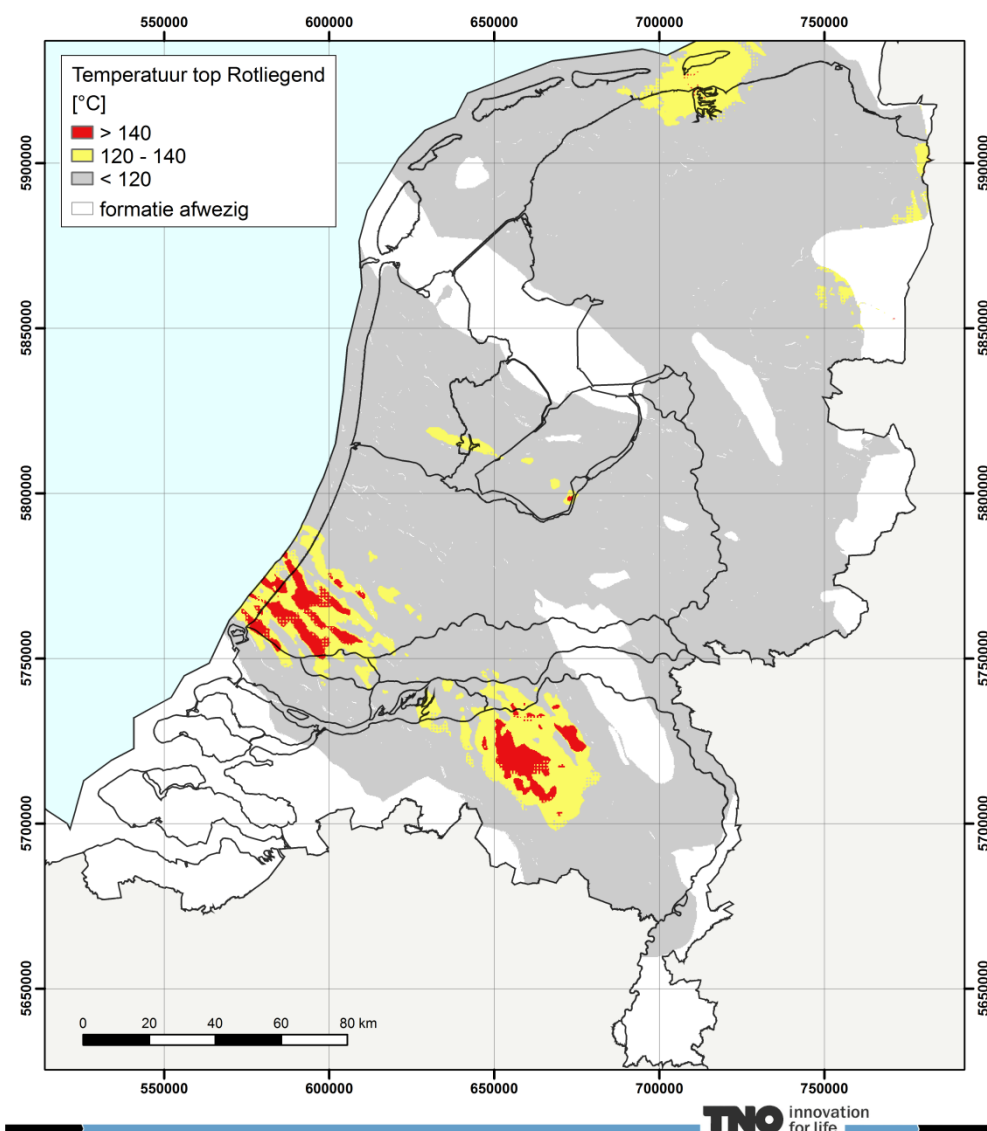
Figuur 4.11 Verticale doorsnede door de Nederlandse ondergrond. Het rode kader geeft bij benadering het temperatuurbereik vanaf 120°C aan. De dikte van het Dinantien is onzeker en daarom met een stippellijn aangegeven.



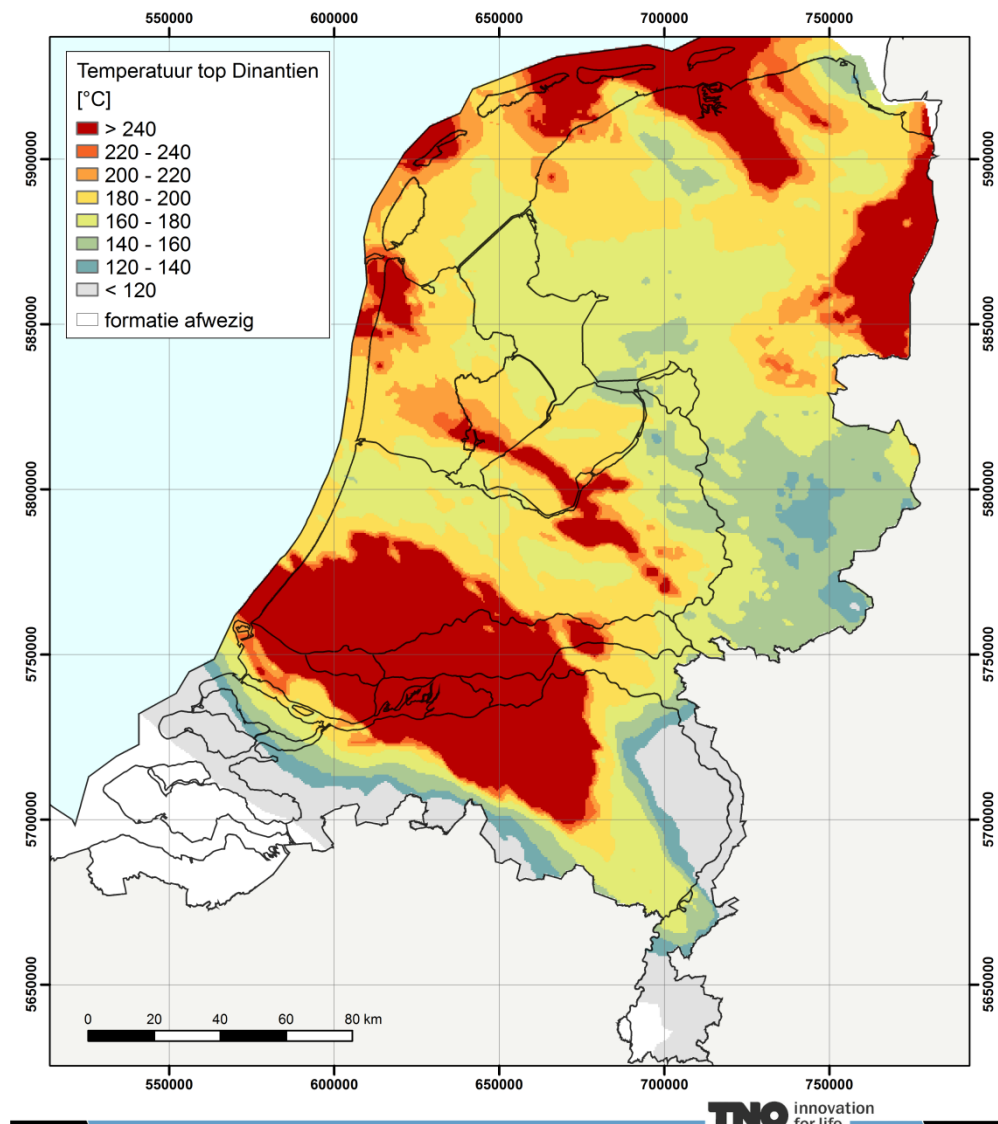
Figuur 4.12 De verticale doorsnedes Tilburg – Hengelo (C-D) en Haarlem – Dokkum (E-F) bevestigen het beeld van Figuur 4.11 voor wat betreft de verwachte formaties op grote diepte.



Figuur 4.13 Temperatuur op de diepte van de top van het Trias. Gesteenten van deze ouderdom bereiken een temperatuur van > 120°C in West Nederland. In het grootste deel van Nederland is de Trias koeler dan 120°C.



Figuur 4.14 Temperatuur op de diepte van de top van het Rotliegend. Gesteenten van deze ouderdom bereiken een temperatuur van meer dan 120°C vooral in West Nederland en in het gebied tussen Eindhoven en Den Bosch. De dikte van het Rotliegend is hier echter zeer beperkt.



Figuur 4.15 Temperatuur op de diepte van de top van het Dinantien. Vanwege de diepe ligging bereiken gesteenten van deze ouderdom een temperatuur van meer dan 120°C in een groot deel van Nederland. Een temperatuur van meer dan 240°C wordt problematisch verondersteld voor standaard boorapparatuur.

4.2 Parametrisering plays

N.B. de Rotliegend en Trias plays worden hier niet behandeld vanwege de redenen genoemd in de paragrafen 4.1.3.3 en 4.1.3.4. Van deze plays is bovendien al veel bekend met betrekking tot de relevante reservoir-eigenschappen.

Van de gesteenten van Devoon- en Carboon-ouderdom op grote diepte zijn op dit moment weinig metingen bekend. Daarom is een schatting van de gesteente-eigenschappen zeer onzeker. Een literatuurstudie naar relevante boringen elders (Duitsland, België, eventueel Engeland) kan dit soort gegevens mogelijk boven water halen. In deze studie is hier echter nog geen aandacht aan besteed.

4.2.1 Devoon

Het aantreffen van zandsteen of kalksteen behorend tot de Bosscheveld Formatie wordt beschouwd als essentieel voor een succesvolle Devoon-play. Op dit moment is nog zeer slecht bekend wat de ruimtelijke verdeling is van deze lithologieën in relatie tot kleisteen. De minimale dikte (Tabel 4.4) is daarom 0.

De waarden van de dikte zijn bepaald aan de hand van de in putten gemeten diktes van de Bosscheveld Formatie. Dit is mogelijk een overschatting, aangezien deze Formatie op grond van de momenteel beschikbare informatie nooit in zijn geheel uit zandsteen bestaat. De permeabiliteit is zeer onzeker, dit zijn slechts schattingen op basis van algemene kennis van gecompacteerd en/of verbreukte zandsteen.

	minimaal	verwacht	maximaal
dikte [m]	0	50	120
permeabiliteit [mD]	0.1	5	1000

Tabel 4.4 Parameters van de Devoon play.

4.2.2 Dinantien

Voor het succesvol aanboren van de Dinantien play wordt op basis van de huidige kennis gedacht dat de platformcarbonaten het meeste kans bieden. De verwachte permeabiliteit is zeer gering en ligt in de orde van enkele milli-Darcies. Als natuurlijke fractures of breuken aanwezig zijn kan de permeabiliteit enkele tientallen milli-Darcies bedragen. Kennis van de aard en gesteldheid van de breuken (verzet, bewegingsrichting, gesteente-eigenschappen, spanningstoestand van de ondergrond, geologische geschiedenis) is belangrijk om een voorspelling te kunnen doen over de permeabiliteit. In het geval dat (restanten van) karstgaten aanwezig zijn kan de permeabiliteit zeer groot zijn, in de orde van een Darcy⁵. De aanwezigheid van karst, breuken en fractures is tot op heden niet het onderwerp van uitgebreide studie geweest. De schattingen van Tabel 4.5 zijn dan ook onzeker.

De gemiddelde dikte van de platformcarbonaten is ongeveer 800 meter. In de offshore is de dikte soms kleiner, in de orde van 200 meter. Grotere diktes dan ongeveer 950 meter zijn voorslagnog niet aangetroffen.

	minimaal	verwacht	maximaal
dikte [m]	200 ⁶	800	950
permeabiliteit [mD]	0.1	5	1000

Tabel 4.5 Parameters van de carbonaatplatformen in de Dinantien play.

4.3 Ranking van de plays op ondergrondse potentie

Niet iedere UDG play in Nederland biedt dezelfde kansen uit het oogpunt van verwacht geothermisch vermogen, ruimtelijke verbreiding en gesteente-

⁵ In het eerste doublet van Californië zijn karstgaten aangetroffen, evenals in een aantal andere boringen in het Dinantien in Zuid-Nederland. Deze zijn echter allemaal relatief ondiep. Het is niet bekend of deze karstgaten ook voorkomen op grote diepte.

⁶ Deze minimale en maximale inschatting van de dikte is van toepassing in de gebieden met aangevoerde carbonaatplatforms in Figuur 4.6, op basis van putinformatie. Buiten deze gebieden is het in principe mogelijk platforms aan te treffen, maar dat wordt niet waarschijnlijk geacht.

eigenschappen. Dit hoofdstuk beschrijft per play (van ondiep naar diep) de ondergrondse geschiktheid voor UDG, en ranking voor het UDG programma.

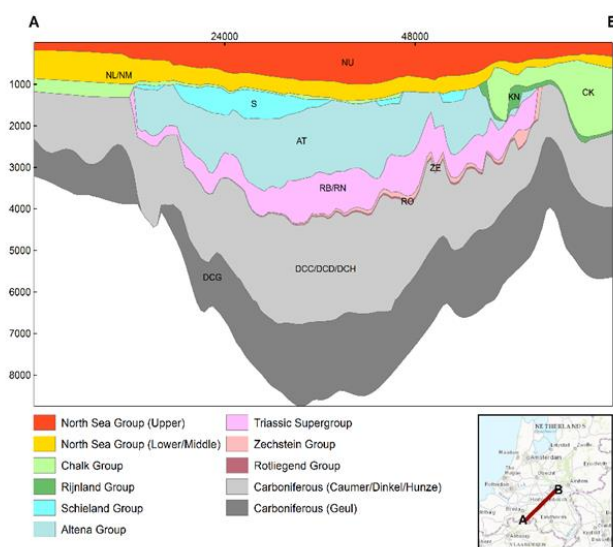
4.3.1 *Trias*

De laterale verbreiding van dat deel van de gesteenten van Trias-ouderdom dat warmer dan 120°C is, is relatief klein en beperkt tot voorkomens in het West-Nederlands Bekken (WNB) en de Roerdalslenk (Figuur 4.13). Hier heeft de Trias weliswaar een aanzienlijke dikte, maar de reservoirkwaliteit is naar verwachting slecht. De play wordt ook beschreven in ThermoGIS.

Het geothermieproject Trias Westland, dat in de ontwikkelingsfase verkeert, zal in de eerste helft van 2017 de Trias in het Westland op grote diepte aanboren. De overheid neemt in dit project deel middels een 'green deal', waardoor hier de eerste stappen van de in dit rapport voorgestelde play-ontwikkeling gezet worden in samenwerking met initiatieven vanuit de markt.

4.3.2 *Rotliegend*

De verbreiding van het deel van het Rotliegend dat warmer dan 120°C is, is groter dan die van de Trias, maar eveneens gelimiteerd tot het West-Nederland Bekken en de Roerdalslenk in het zuiden, en de Gouwzee Trog en de omgeving van het Lauwersmeer in het noorden (Figuur 4.14). In het zuiden is de dikte van de gesteenten uit het Rotliegend veelal minder dan 25 meter (Figuur 4.16). Dit wordt als onvoldoende beschouwd voor een succesvol UDG-project.



Figuur 4.16 Dwarsdoorsnede door het West-Nederland Bekken. De dikte van het Rotliegend is gering en neemt naar het zuiden toe verder af. De dikte van de Trias is het grootst in het centrum van het bekken.

In het noorden zijn gesteenten van de Rotliegend Groep warmer dan 120°C wel dikker, waaronder de omgeving van de natuurgebieden Lauwerszee en Waddenzee. De vraag werpt zich op dit relevant is gezien de kleine ruimtelijke schaal in het Zuiden, en de beschermde status van de gebied in het Noorden.

4.3.3 *Carboon*

Afzettingen uit het Carboon zijn wijd verbreid in de Nederlandse ondergrond. De relatief ondiepe delen van het Carboon (Caumer, Dinkel en Hunze Subgroepen)

bevatten voornamelijk schalie (kleisteen), kool en verspreide, dunne zandsteen. De hieronder gelegen Geul Subgroep bestaat hoofdzakelijk uit schalie. Kleisteen is zeer impermeabel, slap en heeft soms de eigenschap te zwellen als het nat wordt. Het is daarom ongeschikt voor UDG. De lokaal voorkomende zanden wisselen veelal af met kleisteen (lage netto-brutoverhouding), hetgeen resulteert in slechte reservoir-eigenschappen, en in dusdanig geringe dikte en verbreiding dat ook deze ongeschikt zijn als UDG play.

De (kolen-)kalksteen van het Dinantien vormt een heterogene play. Binnen de verschillende domeinen van het Dinantien komen mogelijk verschillende soorten permeabiliteit voor (breuk-, karst-, natuurlijke fractured- en matrixpermeabiliteit). In combinatie met een grote ruimtelijke verbreiding en voldoende dikte maakt deze gesteenten geschikt voor UDG-ontwikkeling in Nederland. Echter, vanwege de grote diepteligging in grote delen van Nederland is er op deze locaties nog weinig bekend over deze gesteenten.

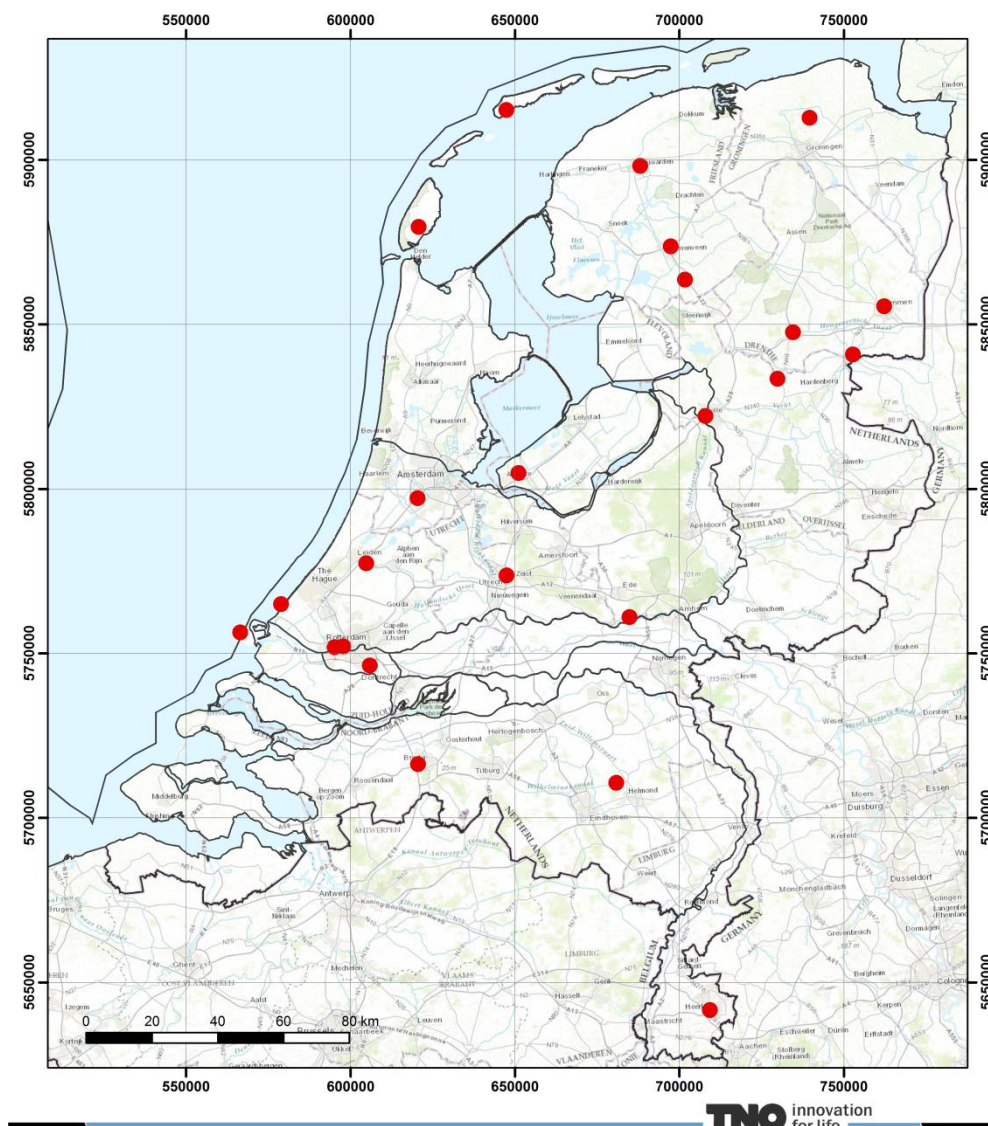
4.3.4 *Devoon*

De afzettingen van de Devoon formatie liggen onder die van het Carboon. Gesteenten van Devoon-ouderdom zijn nog minder vaak aangeboord dan die van het Carboon. De beperktheid van de kennis van deze gesteenten in combinatie met de kennis die er wel al is (veelal in principe ongunstige lithologie) maken dat play-ontwikkeling van het Devoon niet de eerste voorkeur heeft voor ontwikkeling. Op langere termijn kan deze play wel relevant zijn.

4.4 **Match met warmtevraag**

Hoofdstuk 2 kent een belangrijke rol toe aan de warmtevraag bij de definitie van een UDG play, omdat die mede bepalend is voor de vereisten van de bijpassende geothermiebron (bijv. voor het opwekken van elektriciteit is een bepaalde minimumtemperatuur nodig, of een bepaalde warmtevrager heeft een minimaal vereist debiet en temperatuurniveau dat alleen in bepaalde plays behaald kan worden). Hoewel de warmtevraag niet tot de ondergrondse inzichten behoort is het belangrijk hier toch op in te gaan.

Hoewel ongeveer 60% van de primaire energiebehoefte bestaat uit de vraag naar warmte, wordt in veel toekomstscenario's vooral gekeken naar verduurzaming van de elektriciteitsvoorziening. Een groot voordeel van elektriciteit ten opzicht van gewonnen warmte, is dat elektriciteit beter te transporteren is over grote afstanden. Bij warmtetransport over grotere afstand treden verliezen op die de businesscase onhaalbaar maken. De rendementen van een warmtenet staan dit momenteel niet toe, en daarnaast is een warmtenet aanzienlijk minder alom aanwezig dan het elektriciteitsnet. Om hier mee om te gaan zijn er twee opties: geothermische warmte gebruiken voor het opwekken van elektriciteit, of het geografisch matchen van de vraag en aanbod van geothermische warmte.



Figuur 4.17 Momenteel bij TNO/EBN bekende locaties waar door partijen interesse is getoond in ultradiepe geothermie.

4.4.1 *Elektriciteitsopwekking met geothermie*

Indien er een geothermiebron aangeboord wordt van temperaturen van boven de 150°C ⁷ kan door middel van een ORC (organic rankine cycle) of Steam Flash Cycle elektriciteit opgewekt worden. Hoewel hier nog veel ontwikkelingen in gaande zijn, ligt de huidige realiseerbare netto efficiëntie, afhankelijk van de productietemperatuur, tussen de 8% en 16% voor conversies van warmte naar elektriciteit met behulp van een ORC Module (zie ook hoofdstuk 2).

4.4.2 *Direct gebruik van de warmte*

Wat in deze fase voornamelijk meer voor de hand ligt is te kijken naar direct gebruik van de warmte, zoals bekend uit de geothermieprojecten in de glastuinbouw in Nederland. Hierbij komen m.n. industrieën in aanmerking met een warmtevraag

⁷ Dit is geen harde grens, maar de temperatuur is van groot belang voor de efficiëntie van conversie. ORC is ook mogelijk bij lagere temperatuur.

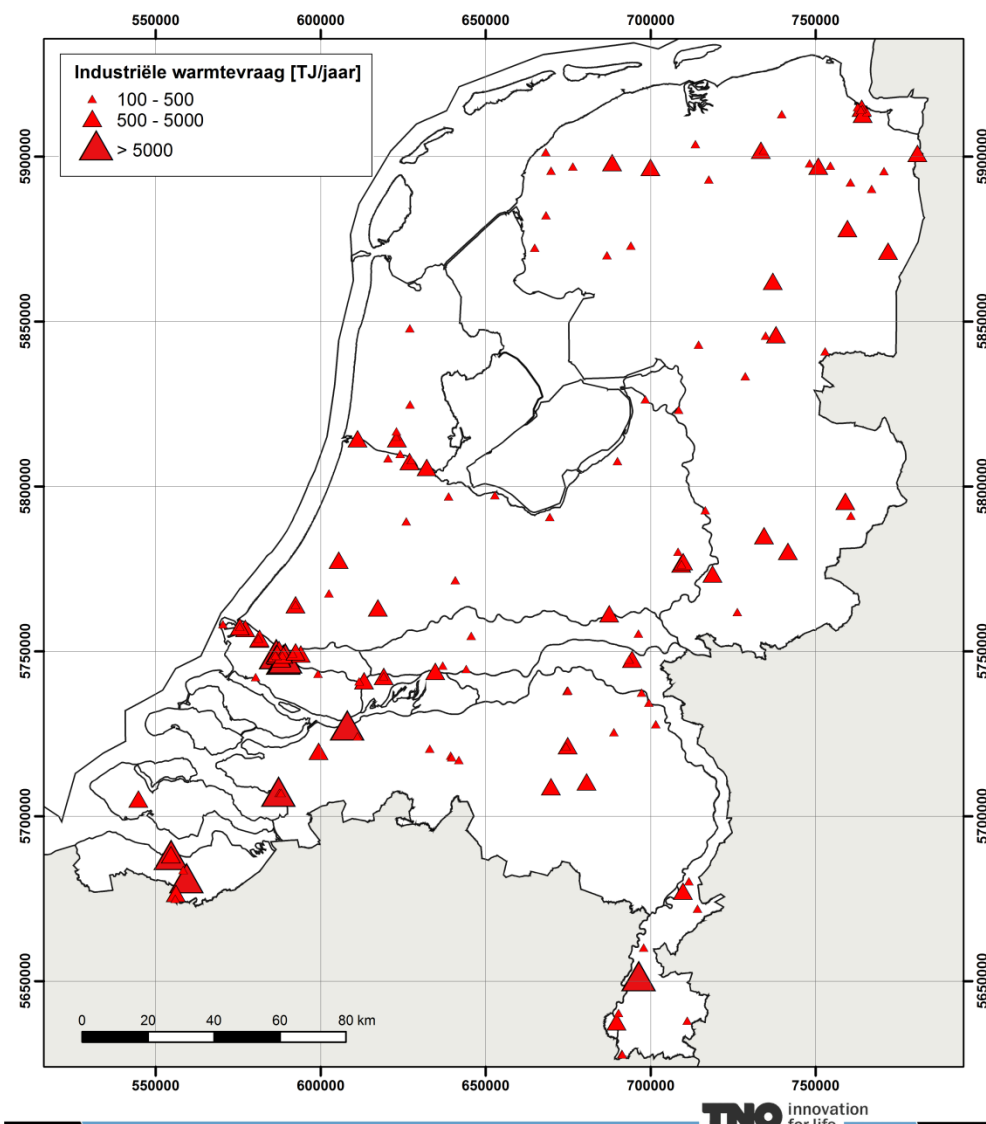
tussen de 100 en 200°C met een totale potentie van circa 170 PJ, zoals geschetst in hoofdstuk 1. Dit kan uitsluitend wanneer de locatie van de warmtevrager overeenkomt met een geschikte geothermiebron.

De Warmteatlas van RVO geeft een overzicht van de warmtevraag in Nederland (www.warmteatlas.nl) (Figuur 4.18). Voor UDG zijn vooral de chemische, papier(waren)- en voeding- en genotsmiddelenindustrieën van belang vanwege de combinatie van grote warmtevraag en temperatuurbereik. Figuur 4.18 laat dan ook deze industrieën zien, gefilterd op een warmtevraag van meer dan 100 TJ per jaar.

De vereiste temperatuur van overige energie-intensieve sectoren zoals elektriciteitscentrales, hoogovens, steenbakkerijen, glas- of aluminiumindustrie is veelal hoger 400 °C. Industriële bedrijven met een energievraag die kleiner is dan ongeveer 100 TJ zijn ook minder interessant omdat deze vraag te klein is voor een duur doublet met een verwachte stoomproductie van veel meer dan 100 TJ (ter vergelijking: een doublet van 10 MW dat 8000 uur draait produceert in een jaar 288 TJ).

Een match met de Dinantien-play bestaat in mogelijk in Groningen (Delfzijl, Hoogezand) en Friesland (Leeuwarden), langs de trend IJmuiden – Amsterdam – Utrecht – Arnhem/Nijmegen, en in de Rijnmond en West-Brabant.

Naast de industriële warmtevraag is er ook een grote energievraag van huishoudens en kantoren. In deze warmte kan direct worden voorzien uit een ultra-diepe geothermiebron, of secundair vanuit de restwarmte na een andere primaire warmtebenutting, het zogenaamde cascaderen.

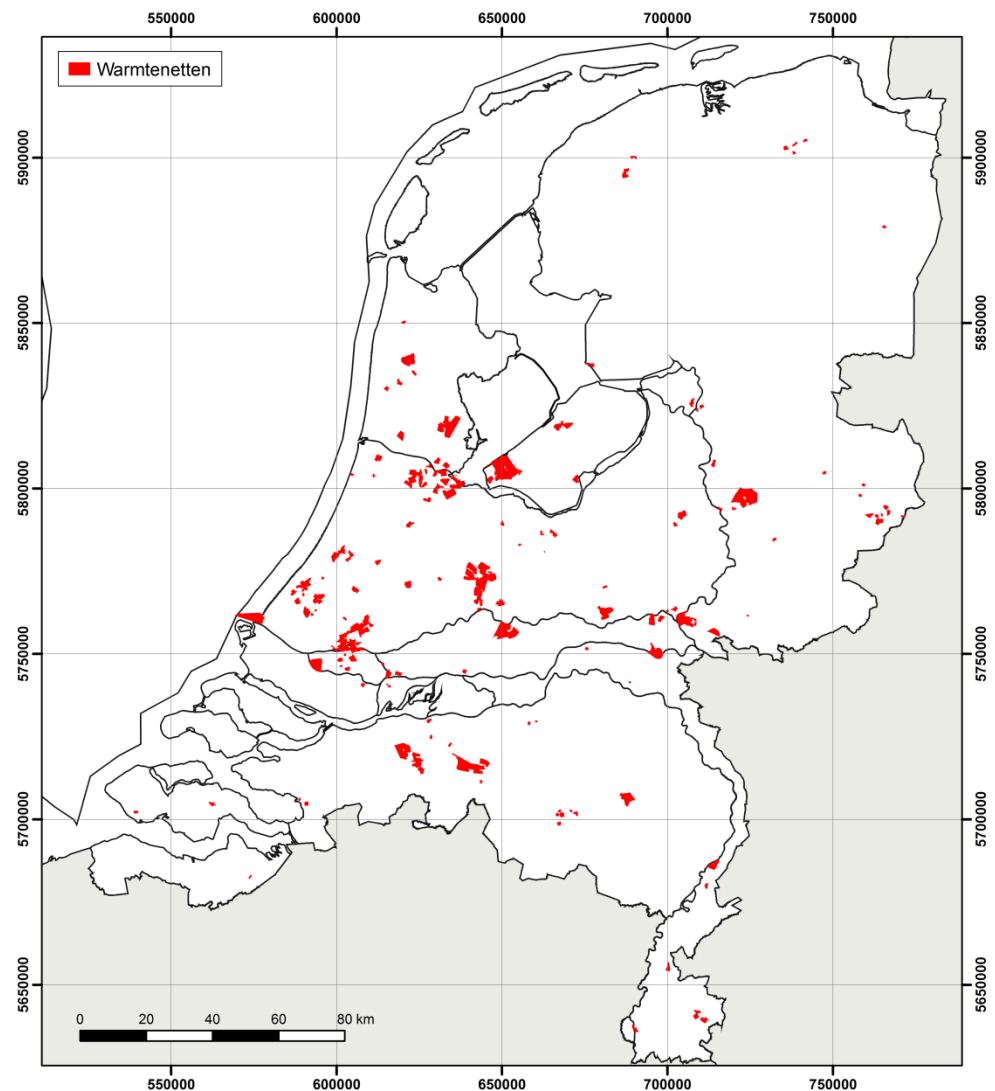


Figuur 4.18 Industriële warmtevragers in Nederland (chemische, papier(waren)- en voeding- en genotsmiddelenindustrie). Minimale warmtevraag 100 TJ/jaar. Bron: RVO Warmteatlas.

Cascaderen is mogelijk wanneer twee of meer gebruikers met een complementaire warmtevraag gebruik maken van dezelfde geothermische bron. Een gebruiker van hoge-temperatuurwarmte in de procesindustrie kan zijn restwarmte leveren aan een kassencomplex met een warmtevraag van lagere temperatuur. Tot slot kan het water van een zwembad mogelijk verwarmd worden, alvorens het geothermische water terug te pompen in de geothermische bron.

Ook een warmtenet kan gevoed worden met een geothermische bron. Een warmtenet dat draait op een temperatuur van bijvoorbeeld 110°C, kan voor een duurzame warmtevoorziening uit de voeten met een ultra-diepe bron van 140°C of meer die aangesloten wordt op de warmtewisselaar. Maar ook het aansluiten van een primaire, hoogwaardige warmtegebruiker die gevoed wordt vanuit een ultra-diepe geothermiebron kan een vorm zijn van optimaal gebruik van de warmte middels een warmtenet indien de temperatuur van het warmtenet lager ligt.

De Warmteatlas geeft ook een overzicht van de huidige warmtenetten in Nederland (figuur 4.14).

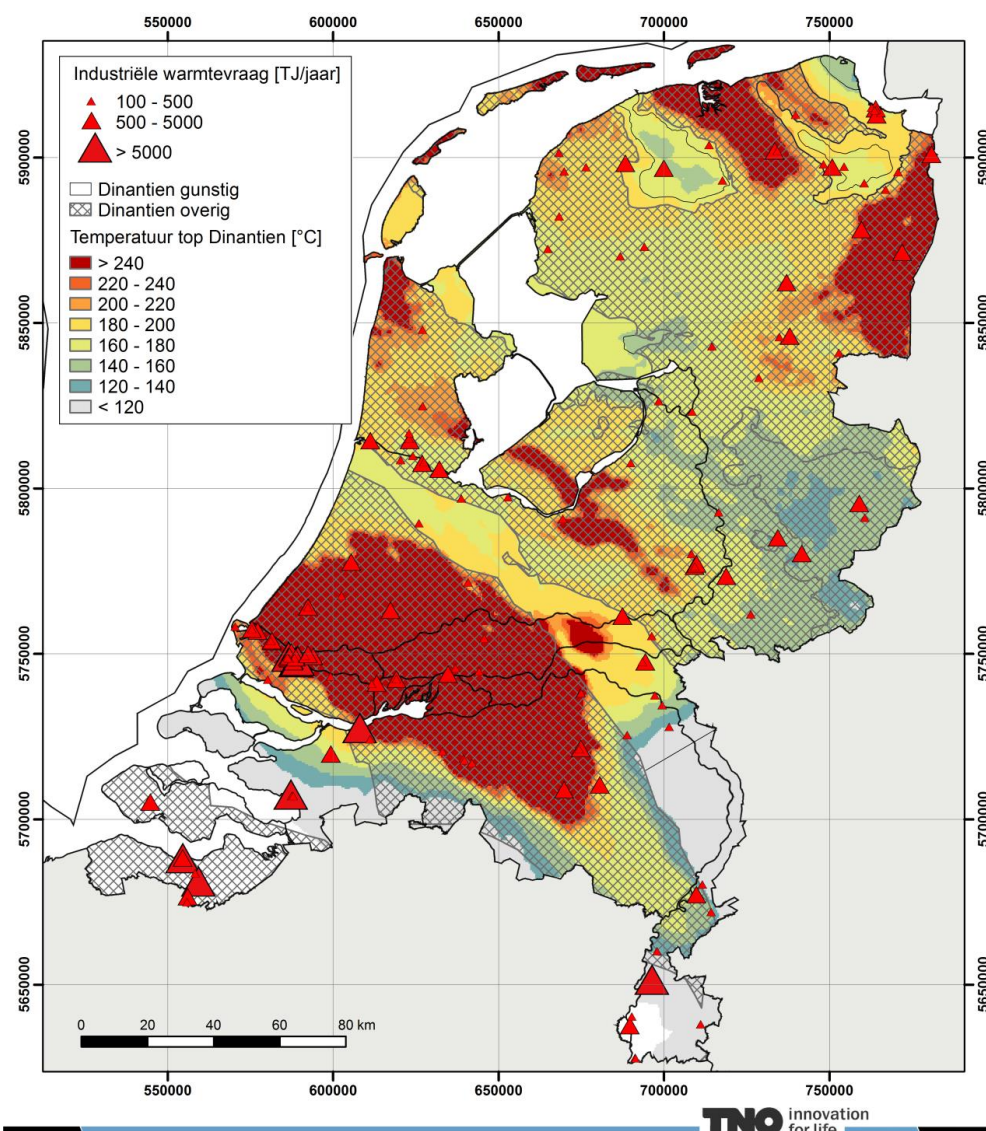


Figuur 4.19 Overzicht van de huidige warmtenetten in Nederland (bron: RVO Warmteatlas).

4.4.3

Samenvatting kansen UDG Plays in Nederland

Gelet op de bovenstaande uiteenzetting, kan er een ranking gemaakt worden van de verschillende UDG plays in Nederland. Voor een nationale aanpak ter reductie van de ondergrondkennis en bijbehorende risico's voor een UDG project, is naast de temperatuur ook de omvang van de play belangrijk. Daarnaast is de doorlatendheid cruciaal voor een succesvol project, alsmede de match met de warmtevraag (Figuur 4.20). De staat van de ondergrondkennis kan onderscheidend zijn in de ontwikkelingskansen voor een UDG play. Tabel 4.6 toont hoe deze parameters uitpakken voor de verschillende relevante geologische formaties. Deze laat duidelijk zien dat de ontwikkeling van de Dinantien play de voorkeur gegeven moet worden.



Figuur 4.20 Gecombineerd overzicht van de Dinantien-play en de industriële warmtevraag van Figuur 4.18.

Een enkele UDG bron levert 1-2 PJ/y aan duurzame warmte. Op basis van de uitgestrekte verbreiding van de Dinantien play en goede match met de warmtevraag is de verwachting dat de Dinantien play in 2030 enkele tientallen PJ/y kan leveren, door de realisatie van meer dan 10 projecten.

	Dinantien	Rotliegend	Trias	Carboon zand	Devoon
Temperatuur	Hoog	Middel	Middel	Hoog	Hoog
Omvang play	Groot	Beperkt	Beperkt	Onbekend	Onbekend
Doorlatendheid	Mogelijk	Mogelijk	Mogelijk	Onbekend	Onbekend
Ondergrondkennis	Beperkt	Bekend	Bekend	Beperkt	Onbekend
Match warmtevraag	Breed aanwezig	Aanwezig	Aanwezig	Onbekend	Onbekend

Tabel 4.6 Overzicht van de verschillende tijdvakken die vallen binnen het gedefinieerde UDG-domein, en de kwalitatieve inschatting van de verschillende parameters.

4.5 Kennishiaten en te ontwikkelen ondergrondse kennis voor de Dinantien play

Deze paragraaf behandelt kennishiaten en -vragen die relevant zijn voor de ontwikkelfasen 1 (a-c) en 2 (d-e) van Tabel 3.1. De relatie met stimulatie (fase 2f) en locatiekeuze (2g) zijn geen onderwerp van deze paragraaf maar moeten geadresseerd worden in een vervolgstudie.

De kennis van het Dinantien, en de karakteristieken ervan, verschillen sterk van plaats tot plaats. De gangbare en elders gevalideerde theorie gaat er vanuit dat gesteenten uit het Dinantien te verdelen zijn in platformcarbonaten en bekkensedimenten. De platformcarbonaten hebben de meeste potentie voor geothermie. Een aantal sub-plays kan onderscheiden worden aan de hand van Figuur 4.6, waarbij de kennishiaten en -vragen verschillen per sub-play.

Geheel Nederland

Voor geheel Nederland is een **structurele evaluatie** nodig voor de verklaring en voorspelling waar wel of niet carbonaatplatformen zijn gevormd, en in welke platform- en/of bekkenfacies. Deze evaluatie geeft inzicht in de plaatsen waar goede reservoirkwaliteit als gevolg van post-depositionele dolomitatie / karst vorming / fracturing / mineralisatie mogelijk is. Deze evaluatie maakt het ook mogelijk te bepalen wat de voorspellende waarde is van de resultaten van een boring op een bepaalde locatie voor andere locaties.

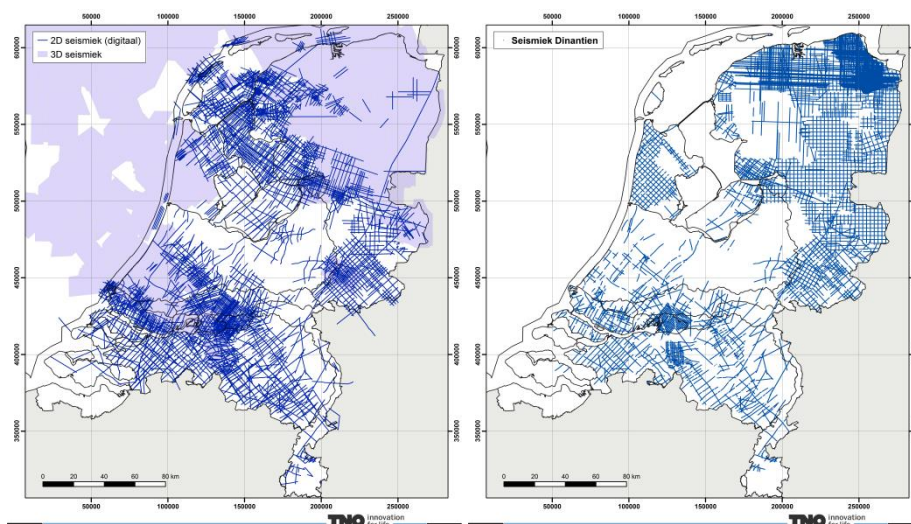
Voor alle gebieden geldt tevens het uitvoeren van een analyse op boringen die het Dinantien aangeboord hebben voor wat betreft **geologie** en **productiegedrag**. Hierbij wordt gedacht aan boringen uit Nederland, België, Duitsland en wellicht Engeland. Analogen kunnen de kennis van verschillende facies van het Dinantien vergroten, en daarmee de vraag beantwoorden of er een relatie is tussen platformfacies en (verhoogde) productiviteit.

Temperatuur is extreem belangrijk. Voor dit rapport is het temperatuurmodel van Bonté et al. (2013) gebruikt. Voor grote diepte is dit model gekalibreerd met weinig meetgegevens. De temperatuurschatting op grote diepte is hierdoor onzeker, en de bandbreedte van de onzekerheid onbekend. Aanbevolen wordt het temperatuurmodel te actualiseren met een verbeterde kalibratiemethode die ook onzekerheid in beeld brengt (Limberger et al., 2015). Dit verbetert de nauwkeurigheid van de temperatuurschatting. Ook het gebruik van temperatuurmetingen die tussen 2013 en 2016 beschikbaar zijn verbetert het model.

Stressveld en induced seismicity⁸: inschatting van het stressveld (grootte en richting) in de ondergrond tussen vier en acht kilometer diepte is nodig om risico's in te schatten voor geïnduceerde seismiteit in samenhang met ontwikkelscenario's (Gaucher et al., 2015). De inschatting van het de grootte en richting van het stressveld is een basisparameter voor numerieke modellen die de technische performance van hydraulische stimulatie en het seismisch risico dat daarmee samenhangt voorspellen. Een compilatie van het stressveld in Nederland is recent beschreven in Van Wees et al. (2014). Een play-specifieke inschatting van het risico op induced seismicity kan alleen gemaakt worden in samenhang met het gekozen stimulatiescenario. Dat laatste is onderwerp van een andere studie en buiten de scope van deze studie.

Regionaal

Een aantal vervolgstappen is afhankelijk van de ligging van de regio binnen Nederland en met name de databeschikbaarheid binnen een regio.



Figuur 4.21 3D en digitale 2D seismiek in de Nederlandse onshore (links), en locaties waar het Dinantien op seismiek geïnterpreteerd is (rechts). In aanzienlijke delen van Nederland is het Dinantien op de huidige seismiek niet of moeilijk te interpreteren.

In **Noord-Nederland** zijn op 3D seismiek verschillende carbonaatplatforms goed te zien (Groningen, Friesland, Luttelgeest, zie bijvoorbeeld Kombrink 2008, ook Figuur 4.21). De locatie, diepte en in mindere mate dikte zijn daar goed bekend. De in deze platformfacies door slechts twee boringen aangetoonde gesteenten hebben een zeer lage permeabiliteit⁹. Het is hier vooral belangrijk meer kennis over de permeabiliteit van het gesteente te ontwikkelen.

⁸ Induced seismicity: seismische activiteit als gevolg van menselijk handelen

⁹ De aanwezigheid van karst in gesteenten van Dinantien-ouderdom in Zuid-Nederland wordt (deels) verklaard door een hiaat tussen Dinantien de gesteenten uit het Krijt die hier bovenop liggen. Tussen Dinantien en Krijt heeft het platform een bepaalde periode aan het oppervlak gelegen waardoor karst kon optreden. De afwezigheid van karst in Noord-Nederland in LTG-01 en UHM-02 wordt mede geweten aan het ontbreken van dit hiaat – hier liggen dikke afzettingen uit het Namurien direct op die uit het Dinantien.

- Breuken kunnen voor permeabiliteit zorgen (Figuur 4.5). Breuken in het Dinantien zijn tot op heden beperkt gekarteerd. Nieuwe analyse van bestaande (of nieuwe) seismiek is hiervoor nodig. Hieronder wordt zowel interpretatie van breuken als analyse van seismische attributen verstaan.
- Buiten het bereik van 3D seismiek (bijvoorbeeld richting Luttelgeest) is de huidige 2D seismiek van matige kwaliteit op grotere diepte (Figuur 4.21). Ook is de kwaliteit van de 3D seismiek niet altijd voldoende om de basis van het Dinantien vast te stellen. Het opnieuw processen van bestaande, pre- of post-stack seismiek, is hiervoor noodzakelijk. Opnieuw geproceste seismiek geeft ook beter inzicht in de ontwikkeling (lateraal en verticaal) van de verschillende gesteentetypen (facies) die het platform bepalen (top, helling, bekken). Betere kennis van de facies geeft meer inzicht in bijvoorbeeld de mogelijkheid dat karst is opgetreden (Figuur 4.4, Figuur 4.5). Karstverschijnselen zijn soms ook op grote diepte (4500-6000m) zichtbaar op goede 2D en 3D seismiek (Yang et al. 2010).
- Het is bekend dat in dikke, weinig permeabele gesteentelagen warmte-convectiestromen kunnen voorkomen (Lipsey et al. 2016). Deze zorgen lokaal voor grote afwijkingen in de temperatuur. Het kunnen optreden van convectie stelt bepaalde eisen aan (de permeabiliteit van) het gesteente. Het is belangrijk te weten waar deze convectiestromen op kunnen treden. De ontwikkeling van geologische en geomechanische modellen met parametrisering van de gesteenten (m.n. permeabiliteit) is hiervoor nodig.
- Microscheuren (fractures) in het gesteente zijn belangrijk voor de permeabiliteit. Fractures kunnen opgespoord worden op (onder meer) Formation Micro Imaging (FMI) en andere logs. Informatie uit welltests en (X)LOTs¹⁰ kunnen informatie opleveren over fractures en breuken. Daarnaast geeft analyse van breukpatronen in seismiek informatie. Kennis van het niveau waarop fractures aanwezig zijn, de dichtheid van de fractures, en de aard ervan (conductief of niet) draagt sterk bij aan de kwaliteit van de geologische en geomechanische modellering. Log-analyse van relevante boringen (o.a. FMI van LTG-01) samen met analyse van 3D seismiek gericht op het identificeren van fractures en breuken is nodig om meer begrip te krijgen van het optreden van fractures in de gesteenten van de Zeeland Formatie

In **Midden-Nederland** (Texel-IJsselmeer en Zandvoort – Utrecht trends) wordt op basis van geologische concepten vermoed dat hier in het Dinantien ook platforms kunnen hebben gelegen. Behalve in Luttelgeest zijn deze op seismiek nog niet aangetroffen.

- Het opnemen van nieuwe 2D seismische lijnen, of her-processen van oude 2D (of 3D) seismische surveys, met focus op het diepere bereik maakt het mogelijk individuele platforms – indien ze op deze trends voorkomen - te vinden die op basis van de huidige seismiek niet zichtbaar zijn.

In **Oost-Nederland** is op de top-Dinantien-kaart (Figuur 4.22, locatie 5 van Figuur 4.6) een aantal verhogingen te zien. Van deze locaties wordt verondersteld dat ze tijdens het Devoon boven water lagen, en dat tijdens het Dinantien weinig of geen depositie plaats vond. Hiervoor is echter geen direct bewijs. De ellipsen omvatten onder meer het Luttelgeest-platform, dat eenzelfde verhoging laat zien. Het is

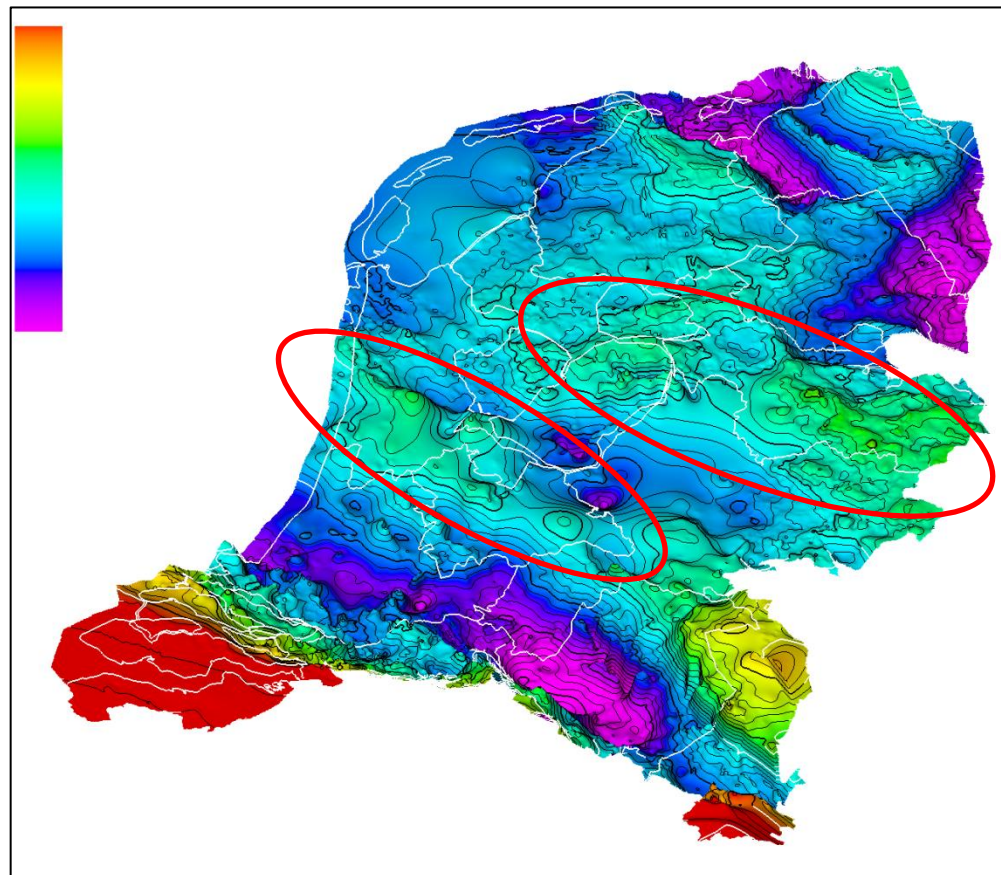
¹⁰ XLOT: Extended Leak-Off Test

mogelijk dat op die verhogingen ook carbonaatplatforms aanwezig zijn. Deze zijn echter niet aangeboord, noch duidelijk op seismiek te zien. Het is bijvoorbeeld ook mogelijk dat de hooggelegen gebieden tektonisch bepaald zijn (wat ook het geval zou kunnen zijn voor de ellips in het Zandvoort-Utrecht gebied).

- Voor deze sub-play geldt hetzelfde als voor de voorgaande: betere seismiek kan meer licht werpen op de vraag of hier carbonaatplatforms zijn.

In **Zuid-Nederland** is geen 3D seismiek, maar wel 2D. De verbreiding van de Zeeland Formatie in dit gebied is aan de hand van seismiek en boorgegevens uitgebreid beschreven door Boots (2015). De boringen die het Dinantien in dit gebied hebben aangetoond, liggen voornamelijk in het ondiepe domein (2000-3000 meter). Karst is vastgesteld in diverse boringen die de Zeeland Formatie in het zuiden van Nederland en in België hebben aangeboord (onder meer relatief ondiep in de geothermieboringen in Grubbenvorst (Californië), de gasopslag in Loenhout (B), en wellicht de nieuwe geothermieboringen in Mol (B)). Ten noorden van de zone waar de meeste boringen zich bevinden, neemt de diepte van de gesteenten van het Dinantien zeer snel toe. Er is dus een relatief smalle zone ten noorden van het Londen Brabant Massief waar de gesteenten van het Dinantien op geschikte diepte liggen (Figuur 4.15). De noordelijke begrenzing van de platformcarbonaten (Figuur 4.6) bevindt zich op basis van de huidige data in ongeveer hetzelfde bereik.

- De noordelijke begrenzing van de platformcarbonaten is zeer belangrijk in relatie tot de mogelijke warmtevraag in het Rijnmondgebied. Gedetailleerde analyse van vintage of gereproceste seismiek kan deze grens nauwkeurig vaststellen, mede in relatie tot de diepteligging.
- Het is niet bekend of karst overal in deze sub-play voorkomt, in welke mate, en op welke plaatsen binnen de platformen. Analyse van analoge boringen in België en Nederland kan deze vraag mogelijk beantwoorden. Seismiek kan hiervoor eventueel ook gebruikt worden.
- Het is bekend dat in gesteenten van de Zeeland Formatie conductieve fractures voorkomen. Het is onbekend in welke mate deze bijdragen aan de productie. Analyse van productie- en loginformatie kan hierover uitsluitsel geven.



Figuur 4.22 Oblique aanzicht van de top van het Dinantien (paars = diep, rood = ondiep). De ellipsen geven de locaties van mogelijke maar nog niet aangetoonde platforms.

Alternatieve exploratie en analyse technieken: Naast conventionele methoden zoals reflectieseismiek en seismische attribootanalyse, is het mogelijk innovatieve methodieken toe te passen (e.g. Van Wees et al., 2015) zoals

- analyse van gravimetrie voor het opsporen van paleozoïsche basement-domeinen (die mede bepalend zijn voor de locaties waar platformen voorkomen);
- passieve seismiek voor het vaststellen van natuurlijke seismiciteit en 3D structuur;
- magnetotellurische methoden voor de detectie van diepe temperatuur-anomalieën boven 250°C en mogelijk doorlatende breuksystemen;
- bekkenanalyse ten behoeve van het vaststellen van de begravings- en opheffingsgeschiedenis, die een grote invloed heeft hebben op de ontwikkeling van secundaire permeabiliteit.

Seismiek

Seismiek is de geofysische methode met het beste oplossend vermogen versus diepte. Nederland heeft een rijke historie van seismische metingen, waardoor bijna de gehele Nederlandse onshore en offshore bedekt is met 2D en 3D seismiek (Figuur 4.21). Inzet van deze oude seismiek voor UDG kan tegen relatief kleine investeringen veel resultaat opleveren. Niet alleen zijn de kosten lager, maar risico's en onzekerheden in de locatie en performance van de plays worden ook sterk gereduceerd.

De data-acquisitie van de seismiek is voornamelijk uitgevoerd in de jaren 1960-1990. De gebruikte acquisitie-technieken waren in die tijd al van hoge kwaliteit, maar de seismische processing was vergeleken met nu van mindere kwaliteit. Met huidige technieken kunnen oude seismische data zowel *prestack* als *poststack* ge-reprocessed worden, wat een enorm potentieel oplevert. TNO heeft innovatieve reprocessing algoritmes ontwikkeld waarmee dit mogelijk is. Reflecties (diepte- en dikteligging) en breuken tot 6 km diep kunnen in enorm detail gevisualiseerd worden, wat voorheen niet mogelijk was. Hiermee zijn diepe plays binnen handbereik. Ook karst en andere macro-geologische effecten zijn mogelijk tot op zekere hoogte in te schatten.

Seismische attributen zijn metadata die maximaal profiteren van reprocessing. Seismische interpretatie kan met deze attributen gestuurd en geautomatiseerd worden. TNO heeft automatische interpretatiemethodes ontwikkeld waarmee snel en met minimale interactie reservoirs en breuken op seismische 2D en 3D volumes gekarteerd worden.

Nieuwe technieken kunnen op deze ge-reprocesste en opnieuw geïnterpreteerde seismiek toegepast worden. Naast de verbeterde werking van attributen zijn well-tie-in's, AVO-analyse, Full Waveform Inversie en snelheidsmodellering nu mogelijk. Hierdoor komen niet alleen de contouren van de Trias-, Rotliegend-, Dinantien- en Devoon-reservoirs scherper in beeld, maar ook gesteente-eigenschappen als porositeit en permeabiliteit en de aanwezigheid van breuken en fractures kunnen beter geschat worden. Voor de carbonaatplatforms van het Dinantien is dit zeer relevant, omdat de setting en locatie van de platforms zeer bepalend zijn voor de geothermische karakteristieken. Ook thermische anomalieën zoals waargenomen bij de boring Luttelgeest kunnen beter verklaard en geëxploiteerd worden.

Als eenmaal target reservoirs met sterk verminderde onzekerheden en risico's bepaald zijn, kunnen de reservoirs daadwerkelijk aangeboord worden. Naast well-tests om de performance van de reservoirs te bepalen, zijn geofysische monitoring-tools nodig om de continuïteit van productie en injectie te bewaken. Met name pressure en saturation fronts zijn gewenste parameters om te monitoren. Ook induced seismicity en eventuele bijvangst kunnen hiermee nauwkeurig gemonitord en gereguleerd worden. Tools zoals timelapse seismiek, VSP, micro-seismic arrays en downhole sensors zijn hiervoor zeer geschikt.

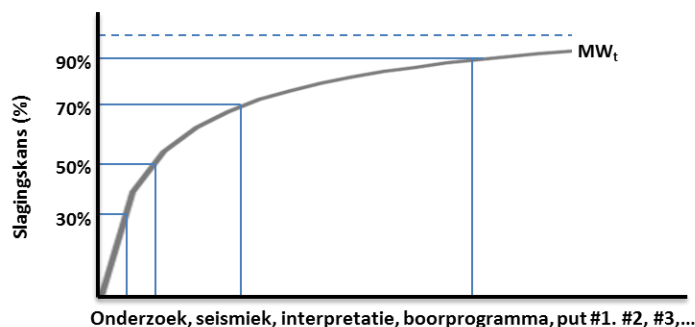
Met bovengenoemde geofysische tools kan de Nederlandse ondergrond tegen relatief lage kosten en met sterk verminderd risico geëxploreerd worden voor een volgende generatie UDG targets.

4.6 Outlook mogelijke Dinantien play ontwikkeling in Nederland 2017-2030

De activiteiten die beschreven zijn in de vorige sectie dragen bij aan het terugbrengen van de risico's van de Dinantien plays, gemeenschappelijk (bijvoorbeeld temperatuurmodel, spanningsopbouw) of meer play specifiek (bijvoorbeeld opbouw van de formatie, laterale variaties in facies, diepte, dikte, verbreuking) of locatie specifiek (bijvoorbeeld verbreuking, dikte, diepte, etc).

De inschatting van de kans op succes wordt naar verwachting sterk verbeterd door de generieke leereffecten van exploratie en ontwikkeling van projecten binnen een

play en tussen de plays. Hierdoor neemt de zekerheid van het te verwachten, of benodigde, vermogen voor een bepaalde P-waarde navenant toe (Figuur 4.23).



Figuur 4.23 Schematische weergave van de toename van kans op succes en geassocieerd thermisch vermogen, door het doorlopen van de leercurve van de play voor meerdere UDG projecten

Afhankelijk van de resultaten van de eerste projecten is de verwachting is dat gedurende het doorlopen van de Dinantien play ontwikkeling circa vier respectievelijk zes projecten zouden kunnen worden ontwikkeld in de periode 2017-2020 en 2020-2023. Bij succes zouden vervolgens circa 30 projecten cumulatief kunnen worden ontwikkeld in de periode tot 2030. Hierbij is er vanuit gegaan dat de nu nog grote ondergrondse risico's afdoende bekend en gereduceerd zijn en/of zijn afgedekt voor de projecten. Zodra naar een succesvolle slagingskans van 90% kan worden doorontwikkeld, zou UDG naar verwachting mogelijk geheel commercieel kunnen worden ontwikkeld.

	# beoogde projecten	Geothermisch Vermogen MWt	Draaiuren uur	Warmteproductie GWh/jaar	Warmteproductie PJ/jaar	Totaal UDG vermogen PJ
2020	4	50	6000	300	1.08	4.3
2023	6	60	6200	372	1.34	8.0
2030	20	75	7000	525	1.89	37.8
						50.2

Tabel 4.7 Indicatieve prognose van de mogelijke ontwikkeling van UDG projecten en het vermogen, behoudens het succesvol doorlopen van de UDG leercurve

Verder zijn in de play-ontwikkeling ook synergiën met andere geothermische plays dan het Dinantien mogelijk. Hierbij kan gedacht worden aan doorboren naar Devoon voor het verzamelen van extra gegevens. Daarnaast levert UDG ook meer informatie voor conventionele geothermie (seismiek, informatie doorboorde lagen op weg naar het UDG target). Indien er naar 2030 meer kennis uit de exploratie van gas beschikbaar komt, kan deze ook bijdragen aan de verrijking van de kennis van de ondergrond.

5 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste conclusies zijn:

- De belangrijkste UDG-play is het Dinantien;
- het Devoon kan mogelijk interessant zijn als UDG-play, maar het kennisniveau hiervan is nog zo laag, en de ontwikkeling derhalve zo complex, dat een snelle ontwikkeling van UDG niet voor de hand ligt;
- de Trias en het Rotliegend zijn voor het overgrote deel van Nederland niet interessant voor UDG vanwege de lage temperatuur in combinatie met de beperkte ruimtelijke verbreiding van geschikte temperatuur (zie Figuur 4.8). Lokaal kan zowel het Trias als het Rotliegend wel interessant zijn voor de UDG.

Een enkele UDG bron levert ca. 1-2 PJ/y aan duurzame warmte. Op basis van de uitgestrekte verbreiding van de Dinantien play en goede match met de warmtevraag, zou de Dinantien play – bij succesvolle ontwikkeling – in 2030 enkele tientallen PJ/y duurzame energie kunnen leveren, door de realisatie van meer dan 10 projecten.

De belangrijkste hiaten in de kennis van het Dinantien die een voortvarende ontwikkeling in de weg staan, en die nodig zijn voor het risico-reductie van de play, zijn:

- De kennis van de permeabiliteitsverdeling (primair en secundair (fracture / breuk)) is beperkt en gebaseerd op weinig boorinformatie;
- de temperatuurverdeling en spanningsopbouw in het Dinantien is onzeker;
- de facies (lithologie) van het Dinantien, m.a.w. de verdeling tussen platformcarbonaten en bekkenfacies is op sommige plaatsen onzeker.

Deze kennis kan opgebouwd worden door:

- Het reprocessen en herinterpreteren van oude seismiek. Dit vermindert de onzekerheid in diepteligging en dikte van het reservoir, en vergroot de kennis van de facies en aanwezigheid van breuken;
- aanvulling met opnemen en analyse van nieuwe seismiek, ook voor verminderen onzekerheid in diepteligging en dikte van het reservoir, en vergroot de kennis van de facies en aanwezigheid van breuken;
- het verder ontwikkelen van temperatuur (en convectie) modellen met nadruk op het Dinantien. Dit vermindert de onzekerheid van de schatting van de temperatuur, en vergroot het inzicht in mogelijke grote lokale afwijkingen van de voorspelling van het temperatuurmodel;
- inschatting van spanningspatronen in de ondergrond 4-8 km, en modellering van ontwikkelscenario's om risico's in te schatten voor geïnduceerde seismiciteit;
- inzet van alternatieve exploratie- en analysetechnieken.

Een eerste verkenning van de match tussen vraag en aanbod van hoge temperatuur warmte bestaat in Friesland (Leeuwarden) en Groningen (Hoogezand,

Delfzijl), mogelijk langs de lijn IJmuiden – Utrecht – Renkum - Nijmegen, en eveneens mogelijk in de Rijnmond en West-Brabant (Figuur 4.20).

6 Referenties en overige relevante rapporten

6.1 Referenties

- Bonté, D., Van Wees, J.-D., Verweij, J.M., 2012. *Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling*. Geol.Mijnbouw-NJG v91, p491–515.
- Boots, R. (2015). *Regional context of a potential Dinantian play*. TNO-2014-R11604
- Degens G., Zijp M., de Boer J., Obdam A. en Eyvazi F. (2012). *BIA Geothermal – TNO Umbrella Report into the Causes and Solutions to Poor Well Performance in Dutch Geothermal Projects*. TNO 2012 R10719
- Gaucher, E., M Schoenball, O Heidbach, A Zang, PA Fokker, JD van Wees, 2015 . *Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 52, 1473-1490
- Grammer G.M., Thornton J.E., Robinson M.R., Feutz P.J., Schulz J.E., Harrison W.B. (2014). *Stratigraphic Control on the Lateral Distribution of Hydrothermal Dolomites away from Major Fault Zones: Part 2*. Search and Discovery article #50964.
- Hoornveld, N., 2013. *Dinantian carbonate development and related prospectivity of the onshore Northern Netherlands*. 1-142. MSc thesis (EBN-internship).
- Jaarsma, B., Brolsma, M.J., Hoetz, G., Lutgert, J.E., 2013. *Exploring Dinantian Carbonates in the SNS - New Data Offering New Insights*. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, DOI: 10.3997/2214-4609.20130916
- Kombrink, H. (2008). *The Carboniferous of the Netherlands and surrounding areas; a basin analysis*. PhD thesis, Universiteit van Utrecht.
- Limberger, J., Van Wees, J.D., Pluymaekers, M., Tesauro, M., Lipsey, L., Bonte, D., Cloetingh, S. (2016). *Constraining the thermal field of the European lithosphere with temperature observations*. European Geothermal Congress, September 19-13. Straatsburg.
- Lipsey, L., Pluymaekers M., Goldberg T., van Oversteeg K., Ghazaryan L., Cloetingh S., van Wees J.D. (2016). *Numerical modelling of thermal convection in the Luttelgeest carbonate platform, the Netherlands.. Geothermics v64, p135-151*.
- Mijnlieff H.F., A.N.M. Obdam, J.D.A.M. van Wees, M.P.D. Pluymaekers and J.G. Veldkamp (2014). *DoubletCalc 1.4 manual*. English version for DoubletCalc 1.4.3. TNO 2014 R11396.
- Mundhenk N., Huttenloch P., Sanjuan B., R., Kohl, T., Steger, H. and Zorn, R. (2013). *Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant*. Corrosion Science 70, p17-28.
- Regenspurg S., Feldbusch Helmholtz E. and Saadat A. (2013). *Corrosion Processes at the Geothermal Site Groß Schönebeck (North German Basin)*. NACE Corrosion 2013 conference and expo paper 2606. 15p.

SPE (2001). Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources. A Supplement to the SPE/WPC Petroleum Reserves Definitions and the SPE/WPC/AAPG Petroleum Resources Definitions.

TNO (2013). Digitaal Geologisch Model van de diepe ondergrond van Nederland. www.dinoloket.nl

Total (2007). A regional review of the Dinantian carbonate play: Southern North Sea & Onshore UK. A report prepared for the UK DBERR. 64p.

Van Wees, J.D., Hopman J., Dezayes C., Vernier R., Manzella A., Bruhn D., Scheck-Wenderoth M., Flovenz O., Páll Hersir G., Halldórsdóttir S., Liotta D. (2015). IMAGE: the EU Funded Research Project Integrated Methods for Advanced Geothermal Exploration. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015

Wong, Th.E., Batjes, D.A.J. en De Jager, J. (2007). Geology of the Netherlands.

Yang H., Xue F., Pan W., Chen L. Yang P., Tong Y., Zhao C. (2010). Seismic description of karst topography and caves of Ordovician carbonate reservoirs, Lungu area, Tarim Basin, West China. SEG Denver 2010 Annual Meeting, 5p.

6.2 Relevante rapporten

Bavaria: IF Technology, ECN. Niet-publiek rapport

FrieslandCampina / Royal A-ware: TNO (2015). Ultra-diepe geothermie in Nederland | Eindrapport Sector Innovation Strategy. 136p.

Hoogeveen: IF Technology, KEMA (2012). Geothermal energy at Hoogeveen. Feasibility study. 144p.

Parenco: IF Technology (2012). Geothermal Energy at Norske Skog Parenco Feasibility study. 26.600/61122/MaG, 101p

Schiphol: TNO, IF-Technology (2013). Electriciteitswinning uit geothermie Schiphol: Voorstudie naar haalbaarheid. TNO 2013 R11079, 74p.

Smurfit Kappa: Arcadis (-). Haalbaarheidsstudie geothermie Locatie Coevorden – Smurfit Kappa Solid Board.

NOPG: TNO en partners (2010). Voorstel Nationaal Onderzoeksprogramma Geothermie.

IF Technology, ECN (2014). Kansen voor diepe geothermie bij industriële processen. 55p.

IF Technology, TNO, Ecofys (2011). Diepe geothermie 2050. Een visie voor 20% duurzame energie voor Nederland. 87p.

Moeck 2014: Catalog of geothermal play types based on geologic controls, Renewable and Sustainable Energy Reviews 37, p 867-882

Van Hulten, F.F.N. (2012). Devonian-carboniferous carbonate platform systems of the Netherlands. Geologica Belgica 2012 15/4 p284-296.

Van Wees JD, Boxem T, Calcagno P, Dezayes C, Lacasse C, Manzella A. 2013. A Methodology for Resource assessment and application to core countries. In: GEOELEC project, deliverable 2.1; Available online from <http://www.geoelec.eu>

