



EINDRAPPORT | TNO 2015 R11617
ULTRA-DIEPE GEOTHERMIE IN NEDERLAND

Branche Innovatie Agenda

TNO innovation
for life

Auteurs:
Thijs Boxem
Hans Veldkamp
Stefan Carpentier
Tanya Goldberg
Lindsay Lipsey

TITELPAGINA

Aantal pagina's	167 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Dutch Association of Geothermal Operators Sponsored by A-Ware, FrieslandCampina & Provinsje Fryslân
Partner in uitvoering	Ekwadraat
Projectnaam	BIA Friesland Diep
Projectnummer	060.14130
Rapportnummer	TNO 2015 R11617
Datum	11 december 2016
Auteur(s)	Thijs Boxem, Hans Veldkamp, Stefan Carpentier, Tanya Goldberg & Lindsay Lipsey

DISCLAIMER

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.

© 2015 TNO

INHOUDSOPGAVE

1. Samenvatting (NL)
2. Summary (ENG)
3. Aanleiding
4. Leeswijzer
5. Introductie
 - a) Onderzoeksvraag & Doelstelling
 - b) Aanpak
 - c) Samenwerkingsverband
6. Belang van kennis van de ondergrond
 - a) Hoge Temperatuur
 - b) Voldoende Debiet
 - c) Lage boorkosten
7. Verkenning onderzoeksrichtingen
 - a) Seismisch
 - b) Petrografisch
 - c) Modelleren
8. Stimuleringstechnieken
9. Risicoreductie
10. Kansen Europese Onderzoeksprogramma's
11. Conclusies
12. Vervolg
13. Erratum: Niet technische aspecten
14. Verklarende woordenlijst
15. Bronvermelding
16. Bijlage: Overzichtstabel Stimuleringstechnieken

SAMENVATTING (NL)

Een groot deel van onze primaire energie consumptie (volgens de RVO bijna 40%) is de vraag naar warmte, wat investeren in een duurzame en degelijke bron van warmte doet lonen. Geothermische energie (oftewel aardwarmte), die vrijwel het hele jaar, duurzame warmte levert, kan een eminente rol vervullen in de duurzame energiemix van de toekomst.

Daarnaast is geothermie is een duurzame technologie met de laagste SDE+ subsidie per geproduceerde kWh. Deze kansrijke technologie is nu – op één project na – ontwikkeld in de glastuinbouw voor dieptes tot 3 kilometer, wat overeen komt met temperaturen tot zo'n 100°C.

Op dit moment wordt er door bedrijven met een hoge warmtevraag (met name heet water) nog zeer veel gas gebruikt, met de daarbij horende hoge en op de lange termijn onvoorspelbare kosten. De daaruit voortvloeiende innovatiebehoefte richt zich dan ook op het terugbrengen van de operationele kosten door de overstap naar geothermie. In tegenstelling tot de volatiele prijs van gas, is

geothermie voorspelbaar en heeft het een zeer hoge leveringszekerheid.

Voor een, op de lange termijn, internationaal competitieve industrie met hoge warmtevraag is het noodzakelijk om te innoveren en kosteneffectief te worden, zodat de concurrentiepositie behouden en versterkt kan worden. Met ultra diepe geothermie die lokaal beschikbaar is op 5 tot 7 km, kan er – letterlijk en figuurlijk – een unieke kans aangeboord worden.

Hoewel er in Nederland al relatief veel ervaring is met diepe geothermie (tot ca. 3 à 4 km diepte), moeten er nog innovatieslagen gemaakt worden naar de diepere en complexere lagen (ultra-diep). Bij exploratie tot 3 à 4 km diepte is, dankzij eerdere exploratie inspanningen uit zowel de olie- en gasindustrie als de geothermie, de geologie relatief goed bekend en zijn knelpunten vooral gerelateerd aan financiering. Mogelijke innovatie valt daar, vanuit het oogpunt van de ondergrond, te behalen door het stimuleren van putten en het beter en breder benutten van de warmte. Bij diepere exploratie vormt de geologische kennis een van de belangrijkste knelpunten – hoe ziet de ondergrond eruit, is het mogelijk pre-drill te benodigde

kennis te verbeteren, waar kan vanuit theoretisch oogpunt het beste geboord worden.

Naast de investeringskosten aan de voorkant van een dergelijk project, zijn ook de risico's en onzekerheden van een innovatieve onderneming van die omvang groot. Nader onderzoek om de kapitaalkosten te reduceren, de onzekerheden te verkleinen en de risico's te dekken, brengt ultra-diepe geothermie dichterbij.

Dit onderzoek heeft zich gericht op het verkennen van het belang van de ondergrond ter verbetering van de economische haalbaarheid van ultra-diepe geothermie, het vergroten van het geologisch inzicht in potentiële reservoirs met verschillende technieken en het opstellen van een technische roadmap die leidt tot reductie van risico voor een eerste diep doublet (plus een groot aantal opvolgers). Om dit zo concreet mogelijk te maken en oplossingsrichtingen te valideren is dit gedaan vanuit een zorgvuldig gekozen testcase in noord Nederland.

Voor ultra-diepe geothermie voor industrie met een hoge warmtevraag richten we ons op st(r)oom willen uit de ondergrond, met een temperatuur hoger dan 180 °C, en een flow v

van 150 – 300 m³/uur uit de ondergrond om daarmee voldoende capaciteit te verkrijgen en willen we dat de investeringen aan de voorkant van een geothermie-installatie zo laag mogelijk zijn. Vertaald naar de ondergrondse component betekent dat het vinden van een optimum tussen hoge temperatuur, voldoende flow en lage boorkosten.

Nederland kent een rijke historie van exploratie van de ondergrond, waarin er op het land alleen al bijna 3000 boringen zijn gezet. In een boorgat worden veel metingen verricht, waaronder – maar helaas lang niet altijd – de temperatuur. Gebaseerd op al deze temperatuurmetingen, kun je stellen dat het per kilometer in de diepte zo'n 30°C warmer wordt; de zogenaamde geothermische gradiënt. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat op gemeten data een grote onnauwkeurigheid zit, omdat temperatuurmetingen altijd een bijproduct zijn van andere metingen in het boorgat.

Echter zijn er ook afwijkingen t.o.v. de afgeleide gemiddelde geothermische gradiënt. Een voorbeeld hiervan is de temperatuur anomalie geobserveerd in de Luttelgeest boring. Een anomalie die – uitgaande van de kennis die we nu hebben van de ondergrond – niet te verklaren aan de hand van historische

artefacten (bijv. de intrusie van magmatisch gesteente) of het warmtegeleidende vermogen van de gesteentes. Een andere verklaring zou zijn het voorkomen van convectie in de ultra-diepe ondergrond, wat uit studie van TNO mogelijk blijkt in de kalken van het carbonaatplatformen (van Dinantien ouderdom) bij een minimale doorlatendheid van 30mD.

Indien er daadwerkelijk convectie plaatsvindt in het Dinantien, dan kan dit een grote rol spelen in lokale temperatuurverschillen. Eerste modellen laten zien dat de temperatuur op dezelfde diepte tot zo'n 30°C kan variëren. Redenerende naar de gemiddelde geothermische gradiënt in Nederland, is dit een equivalent van 1 kilometer boren.

Voorwaarde voor convectie is de aanwezigheid van natuurlijke doorlatendheid in het gesteente in de ultra-diepe ondergrond. Om hier een eerste indruk van te krijgen, is gekeken naar verschillende bronnen. Naar de logs die de metingen in het boorgat weergeven, naar metingen aan gesteentemonsters en indirecte indicatoren op microscopische schaal.

De logs geven een schat aan informatie over een groter

diepteinterval. Door de metingen met elkaar te combineren, is er een eerste inzicht te krijgen in de poreuze intervallen (IF Technologie, 2012). Voor de Luttelgeestboring zijn er met die techniek meerdere intervallen te zien met verhoogde porositeit. Ook staan er bijzonderheden in opgenomen en is er op meerdere dieptes rapportage van zgn. 'total losses', wat alleen optreedt bij hogere porositeiten. Deze gegevens uit de logs wijzen op een doorlatendheid variërend van 10 tot bijna 600 mD.

De porositeit kan ook gemeten worden aan gesteentemonsters. In deze gevallen meet je voornamelijk de doorlatendheid van de matrix (ruimte tussen de korrels van het gesteente), oftewel de primaire porositeit. Bij deze metingen varieert de permeabiliteit tussen de 0,2 en bijna 10 mD.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de primaire permeabiliteit onvoldoende is om convectie te ondersteunen en dat het dus louter kan bestaan door secundair gevormde permeabiliteit. Om grip te krijgen op condities van afzetting en de processen die daarna plaats hebben gehad, kan er gekeken worden naar slijpplaatjes. De slijpplaatjes van de Luttelgeestboring laten indicaties zien van karst, breuken en dolomitatie.

Er is dus een temperatuuranomalie geobserveerd in de rand van het carbonaatplafom die aangeboord is in Luttelgeest. Er zijn hier indicaties van verhoogde (secundaire) permeabiliteit die convectie zouden kunnen ondersteunen. Eveneens zijn de randen van een carbonaatplafom getypeerd door verbreukingen. Daarop voortbordurend lijkt het cruciaal om te weten waar de (randen van de) platformen zich bevinden.

Inzicht in de structuur van de diepe ondergrond wordt verkregen door middel van seismiek. Een techniek die al zeer veel is toegepast in de olie- en gasindustrie, maar daardoor eveneens is geijkt op de ondergrond rond de 3 kilometer diepte, waar de meeste olie- en gasvoorkomens zijn. Om het beeld van de ultra-diepe ondergrond te verbeteren moet de seismiek opnieuw geprocest worden. Door slimme en innovatieve processingtechnieken en filters, kan de ruis op grote dieptes (> 5km) verminderd worden. In dit samenwerkingsverband is aangetoond dat dit mogelijk is met vrijelijk beschikbare seismiek (zgn. 'post-stacked data'), maar kan er nog meer behaald worden met de originele, ruwe data (zgn. 'pre-stacked data' of 'field tapes'). Deze processingtechnieken worden verder ontwikkeld en toegepast in het Europese samenwerkingsverband onder de naam 'IMAGE' (EU FP7 project naar geïntegreerde methoden

voor geavanceerde geothermische exploratie - <http://www.image-fp7.eu/Pages/default.aspx>) waarvan TNO de coördinator is. Er is op dit moment al voldoende verbetering om te concluderen dat het mogelijk is om bestaande seismiek te verbeteren, hierdoor een betere interpretatie te maken en hierdoor het exploratierisico te verkleinen.

Als we dan weten welke domeinen mogelijk interessant zijn, moet er ook nog naartoe geboord worden. Let er daarbij op dat het boren van de ultra-diepe ondergrond ook specifieke, hoogwaardige eisen stelt aan de materialen en technieken. Het boren van een boorput is een kostbare aangelegenheid en bepaalde voor een aanzienlijk deel de investeringskosten aan de voorkant. De kosten van het boren worden bepaald door het aantal dagen dat er nodig is om de diepte te bereiken. Uit historische data (NAM, 2001) blijkt dat er voor een boring naar 5 – 7 kilometer diepte doorgaans 200 tot 300 dagen nodig zijn, wat overeenkomt met een gemiddelde investering tussen de 15 en 35 miljoen Euro per put. Let er daarbij op dat er in het verleden moeilijkheden waren met het doorboren van de Zeeland Formatie, in verband met de verkiezeling van het gesteente.

Op het moment dat de juiste formatie aangeboord is en er voldoende hoge temperatuur is, dan is het zaak om te zorgen voor voldoende debiet (flow) om de gewenste geothermische capaciteit te bereiken. Hoewel er indicaties zijn van verhoogde permeabiliteit die mogelijke convectie kan ondersteunen, is dit onvoldoende om de gestelde debieten van 150 tot 300 m³/uur te behalen. Ter vergroting van de doorlatendheid, zonder ongewenste neveneffecten, kan gekeken worden naar innovatieve soft stimulation technieken. Een inventarisatie van deze technieken is gemaakt, maar gelet de uitzonderlijke omstandigheden waarin geopereerd dient te worden, is op het eerste oog alleen hydraulic mode-1 (of tensile) stimulation (kort: HM1S) toegepast worden (mogelijk in combinatie met acidization, maar dat vergt verder en nauwkeuriger onderzoek, gestoeld op kennis van de lokale geologie). Bij HM1S wordt het gesteente geopend en is er geen tot nauwelijks kans op geïnduceerde seismiciteit.

Indien er door middel van HM1S aangetapt kan worden op de bestaande doorlatendheid, kan er met een minimale configuratie voldoende doorlatendheid gecreëerd worden, wat aanzienlijke kostenbesparingen met zich meebrengt. Het volledig creëren van de benodigde doorlatendheid vraagt namelijk om zo'n 10 tot 20

tensile fracs achter elkaar met een schatting van kosten tussen de 20 en 50 miljoen Euro. Let er hierbij nadrukkelijk op dat dit een techniek is die nog in ontwikkeling is en dat er wereldwijd nog geen ervaring is met het creëren van de beoogde debieten op vergelijkbare dieptes.

Het lijkt er dus op dat de platformen van Dinantien ouderdom in de ultra-diepe ondergrond een mogelijk eerste interessante kandidaat is voor de 'next generation geothermal' in Nederland door de indicaties van aanwezigheid van secundaire doorlatendheid die convectie mogelijk maakt en hogere temperaturen op geringere diepte oplevert. Er zijn technieken beschikbaar en op moment van publicatie in ontwikkeling die de inzichten in de ultra-diepe ondergrond kunnen vergroten, waaronder de ontwikkeling van innovatieve seismische processing technieken en filters, zodat de platformen beter in kaart gebracht kunnen worden en het exploratierisico verkleind kan worden. Eveneens wordt er in Europees verband onderzoek gedaan naar stimuleringstechnieken die geen (merk- en meetbare) ongewenste bijeffecten vertonen, maar wel in staat zijn om het gewenste debiet te bewerkstelligen.

Door middel van onderzoek naar risico- en onzekerheidsverkleining, capaciteitsvergroting en innovatieve technieken, kan de onzekerheids- en risicomarge op de business case kleiner worden. Investerings op onderzoek kunnen kleiner worden wanneer dit in een samenwerkingsverband plaatsvindt. Eveneens kan de kwaliteit van onderzoek groter zijn door strategische keuzes van partners en kan het aanhaken op lopende onderzoeksprogramma's de financieringslast verlicht worden.

Deze studie een eerste verkenning en zijn we er nog niet. Voor significante vergroting van de kennis, zal er een onderzoeksboring moeten komen die als ijkpunt en input kan dienen voor de huidige concepten en modellen. Om tot een onderzoeksboring te komen moeten er ook nog stappen genomen worden, waaronder maar niet uitsluitend:

1. Een verbeterde interpretatie van de Dinantien kalken gebaseerd op nieuw geproceste seismiek
 - a. Een lange transect (2D lijn) die de bekende punten (LTG-01 en UTM-02) met elkaar verbindt
 - b. Kartering van de boven- en onderkant van de Banjaardgroep

- c. Inzichten verkrijgen in de uit seismiek af te leiden eigenschappen
2. Een verbeterd inzicht en zekerheid in de porositeits-/permeabiliteitsverdeling
 - a. Onderzoek naar het afzettingsmilieu
 - b. Onderzoek naar diagenetische processen
3. Met behulp van de verbeterde inzichten uit de stappen hierboven, het opnieuw modelleren van het temperatuurmodel, waarbij de effecten van convectie meegenomen wordt.
 - a. Inzicht verkrijgen in de potentie van ultra-diepe geothermie in Nederland
 - b. Selectie van een geschikte locatie voor een eerste onderzoeks- of demonstratieboring
4. Verkennen of het mogelijk is om de beoogde locatie te combineren met een reeds bestaande, verlaten boorput?

De technische en financiële risico's voor eerste ultra-diepe geothermische boring zijn groot, maar de risico's kunnen aanzienlijk verminderd worden middels een exploratieboring. Maar een exploratieboring betekent wel – gelet de investering – dat deze gebruikt moet kunnen worden voor exploitatie. De

financiering van een onderzoeksboring bepaald karakter van de boring.

Let er daarbij nog op dat een project met een dermate hoog innovatief karakter in de samenleving, de uitdagingen niet louter technisch zijn. Bij het vormgeven en starten van een innovatief project met een (mogelijk) grote impact op haar omgeving, is het belangrijk om a) bewust te zijn van en b) vroegtijdig aandacht te besteden aan de omgeving van de innovatie.

SUMMARY

A large part of our primary energy consumption (according to RVO almost 40%) is the demand for heat, which makes it worthwhile to invest in a sustainable and reliable source of heat. Geothermal energy, which delivers almost year round renewable heat, could play an important role in the sustainable energy mix of the future.

In addition, geothermal energy is a sustainable technology with the lowest SDE + subsidy per kWh produced. This promising technology is now – apart from one project – developed in horticulture for depths up to 3 kilometers, which corresponds to temperatures of about 100 °C.

At present companies with high energy demand (especially hot water) still use a lot of gas, with the associated high and unpredictable costs in the long run. The resulting need for innovation therefore focuses on reducing operating costs by switching to geothermal energy. In contrast to the volatile price of gas, geothermal energy is predictable, and it has a very high security of supply.

For a, on the long-term, internationally competitive industry with high heat requirement, it is necessary to innovate and to be cost effective in order to stay competitive and even strengthen their position. With ultra-deep geothermal energy, which is locally available at depths of 5 to 7 km, there is a unique opportunity for industry.

Although the Netherlands has relatively extensive experience with deep geothermal (up to approximately 3 to 4 km depth), innovative steps remain to be made towards deeper and more complex layers (ultra-deep). In exploration to 3 to 4 km depth, thanks to previous exploration efforts from both the oil and gas industry as the geothermal, the geology is relatively well known and are the challenges mainly related to financing the projects. When exploring the ultra-deep, the geological knowledge is one of the most important challenges; how does the surface look like, is it possible to improve the pre-drill knowledge, and theoretically which location is most suitable to drill the first ultra-deep well?

Besides the upfront investments of such an innovative project, also the risks and uncertainties of a project of that size are significant. Further research to reduce the cost of capital, reduce uncertainties and to cover the risks, brings ultra-deep geothermal closer.

This research has focused on exploring the importance of the subsurface to improve the economic feasibility of ultra-deep geothermal, increasing the geological understanding of potential reservoirs with different techniques and preparing a technical roadmap that leads to reduction of risk for a first ultra-deep doublet (plus numerous successors). To make this as concrete as possible and validate solutions, the gained knowledge is validated on a carefully chosen test case in northern Netherlands.

For ultra-deep geothermal energy, for industry with high heat demand, we focus on steam and/or electricity from the subsurface with a temperature higher than 180°C, and flow of 150-300 m³/h to provide sufficient capacity and make the upfront investments for a geothermal installation be as low as possible. Translated to the underground component this means finding an optimum balance between high temperature, sufficient flow and

low drilling costs.

The Netherlands have an extensive history of exploration of the subsurface, with onshore nearly 3,000 wells have been drilled. In a borehole many measurements are carried out, including - but, unfortunately, not always – temperature measurements. Based on these temperature measurements, the geothermal gradient is approximately 30°C/km. It should, however be noted that measured temperature data has a large margin of error, because temperature measurements are (almost) always a by-product of other measurements in the borehole.

However, there are deviations from the derived average geothermal gradient. An example of this is the temperature anomaly observed in the Luttelgeest well. An anomaly that - based on present-day knowledge of the subsurface - cannot be explained on the basis of historical artifacts (e.g. intrusion of igneous rock) or the thermal conductivity of the rocks. Another explanation would be the occurrence of convection in the ultra-deep underground. A study from TNO investigated the minimal required porosity to sustain convection in the carbonate platform of Dinantien age. Convection would be possible with a minimum permeability of 30mD.

If actual convection occurs in the Dinantien, this can play a major role in these local temperature differences. First models show that the temperature at the same depth can vary up to about 30°C. In comparison to the average geothermal gradient in the Netherlands, this is the equivalent of one kilometer drilling (and the associated costs with drilling shallower/deeper).

The requirement for the presence of natural convection is sufficient (>30mD) permeability in the rock in the ultra-deep subsurface. To get a first indication of the permeability, various sources are investigated. The logs that display the measurements taken in the borehole, measurements on rock samples and indirect indicators on a microscopic scale.

The logs provide a wealth of information over a larger depth interval. The measurements can be combined with each other to get a first insight into the porous intervals (IF Technology, 2012). By use of this technique, there are multiple intervals with increased porosity in the Luttelgeest well. Remarks on the logs show that there at several depth intervals with so-called "total losses", which only occur at higher permeability's. Data from the logs indicate a permeability ranging from 10 to almost 600 mD.

The porosity/permeability can also be measured on rock

samples. In these cases, the permeability of the matrix (space between the grains of the rock), in other words the primary porosity, is measured. In these measurements, the permeability varies between 0.2 and nearly 10 mD.

From this it can be concluded that the primary permeability is insufficient to support convection, and that it can therefore exist solely by secondarily formed permeability. To get a grip on the conditions of deposition and the processes that took place afterwards, thin sections can be investigated. The thin sections of the Luttelgeest well show indications of karst, fractures and dolomitization.

Thus, there is a temperature anomaly observed in the margins of the carbonate platform which is reached in the Luttelgeest well. There are indications of increased (secondary) permeability that could support convection. Also, the margins of the carbonate platform are typically characterized by fractures. Concluding; it appears crucial to know where the (margins) of the platforms are located.

Insight in the structure of the ultra-deep subsurface is obtained by means of seismic data. A technique that has been most widely used in the oil and gas industry, and which is targeted to the subsurface around three kilometers depth, where most oil and gas shows are. To improve the image of the ultra-deep subsurface, seismic data must be re-processed. With smart and innovative processing techniques and filters, the noise at great depths (> 5km) can be reduced. In this project it is demonstrated that this is possible with free, available seismic data (so-called. 'Post-stacked data) from NLOG, but can be further achieved with the original raw data (so-called 'pre-stacked data' or 'field tapes'). These processing techniques are developed and applied in the European partnership named "IMAGE" (EU FP7 project for integrated methods for advanced geothermal exploration - www.image-fp7.eu) of which TNO is the coordinator. There is currently sufficient improvement to conclude that it is possible to improve existing seismic, thus making a better interpretation and thereby reduce the exploration risk.

If we know which targets in the subsurface might be interesting, these also have to be drilled. Please note that drilling to the ultra-deep subsurface requires special attention for materials and techniques, considering that 'high pressure, high temperature'

are targeted. The drilling of a well is costly, and accounts for a considerable part of the upfront investments. The cost of drilling can be estimated by the number of days that it takes to reach the depth. From historical data (NAM, 2001) a well to a depth of 5 - 7 km requires usually 200 to 300 days, which corresponds to an average investment between 15 and 35 million Euros per well. Take care that there were difficulties in the past with penetrating of the Zeeland Formation, due to silicification of the rock.

At the moment that the correct formation is tapped, and there is a sufficiently high temperature, it is important to ensure there is sufficient flow in order to achieve the required geothermal capacity. Although there are indications of increased permeability that can support convection, this is insufficient to achieve the required flow rates of 150 to 300 m³/hour. In order to increase the permeability, without undesirable side effects, one can look for innovative soft stimulation techniques. An inventory of these techniques have been made, but given the exceptional circumstances, only hydraulic mode-1 (or tensile) stimulation (short HM1S) is at a first glance suitable (possibly in combination with acidization, but that requires further and closer examination, based on knowledge of the local geology). With HM1S the rock is opened and there is no - or hardly - any chance of induced seismicity.

If - by means of HM1S – you can link onto existing permeability, there may be sufficient permeability to be created with a small amount of frac-stages, resulting in significant cost reductions. For the creation of the required permeability for a completely impermeable formation, about 10 to 20 tensile fracs are required, with an estimated cost of between 20 and 50 million Euro. Please note that this is a technique that is still in development and that globally there is no experience yet with creating the desired flow rates at similar depths.

So it seems that the platforms of Dinatian age in the ultra-deep subsurface is a possible first interesting candidate for the next generation geothermal in the Netherlands, based on by the indications of the presence of secondary permeability that allows convection and higher temperatures at shallower depths. There are techniques available, and at time of publication in development, that increases our understanding of the ultra-deep subsurface, including the development of innovative seismic processing techniques and filters so that the platforms can be better mapped and the exploration risk can be reduced. Research also is being done at European level to investigate and develop stimulation techniques which have no (sensible and measurable) undesirable side effects, but are able to achieve the

desired output.

Through research into risk and uncertainty reduction, capacity and innovative technologies, the uncertainty and risk margins on the business case can be reduced. Investment in research can be smaller when it occurs in a partnership. Also increasing the quality can be done by strategic choices of partners and connecting to ongoing research programs.

This study is a first reconnaissance and we are not there yet. For a significant increase of knowledge, there must be an exploration/research well which can act as reference and input for the current concepts and models. In order to get there it is important to take the following, but not limiting, steps:

1. An improved interpretation of the Dinantien carbonates based on newly processed seismic
 - a. A long transect (2D line) connecting the known points (LTG-01 and UTM-02)
 - b. Mapping of the top and bottom of the Banjaard Group
 - c. Gain insights into the characteristics of the rocks from seismic properties

2. An improved understanding and certainty in the porosity/permeability distribution
 - a. Research on the depositional environment
 - b. Research on diagenetic processes
3. With the aid of the improved insights from the steps above, the re-modeling of the temperature model, wherein the effects of convection is taken into account.
 - a. To understand the potential of ultra-deep geothermal in Netherlands
 - b. Selection of a suitable location for a first research or demonstration well
4. Explore the possibility to combine the intended location with an existing, abandoned well?

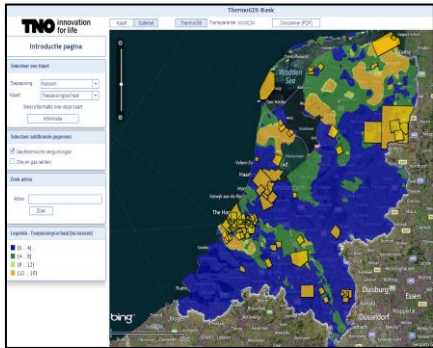
innovative project with a (potentially) large impact on its surroundings, it is important to a) be aware of and b) to pay early attention to the surroundings of the innovation.

The technical and financial risks for first ultra-deep geothermal well are large, but can be significantly reduced through an exploration well. But an exploration well does mean - given the investment - that it should potentially be used for exploitation. The funding of a research well defines the character of the well.

Note that a such an innovative project in society, the challenges are not purely technical. In the design and launch of an

HOOFDRAPPORTAGE

AANLEIDING



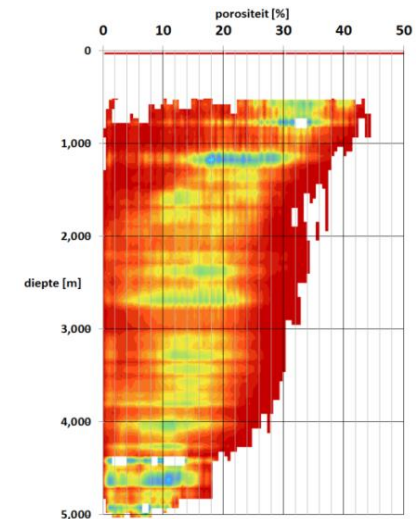
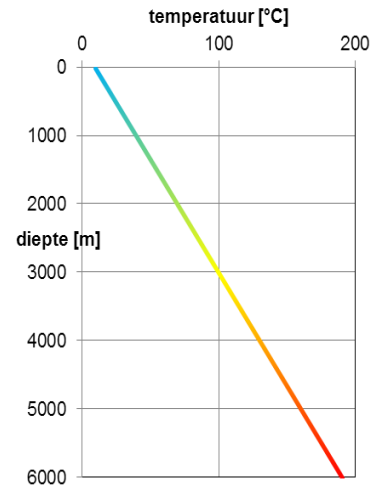
Direct gebruik van aardwarmte is een feit in NL

Kunnen we een groter aandeel van de ondergrond geschikt maken?

*Dieper?
Andere formaties?
Betere BC?*

Kunnen we opbrengsten huidige en nieuwe aardwarmte projecten vergroten?

*Grotere flow?
Damage prevention/control?
Betere BC?*



Kunnen we de warmte beter, breder en efficiënter gebruiken?

*Cascadering?
Warmteopslag?
Betere BC?*

NEXT GENERATION GEOTHERMAL

*Supercritical steam
Elektriciteitsopwekking
Betere BC?*

In verschillende bedrijfstakken is **behoefte aan vergroening en daarbij hun concurrentiepositie te versterken**. Bedrijven met een grote energievraag (elektriciteit of warmte) verkennen derhalve de mogelijkheden om hogere temperaturen in de diepere ondergrond aan te tappen: het verkennen van de mogelijkheden van de 'Next Generation Geothermal'.

Hypothetisch is er een grote warmtepotentie in de ultra-diepe ondergrond, maar van de ondergrond op 4 km diepte (en dieper) is relatief weinig bekend. Huidige doubletten tot ongeveer 3 km diepte produceren warm water tot ongeveer 100 °C

PERSPECTIEF VANUIT DE INDUSTRIE: **VERGROENEN MET KOSTENREDUCTIE**

Vergroening

- › Deze studie verkent de mogelijkheden van de ultra-diepe geothermie ter vergroening van de industrie.

Onzekerheden

- › Typisch kenmerkt de ontwikkeling van een geothermieproject zich rondom de onzekerheden in de ondergrond. Deze onzekerheid zorgt voor moeilijke financiering en hoge rentes.

Kostenreductie

- › Daarnaast betekent kostenreductie ook de kosten van kapitaal (capex) te verlagen, waarin de ondergrond wellicht een rol zou kunnen vervullen

Maatschappelijk speelveld

- › De Nederlandse overheid heeft een duurzaamheidsdoelstelling en gasproductie uit het Slochteren gasveld loopt terug; wellicht een kans voor ultra-diepe geothermie om dit gat te vullen en bij te dragen aan de verduurzaming van de Nederlandse energiemix

Innovatie

- › Cruciaal is het vergroten van de kennis en het verkleinen van de onzekerheid. De grootste slag kan hiermee gemaakt worden middels een nationale researchput. De keuze voor de nationale researchput hangt van een aantal factoren af, die in dit onderzoek naar voren gebracht zullen worden.

LEESWIJZER

Deze rapportage is een verzameling en samenvatting van alle uitgevoerde werkzaamheden ter verkenning van de mogelijkheden voor ultra-diepe geothermie. Hierbij richten we ons op lezers zonder geologische achtergrond. Het eerste deel van deze rapportage zal derhalve inzicht geven in het belang van geologie voor de verkenning van de potentie van geothermie, zonder daarbij afbreuk te doen aan de complexiteit. Vanuit die basis komen een aantal lacunes en uitdagingen voort.

In het tweede deel van dit rapport zal er aandacht besteed worden aan mogelijke oplossingsrichtingen en technieken/ontwikkelingen die mogelijk de business case voor een ultra-diep geothermie project vergroten.

De opgedane inzichten worden in het derde deel vertaald naar de eerste onderzoek stappen die gezet moeten worden naar een verbeterd inzicht die de basis moeten vormen voor beslissingen en/of locatieselectie voor vervolgonwikkelingen.

Op verzoek van de Provincie Friesland wordt en ook kort stil gestaan bij de niet technische aspecten van de introductie van een innovatie in de samenleving. Het is belangrijk hier al in een vroeg stadium van de ontwikkeling bij stil te staan.

Ter verduidelijking van gebruikte termen, kunt u achterin deze rapportage ook een verklarende woordenlijst vinden.

INTRODUCTIE

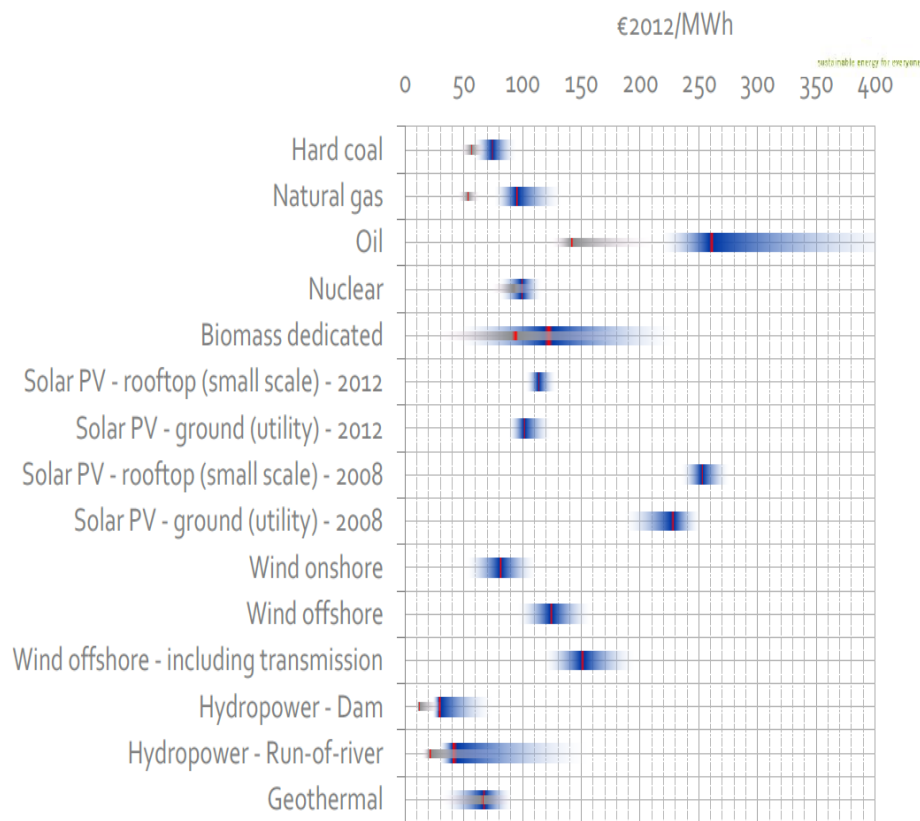
WAAROM GEOTHERMIE BIJ GROTE ENERGIEVRAAG?

- › De winning en import van aardgas staat onder druk en prijzen van gas wisselen. Derhalve is het voor veel bedrijven wenselijk hier onafhankelijk van te worden.
- › Geothermie levert een continue (~95% van de tijd) warmte en is tot op heden succesvol gebleken in Nederland tot een diepte van max 3 km.
- › Dieper is in Nederland nog nooit gekeken voor geothermische toepassingen, maar er zijn wel ervaringen met geothermie tot op dieptes van wel 5 km in het buitenland
- › Geothermie is een duurzame energiebron met de laagste kosten (EUR/MWh; zie volgende pagina).
- › Ook kan het een leemte vervullen in de mix aan duurzame energiebronnen, waar de publieke opinie momenteel tegenstand biedt tegen alternatieven en/of schaalvergroting

	Construction/installation job years/ MW	Manufacturing job years/ MW	Operations & Maintenance Jobs/ MW
Gas	1,7	1,0	0,08
Geothermal	6,8	3,9	0,4

Source: Institute for Sustainable Futures – University of Technology Sydney, Calculating Global Energy Sector Jobs: 2012 Methodology, June 2012, (for Greenpeace International, authors Rutivitz J. and Harris S.).

GEOOTHERMIE IS EEN VAN DE MEEST VOORDELIGE BRONNEN VAN ENERGIE



Blue bars: Levelized costs at realised full load hours

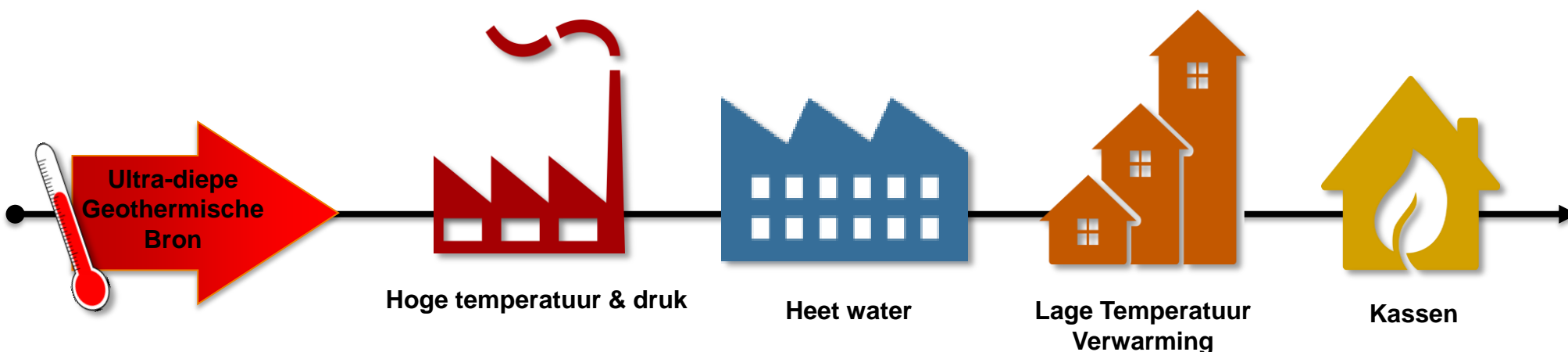
Bron: Ecofys, European Geothermal Energy Council, US EIA

Plant type	Capacity factor [%]	Total system levelized cost [US\$/MWh]
Conventional coal	85	95.6
Natural gas fired (conventional combined cycle)	87	66.3
Advanced nuclear	90	96.1
Geothermal	92	47.9
Biomass	83	102.6
Wind onshore	35	80.3
Wind offshore	37	204.1
Solar PV	25	130.0

Bron: Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013. Released January, 2013. Report of the [US Energy Information Administration](#) (EIA) of the [U.S. Department of Energy](#) (DOE).

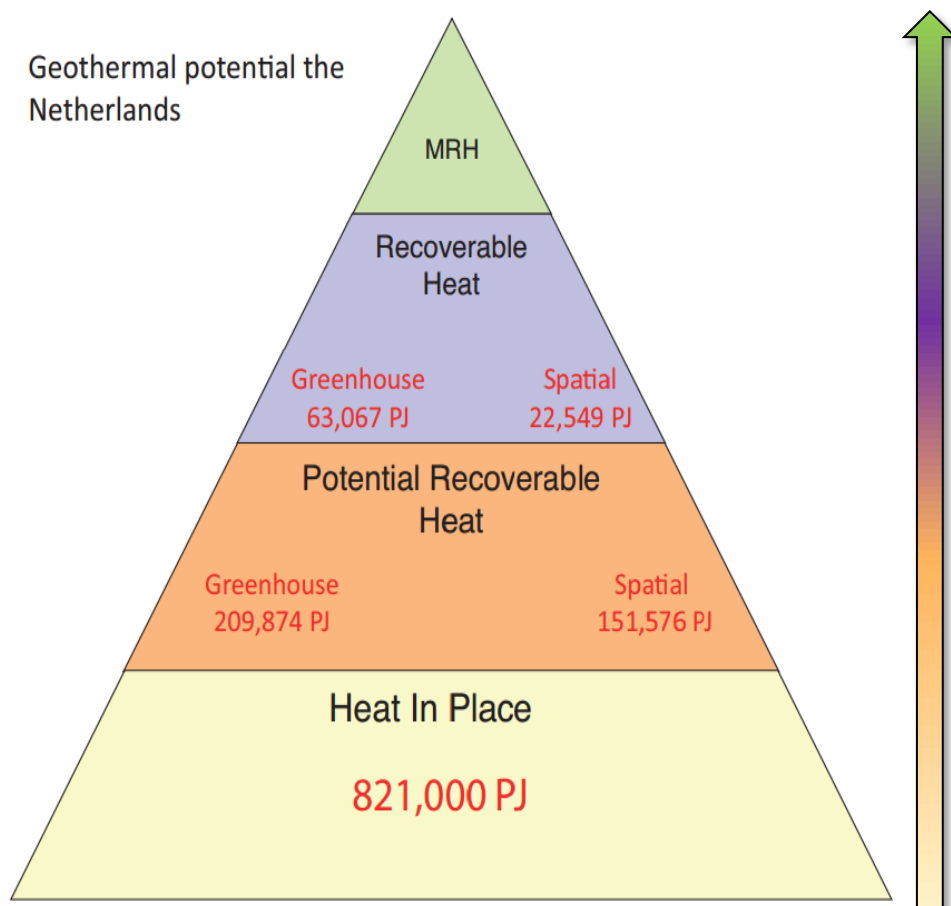
VERDER VERGROTEN VAN DE OPBRENGST PER MWH

- › Geothermie blijkt dus voordelig te zijn, maar dat wil niet zeggen dat de business case zichzelf schrijft. Om de business case ten faveure van ultra-diepe geothermie te verbeteren, kan gekeken worden naar betere uitnutting:
 - › *Gebruikers van hoogwaardige energie zijn geënt op het opwekken van elektriciteit of het directe gebruik van hete stoom in het primaire proces*
 - › *Het temperatuur na primair gebruik bevat nog veel thermische energie*
 - › *Deze thermische energie kan opnieuw in de ondergrond geïnjecteerd worden, echter blijft daarbij (al naar het oppervlakte gehaalde) thermische energie onbenut*
 - › *Het zou ook mogelijk kunnen zijn om de waarde van de 'restwarmte' te valideren, zgn. **cascaderen***



WARMTEPOTENTIE

- › De warmtepotentie van de ultra-diepe ondergrond laat zich momenteel vooral uitdrukken in de hoeveelheid warmte die zich daar bevindt: 'Heat in Place'. Dit is gebaseerd op temperatuurmetingen en andere boorgatgegevens, in combinatie met modellen van de Nederlandse ondergrond.
- › Als je gaat bekijken welke hoeveelheid van deze totale warmtepotentie technisch te winnen is, zonder daarbij stil te staan bij de economische parameters, is de 'Potential Recoverable Heat'. TNO zal zich in dit onderzoek m.n. richten op dit niveau van de pyramide.
- › Op het moment dat de economische aspecten meegewogen worden, zal blijken dat niet de volledige technische capaciteit daadwerkelijk winbaar is. De zgn. 'Recoverable Heat' is de warmtepotentie die ook economisch winbaar is. Ekwadraat zal zich richten op dit aspect van de pyramide.



Filtering pyramid showing the total heat content for RH (Recoverable Heat), PRH (Potential Recoverable Heat) and HIP (Heat in Place) – Bron: Kramers et al. 2012

DIT ONDERZOEK RICHT ZICH OP:

ONDERZOEKSVRAGEN

- › Verkennen van het belang van de ondergrond ter verbetering van de economische haalbaarheid van ultra-diepe geothermie
- › Vergroten van het geologisch inzicht in potentiële reservoirs met verschillende technieken
- › Een technische roadmap ontwikkelen die leidt tot reductie van risico voor een eerste diep doublet plus een groot aantal opvolgers

AANPAK

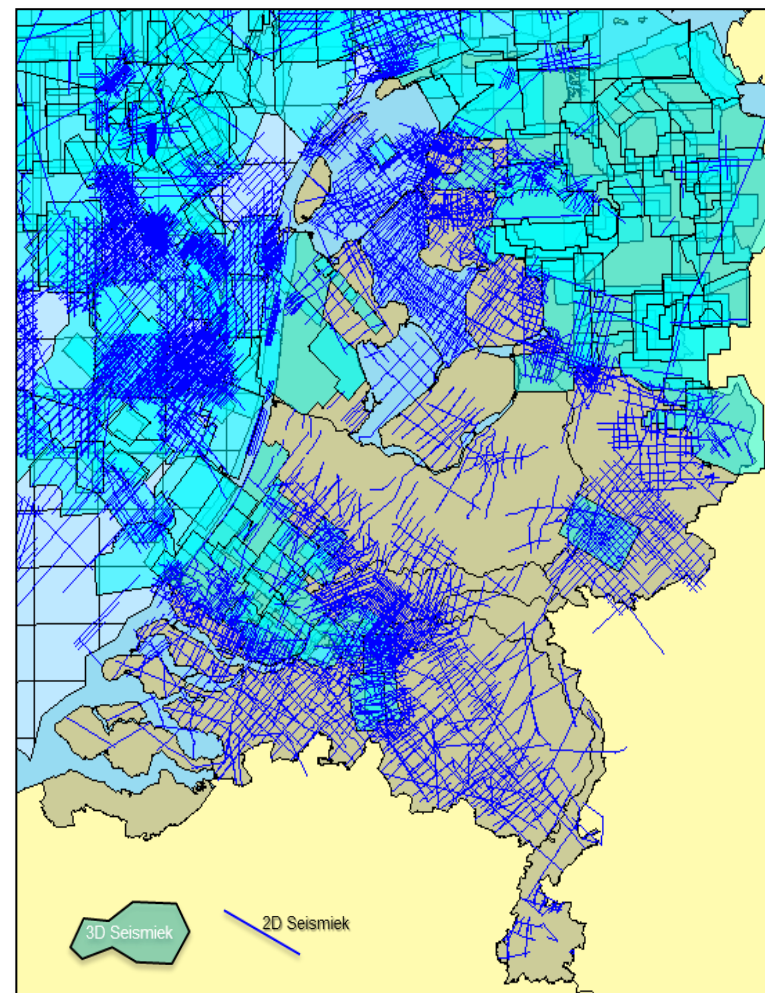
- › Inventarisatie van de beschikbare kennis
- › Verkenning onderzoeksrichtingen
- › Demonstratie technieken ter verbetering van de kennis
- › Verkenning maakbaarheid van de ondergrond
- › Verkenning verdere risico-reductie
- › Opstellen vervolgstappen

LOCATIE SELECTIE VOOR DEMONSTRATIE

Ervan uitgaande dat er een vraag bestaat om op de (middel-)lange termijn een ultra-diepe geothermieput te ontwikkelen die als eerste doel heeft een nadere verkenning (exploratie) van de ultra-diepe ondergrond, is het zaak om een geschikte locatie daarvoor te vinden.

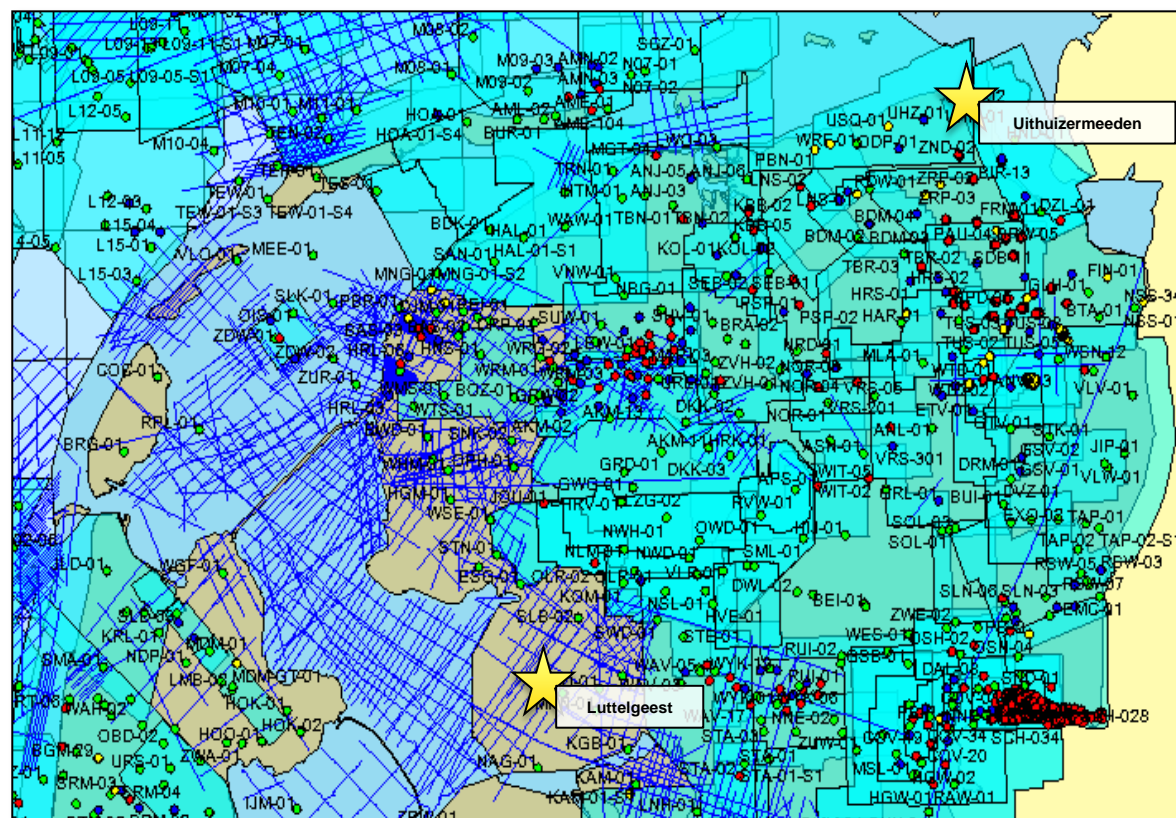
In dit project wordt er derhalve gekeken naar technieken/ontwikkelingen die de eerste verkenning ondersteunen, en wordt er inzicht vergaard in de huidige lacunes in de kennis en tekortkomingen in de technieken. Voor de verkenning van technieken, de kennislacunes en technische beperkingen, willen we de Nederlandse ondergrond als uitgangspunt nemen.

Voor de selectie van een locatie voor het testen en – in sommige gevallen – toepassen van technieken, zoeken we een locatie waarvan nu al iets bekend is, of waar zaken uit afgeleid kunnen worden. Dit betekent concreet dat we een ultra-diepe boring willen gebruiken als ijkpunt en dekking van goede seismiek om daaruit de structuur van de ondergrond af te leiden.



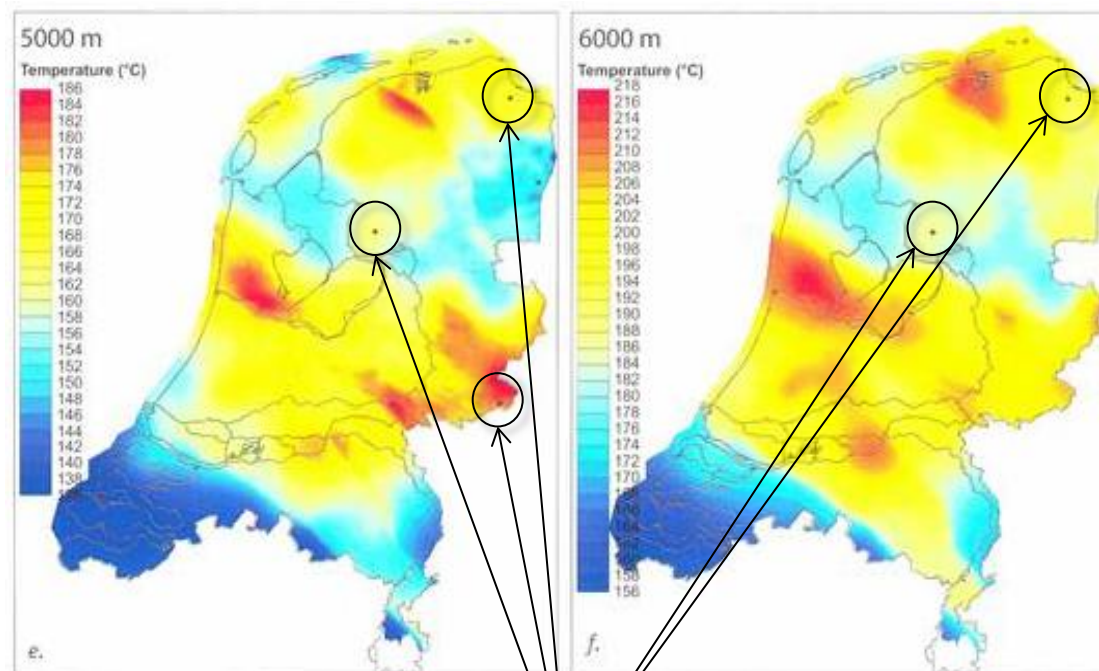
LOCATIE VOOR EEN TESTCASE

- › Gestelde voorwaarden:
 - › Is er Well Control?
 - › Is er seismische dekking van voldoende kwaliteit?
- › Well Control:
 - › 2 locaties (> 5km): LTG-01 & UHM-02
- › Seismische dekking:
 - › Zie kaart van NLOG →



WAAROM NOORD NEDERLAND OOK GUNSTIG LIJKT

- › Geologie lokaal op 3 en 5 km lijkt interessant
- › 5 geothermieprojecten in ontwikkeling
- › Grote warmtevragers aanwezig
 - › Zuivelindustrie
 - › Tuinbouw
 - › Stadsverwarming
- › Er is well-control en voldoende seismische datadekking



Boorputten die tot dieper dan 5km reiken

STARTPUNT VOOR DE VERKENNING VAN DE ULTRA DIEPE ONDERGROND

Nu we een locatie hebben geselecteerd voor de testcase – de kapstok voor deze verkennende studie – is het zaak om een startpunt te definiëren.

Daarom stellen we ons de vraag: Als we ervan uitgaan dat je met de diepte, steeds warmere lagen tegen komt en het mogelijk lijkt te zijn om de doorlatendheid te stimuleren, waarom is het dan toch belangrijk om veel (tijd en) aandacht aan de ondergrond te besteden?

Daarbij stellen we vast dat we st(r)oom willen uit de ondergrond, dus dat betekent een temperatuur hoger dan 180 °C, dat we een flow van 150 – 300 m³/uur willen uit de ondergrond om daarmee voldoende capaciteit te verkrijgen en we vaststellen dat de upfront investeringen van een geothermieinstallatie hoog zijn, dus hoe lager, hoe beter.

Dan kunnen we samenvattend stellen dat we als doelstelling hebben:

Hoge temperatuur met voldoende flow en tegen de laagste (boor-)kosten

SAMENWERKINGSVERBAND

- › Dit project is uitgevoerd in opdracht van DAGO (Dutch Association for Geothermal Operators)
- › Dit project is tot stand gekomen met dank aan het Ministerie van Economische Zaken voor de cofinanciering en Royal A-Ware, FrieslandCampina en Provinsje Fryslân voor de sponsoring
- › Dit project is een samenwerking tussen Ekwadraat als adviseur financieringskansen en business modellen en TNO Geo-Energy voor de kennisontwikkeling van de ondergrond



Ministerie van Economische Zaken



provinsje fryslân
provincie fryslân 



TNO innovation
for life

BELANG VAN KENNIS VAN DE ONDERGROND

WAAROM GEOLOGIE BELANGRIJK IS

Doel: hoge temperatuur met voldoende flow en tegen de laagste (boor-)kosten

In de volgende slides zullen we ze per onderdeel behandelen; zo hangen er per onderdeel verscheidene geologische zaken ten grondslag. Daarbij kun je denken aan de volgende voorbeelden die verderop nader worden uitgewerkt:

Hoge Temperatuur is afhankelijk van:

- Lokale Geothermische Gradiënt (toename van temperatuur met de diepte)
- Warmtetransportmodi

Voldoende Flow is afhankelijk van:

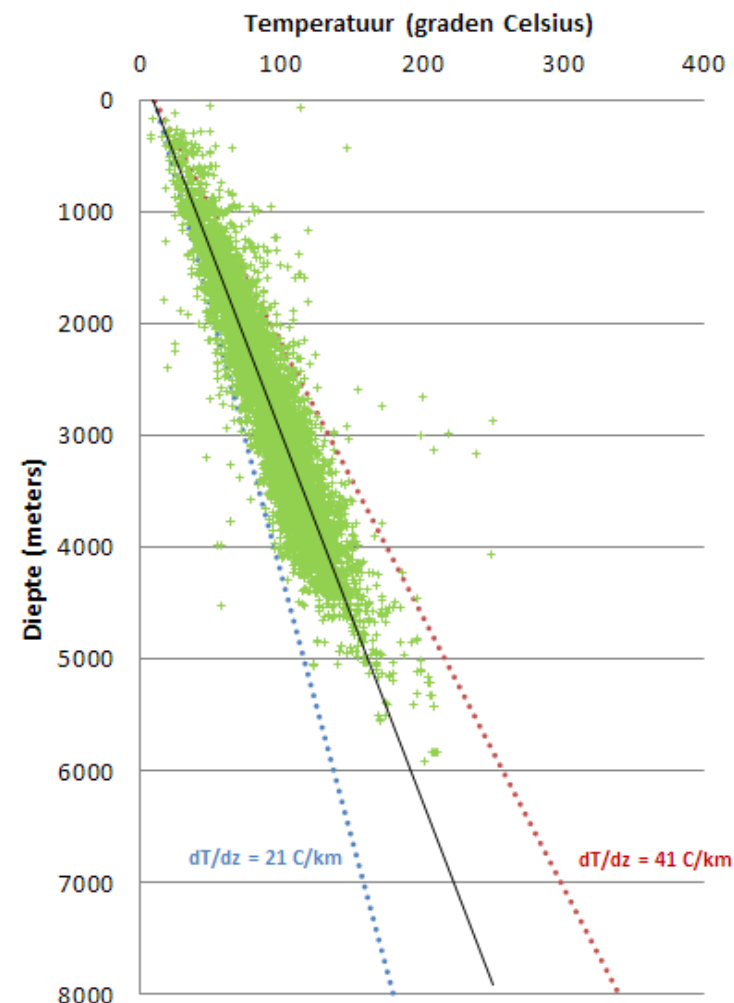
- Porositeit & Permeabiliteit (in situ)
- Secundaire doorlatendheid (natuurlijke oorzaken)
- Mogelijkheden tot stimulatie (minimal requirements)

Laagste (boor-)kosten zijn afhankelijk van:

- Diepte
- Gesteente (target- en waar doorheen geboord moet worden)
- Lengte van het boorgat
- Al dan niet stimulatie

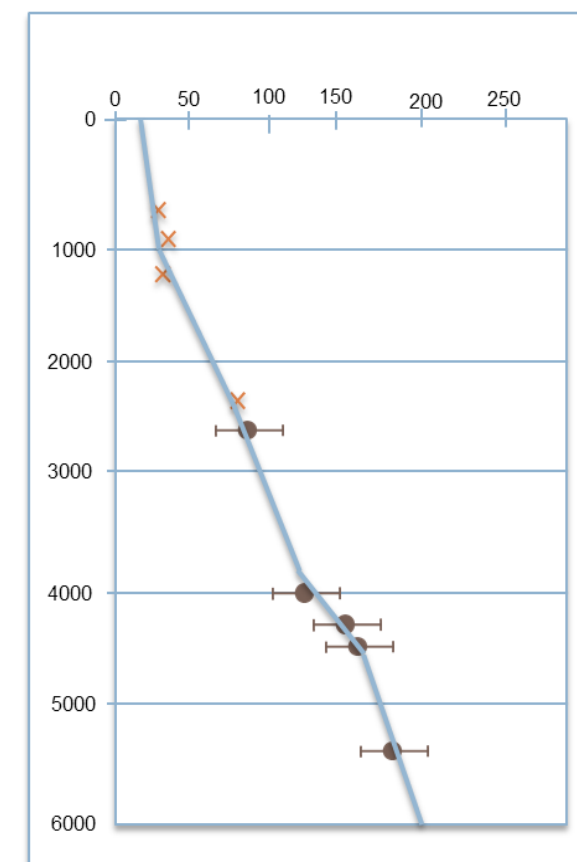
GEOOTHERMISCHE GRADIËNT IN NEDERLAND

- › Gebaseerd gemeten temperatuurdata in Nederland, is de gemiddelde geothermische gradiënt: **~30 °C/km**
- › Maar dit varieert met ± 10 °C/km
 - › Dus op 5 km diepte is dat 110 – 210°C
 - › En op 7 km diepte zelfs 150 - 250°C
- › En zelfs op de gemeten data zit een grote onzekerheid, omdat boorgat temperatuurmetingen complex zijn om goed uit te voeren en door veel factoren beïnvloed worden



WAAROM ZIT ER ZO'N SPREIDING OP DE GEOTHERMISCHE GRADIËNT

- › De geothermische gradiënt is afhankelijk van de **(A)** lokale warmteflux vanuit de Aarde, **(B)** de conductiviteit van het gesteente en **(C)** hoeveelheid radiogene elementen in de sedimenten
 - › De gradient is derhalve ook niet constant, maar wisselt met de diepte
- A. Lokale Warmteflux** (heat flow) is een gevolg van de continue afkoeling van de aarde; warmte die via conductie overgedragen wordt richting het aardoppervlak. Door structuren en onregelmatigheden (bijv. hotspots & convectiecelen in de mantel) kan deze sterk fluctueren (kijk bijvoorbeeld naar gebieden met vulkanische activiteit zoals IJsland, Italië, Hawai, etc)
- B. Conductiviteit** is de mate waarin de warmte 'doorstroomt' en is afhankelijk van het specifieke warmtegeleidend vermogen van de verschillende gesteentes
- C. Radiogene elementen** bevinden zich in vrijwel alle sedimenten/gesteenten. Sporen van Uranium, Thorium en Kalium kunnen warmte aan de warmteflux toevoegen, al is dit in carbonaten doorgaans zeer gering



VAN GRADIËNT NAAR TEMPERATUUR OP EEN DIEPTE

- › We beginnen met wat we weten, dus redeneren we altijd vanaf het aardoppervlak
- › In de basis is de temperatuur op een bepaalde diepte (z) een vermenigvuldiging van de gradient (dT/dz) met de diepte, opgeteld bij de huidige gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak (T_0)

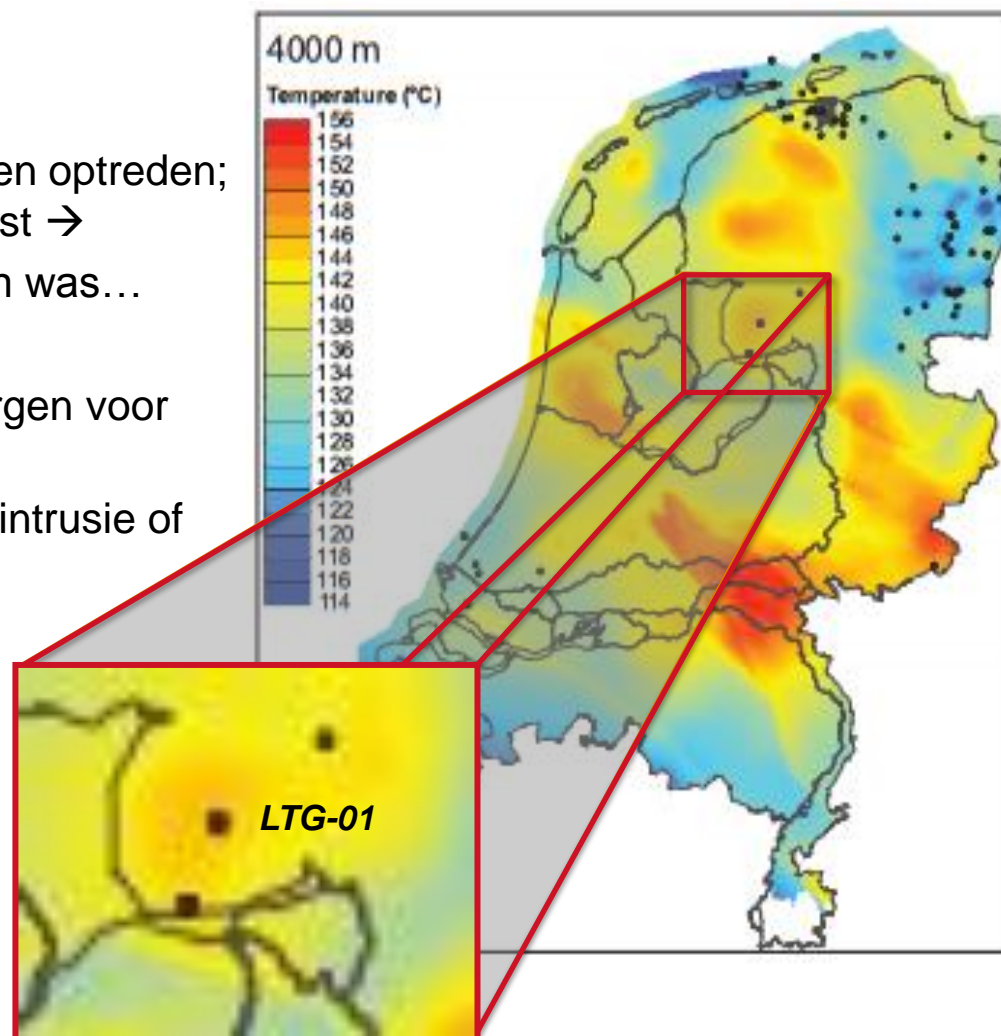
$$T(z) = T_0 + (dT/dz \cdot z)$$

Maar om een nauwkeurigere inschatting te hebben, startend vanaf het aardoppervlak:

- › Ken de geologische geschiedenis om:
 - › *De temperatuur aan het oppervlakte te weten, door de tijd heen*
 - › *De begravingsgeschiedenis in de vingers te krijgen (belangrijk voor de conductiviteit: hoe compacter, hoe beter het geleid)*
 - › *Verandering van de warmteflux door de tijd heen*
- › Weet welke gesteentes (met dikte) je tegenkomt
- › Etc.

MAAR! ER ZIJN AFWIJKINGEN VAN DIE GRADIËNT

- › Zelfs op kleine schaal kunnen grote verschillen optreden; zoals bijvoorbeeld geobserveerd in Luttelgeest →
- › Lang was onduidelijk wat hier de oorzaak van was...
- › Hypothese 1: thermische conductiviteiten zorgen voor verhoogd warmtetransport
- › Hypothese 2: historische anomalie door bijv. intrusie of lokale hoge warmteflux
- › Hypothese 3: convectie



VERKLARING ANOMALIE: THERMISCHE CONDUCTIVITEIT?

- › De thermische conductiviteit is de mate waarin een materiaal in staat is om warmte te transporteren
 - › *Hout heeft bijvoorbeeld een hele lage thermische conductiviteit en is daarmee een goede isolator*
 - › *Staal heeft een hoge thermische conductiviteit en wordt daarom ook snel heet; zie hieronder...*
- › Kunnen we de anomalie verklaren aan de hand van de specifieke thermische conductiviteit van gesteentes in de ondergrond?

Nee

- › Met behulp van 1D basin modelling (software om de ondergrond te modelleren waarbij de evolutie van de aarde een rol speelt) gerekend aan de huidige (present-day) stratigrafie:
 - › Daaruit blijkt geen match met de gemeten temperaturen
- › Je zou de gemeten temperatuurwaarden kunstmatig kunnen matchen, door de stratigrafie aan te passen. Daaruit blijkt dat je ca. 40% kalksteen nodig hebt, wat overeenkomt met een laag van ~3km dik. Dit zien we niet terug in de gegevens van het boorgat

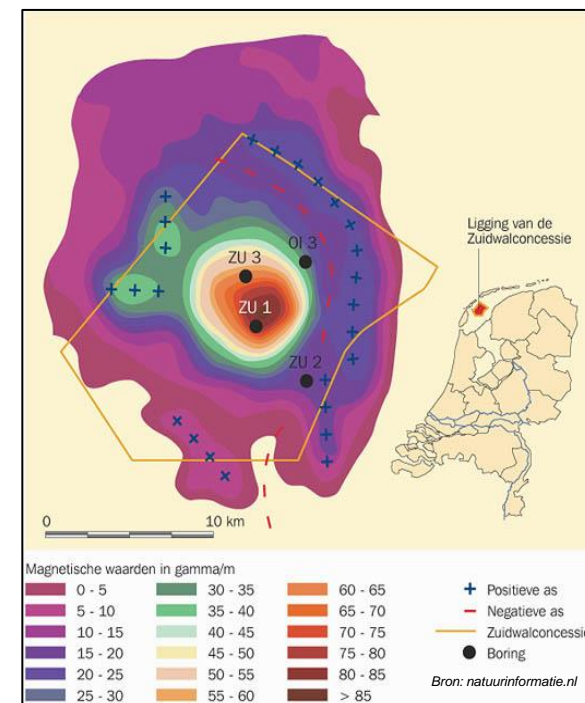


VERKLARING ANOMALIE: HISTORISCHE ARTEFACTEN?

- › Een hogere (of lagere) temperatuur kan ook een gevolg zijn van een historische, geologische gebeurtenis, bijvoorbeeld vulkanisme of intrusie van magmatisch gesteente.
 - › Denk bijvoorbeeld aan de Zuidwal Vulkaan onder de Waddenzee; een dode vulkaan uit Laat Jura (~160 mln jaar geleden)

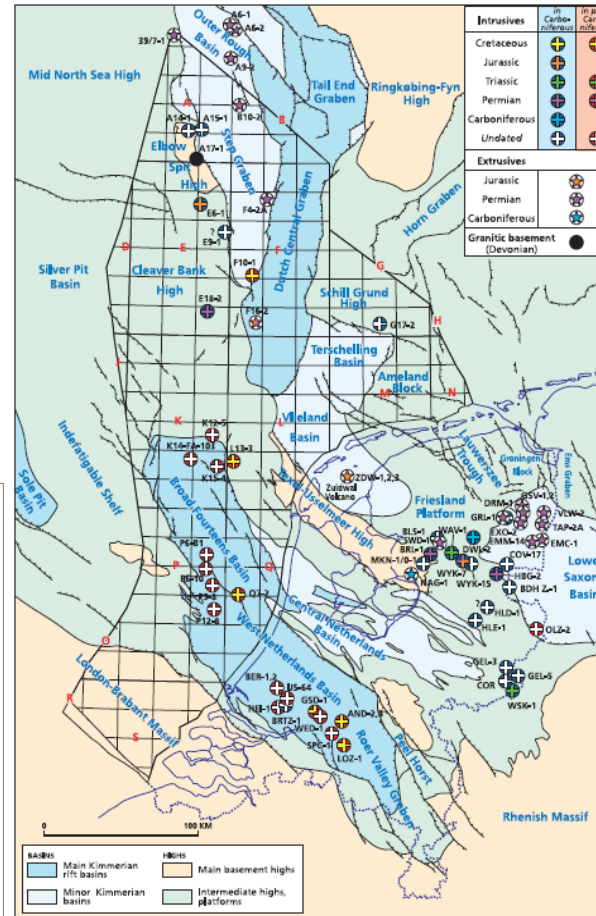
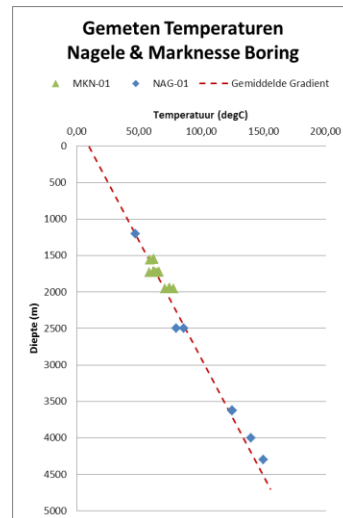
Nee

- › In de ondergrond onder Luttelgeest vinden we geen bewijs van vulkanische of intrusieve activiteit



MAGMATISME IN NEDERLAND

- De bekende voorkomens uit boorgegevens staan op de kaarten rechts →
- Ten oosten van Luttelgeest zijn een reeks van oude (Perm en Carboon ouderdom) intrusieven (magma)
- Ten zuiden van Luttelgeest is één extrusief (lava) bekend uit de Nagele boring (NAG-01) en van de intrusieven komt Marknesse (MKN-01) het dichtst in de buurt
- Noch NAG-01, noch MKN-01 – i.t.t. LTG-01 – laten een indicatie zien van thermische artefacten en lijken ze op te lijnen met de gemiddelde gradiënt in Nederland



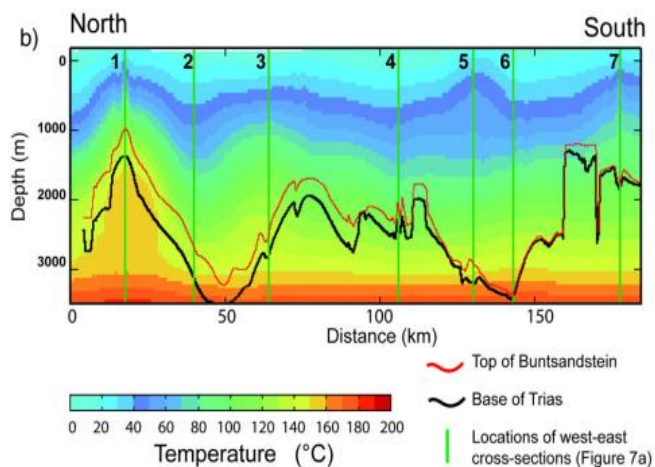
Putten waarin stollingsgesteenten (magma/lava) aangetroffen zijn
Bron: Geology of the Netherlands (H13, p198 by Van Bergen & Sissingh)



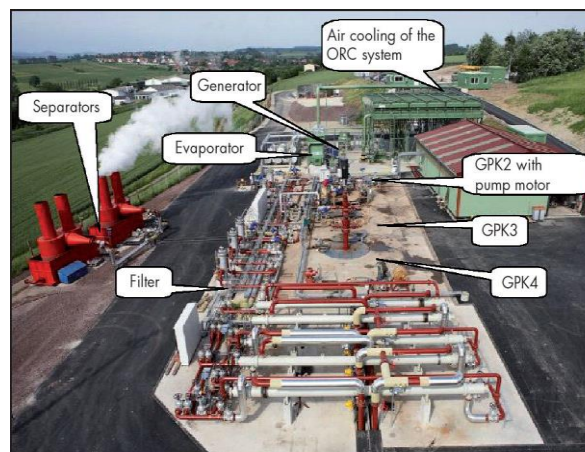
Putten waarin vulkanische as of vulcanisch clasten aangetroffen zijn
Bron: Geology of the Netherlands (H13, p199 by Van Bergen & Sissingh)

VERKLARING ANOMALIE: CONVECTIECELLEN

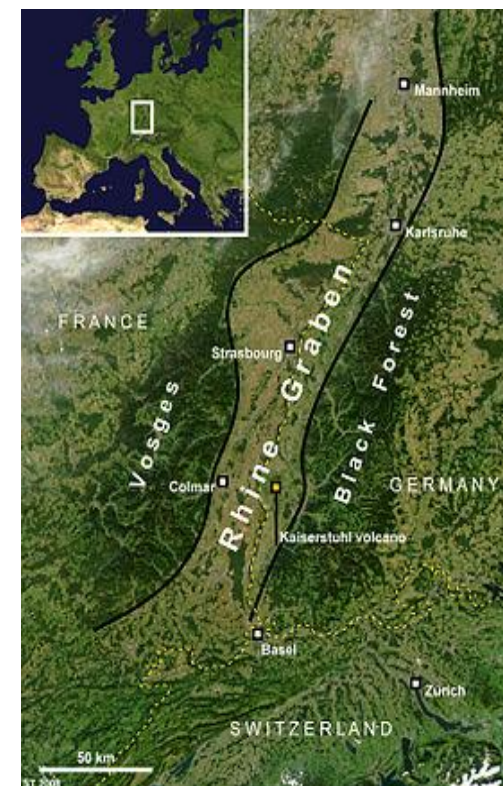
- Convectiecellen zijn een bekend verschijnsel door de ontwikkelingen in de EGS demonstratie site in Soultz-sous-Forêts (Fr)
- Soultz is een hoge temperatuur demonstratie plant in de Upper Rhine Graben
- Er werden onverwacht hoge temperaturen aangetroffen op relatief lage diepte



Source: Guillois-Frottier et al. 2013



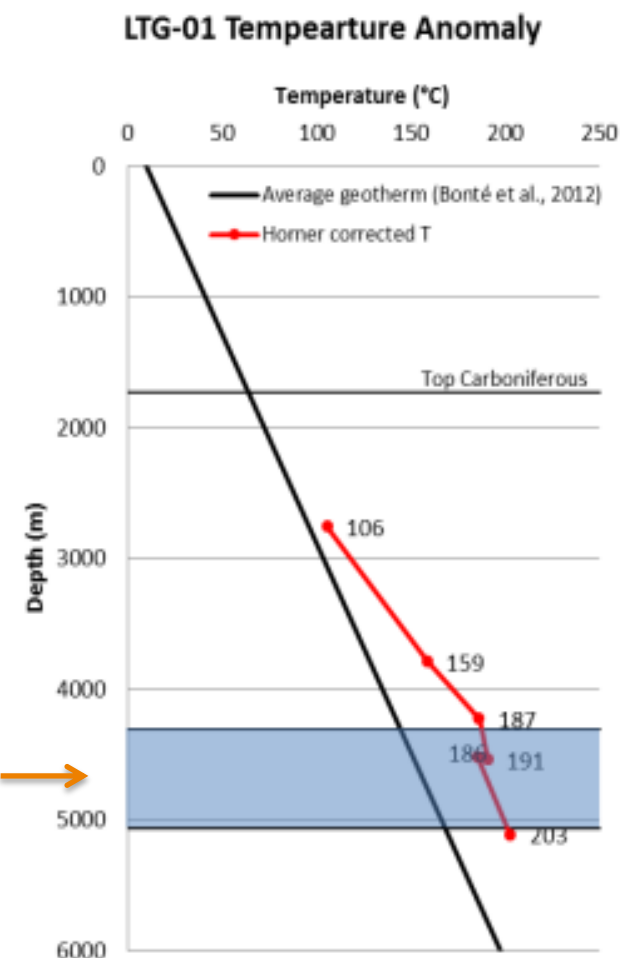
Soultz-sous-Forêts demonstration site (Source: bine.info)



KUNNEN WE OOK IN NL CONVECTIECELLEN VERWACHTEN?

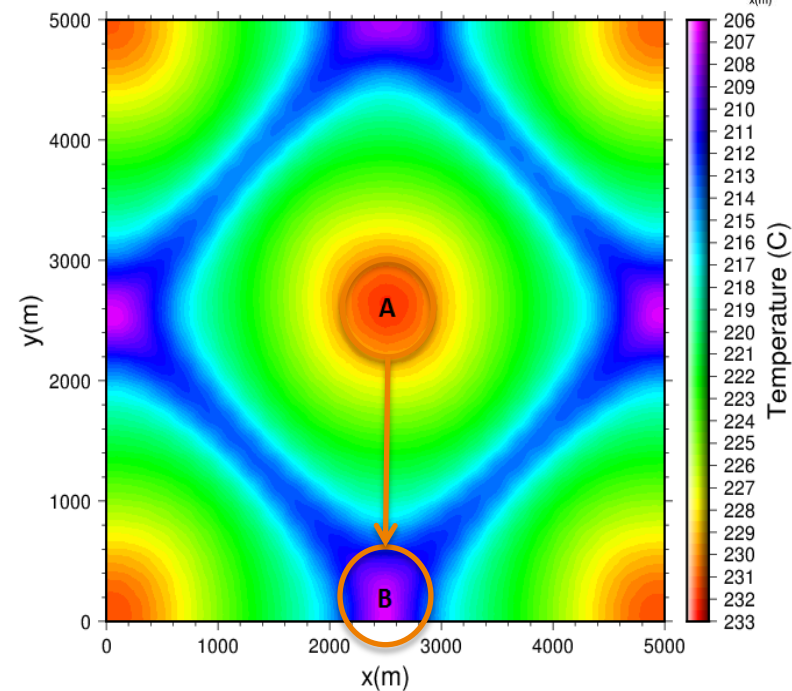
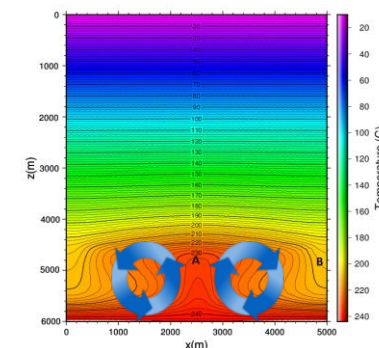
- › Een studie van TNO heeft aangetoond dat een geobserveerde anomalie (LTG-01) te verklaren is door convection aan te nemen
- › Daarnaast is er ook een inschatting gemaakt van de minimale doorlatendheid die geassocieerd is met het voorkomen van convectiecellen

Diepte interval waar Dinantiën carbonaten voorkomen →



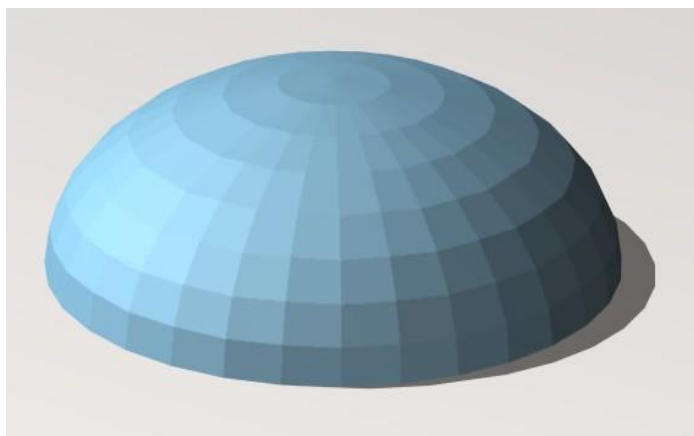
GEMODELLEERDE CONVECTIE

- › Numerieke modellen helpen ons om stromingspatronen in de ondergrond in te schatten en te voorspellen
- › Aangenomen dat de carbonaatlaag 600 meter dik is, kan een convectiecel in de ondergrond er zo uit zien
- › Van bovenaf ziet dat er als volgt uit, wat laat zien dat het geografisch gezien erg belangrijk is om te weten waar zich mogelijk een convectiecel bevindt
NB: (diepteddoorsnede op 4700m) →
- › Punt A bevindt zich lang de as van de opwelling en punt B langs de downwelling as
- › De temperatuur (hypothetisch!!) op 4,5 km diepte is op punt A bijna 30 graden warmer dan op punt B
- › (wat overeenkomt met een kilometer diepteverschil, volgens de gemiddelde geothermische gradiënt)

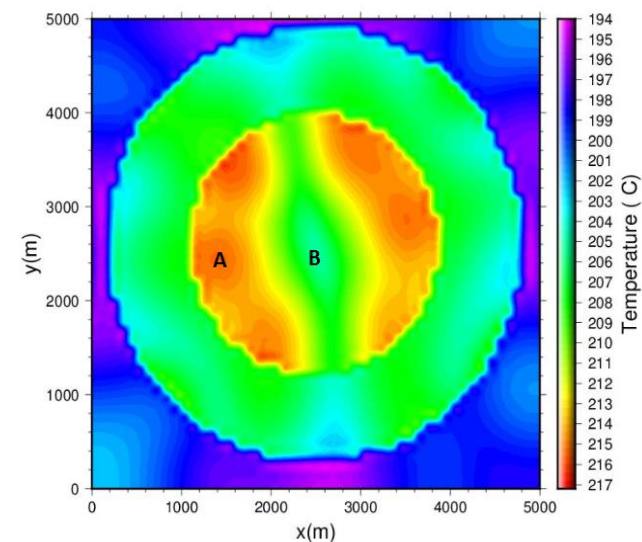


CUBUS NAAR DOME-VORM

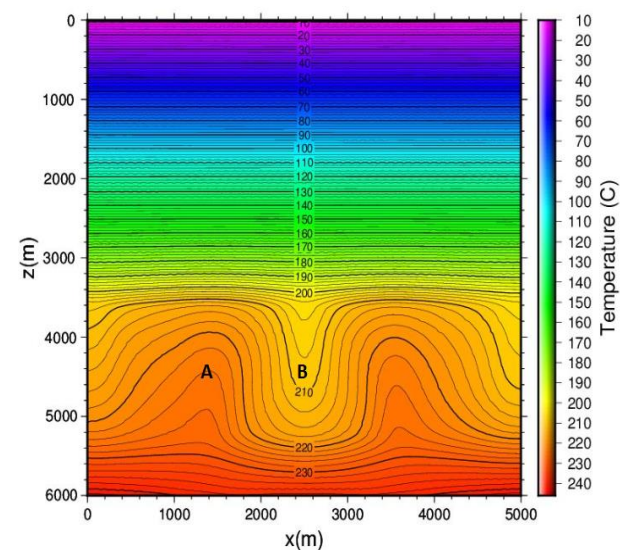
- › In het vorige model werd uitgegaan van een kubus, om puur het effect van convectie te laten zien.
- › Maar wat als we een iets realistischere vorm nemen: een dome-vorm?



bovenaanzicht



zijaanzicht



HET BELANG:

- › Als het doel is om een afwijkende (of abnormaal) hoge temperatuur op relatief geringe diepte te vinden om de investeringskosten te minimaliseren, dan is het van belang om de locatie van de opwellende zones te kennen, in relatie tot de downwelling zones.
- › De eerste conceptuele convectiemodellen laten zien dat dit lateraal tientallen graden Celsius kan schelen.
- › Tientallen graden verschil, tegen een geothermische gradiënt van $31^{\circ}\text{C}/\text{km}$, kan zich vertalen in een kilometer meer of minder boren.



NATUURLIJKE DOORLATENDHEID VAN GESTEENTES

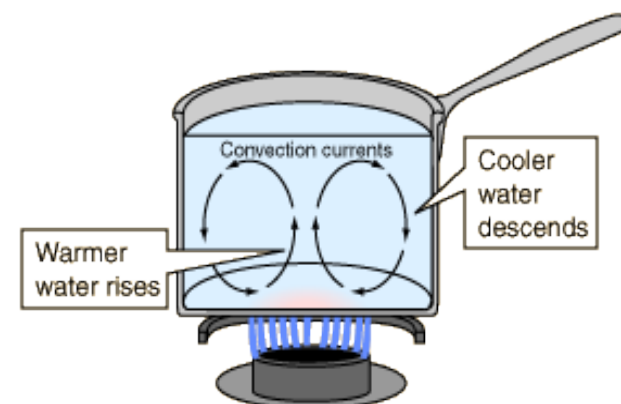
- › Conventionele geothermische putten, maken gebruik van de natuurlijke doorlatendheid van gesteentes; oftewel de permeabiliteit
- › De permeabiliteit komt doordat poriën in het gesteente met elkaar in verbinding staan (primaire~), of door het ontstaan van breuken en/of cavities (secundaire~)
- › Deze permeabiliteit neemt doorgaans af met de diepte, omdat het gesteente met de diepte steeds verder in elkaar gedrukt wordt
- › Daarom vinden we ook vrijwel geen conventionele geothermisch putten dieper dan 3 kilometer
- › Dieper dan ruwweg 3 kilometer, biedt doorgaans een te lage natuurlijke permeabiliteit voor een geothermisch doublet

NB: Permeabiliteit is de mate waarin de poriën met elkaar in contact staan (eenheid is Darcy (D)).

De hoeveelheid poriën t.o.v. de hoeveelheid steen in een bepaalde laag, is de porositeit (eenheid %)

MAAR HOE KAN HET DAN CONVECTEREN?

- › Zoals eerder benoemd zijn er wel indicaties van convectorie in de carbonaten van het Dinantien
- › Voor convectorie heb je stroming (flow) nodig
- › Volgens de uitkomsten van het TNO onderzoek duidt dat op een minimale porositeit, ondersteund door breuken in het gesteente
- › Een mogelijke veroorzaking van de minimale porositeit (en permeabiliteit) kan zijn:
 - › *Verkarsting: ontstaat alleen als het carbonaatplatform periodiek is droog gevallen*
 - › *Fractures: kleine breukjes als gevolg van natuurlijk deformatie*



DUS CARBONATEN EN KARSTEN?

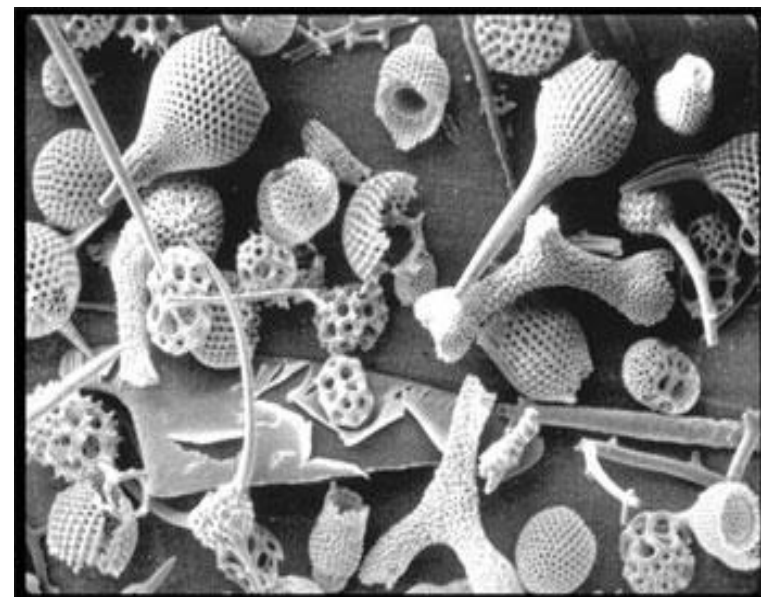
- › Om volledig te zijn lichten we kort toe wat carbonaten (of carbonaatplatformen) eigen zijn
- › En wat karstificatie inhoudt



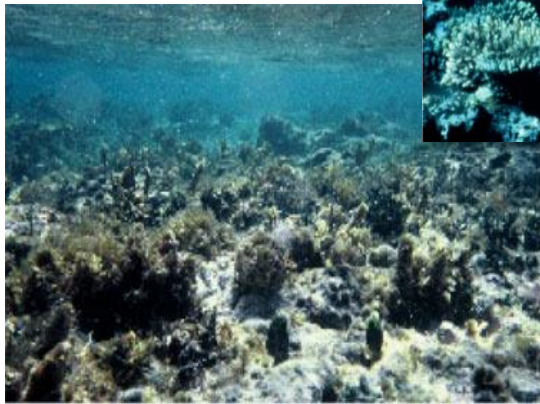
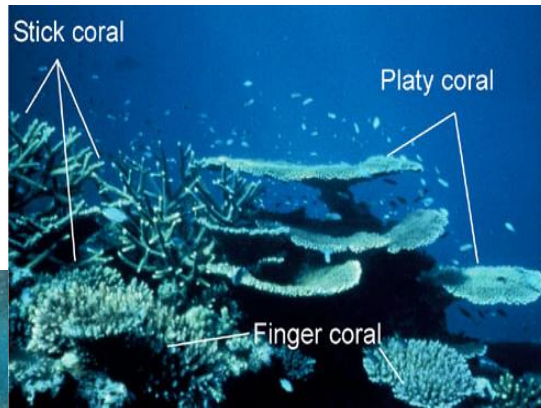
Hoe een carbonaatplatform er nu uit ziet

CRUCIAAL: WEET WAAR JE ZIT OP JE CARBONAATPLATFORM

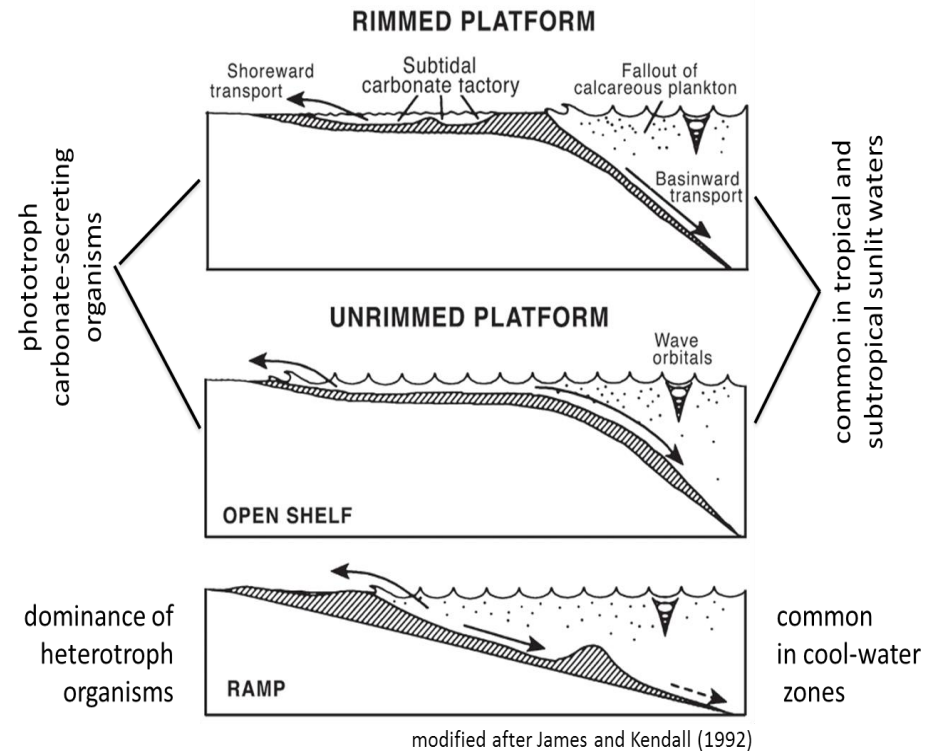
- › Een carbonaatplatform is een sedimentaire verhoging die hoofdzakelijk bestaat uit kalkachtige afzettingen.
- › Denk daarbij aan de skeletten/overblijfselen van sessiele organismen en neergeslagen, kalkige plankton skeletjes



CARBONAATPLATFORMEN



Note the different position of the “carbonate factories” at the seafloor

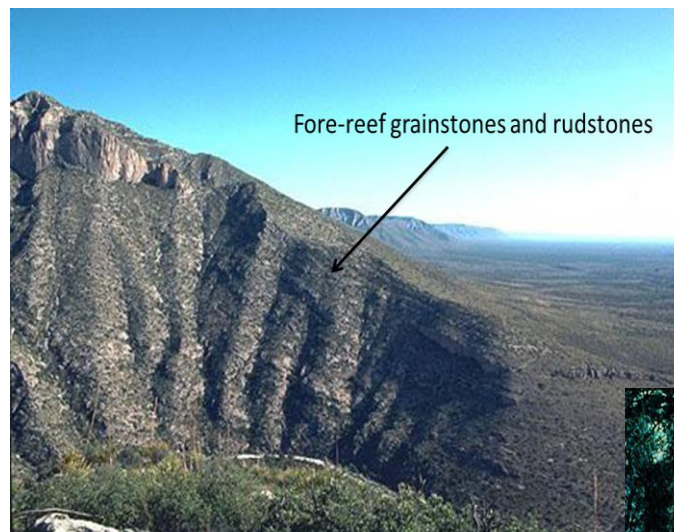


CARBONAATPLATFORM – EN ALS GESTEENTE...

Vele verschillende soorten kunnen we bestuderen aan zgn. dagzomen; plaatsen waar het gesteente aan de oppervlakte komt.



Carbonate interbedded with marl beds. Middle Cenomanian. Santander, Spain.



Fore-reef grainstones and rudstones

Erg slecht doorlatende gesteentes met uiteenlopende interne structuren

Soms afgewisseld met andere gesteentesoorten



WAT WETEN WE NU AL VAN DE CARBONATEN IN FRIESLAND

- › PanTerra Geoconsultants BV heeft metingen gedaan aan LTG-01
- › Voor het diepte interval 4751 – 4758 m:
 - › Carboniferous Limestone Group
 - › Gemiddelde porositeit = 1,24 %
 - › Gemiddelde horizontale permeabiliteit = 0,10 mD
- › TNO onderzoek vindt resultaten uit gesteentemonsters in de range van 0,2 – 9,6 mD
- › TNO onderzoek (Rayleigh number analysis) geeft aanwijzingen voor 30 mD

Nummer	Diepte (m)	Porositeit(%)	Hor.perm (mD)
1	4751.37	1.20	0.01
2	4751.75	1.10	0.01
3	4752.01	1.20	0.01
4V	4752.27	1.20	0.01
5S	4752.60	1.20	0.31
6V	4752.88	0.90	0.00
7	4752.97	1.00	0.01
8	4753.25	1.10	0.08
9	4753.59	1.40	0.29
10	4753.82	1.60	
11	4754.05	1.10	0.07
12	4754.39	1.10	0.01
13	4754.67	1.10	0.02
14	4755.00	1.40	0.71
15V	4755.11	1.70	0.01
16	4755.28	1.90	
17S	4755.64	1.40	0.21
18V	4756.00	1.20	0.00
19	4757.05	1.00	0.00
20	4757.32	1.10	0.16
21	4757.70	1.10	0.01

EN HOE ZIEN ZE ERUIT?

Rechts de foto's van de Luttelgeest (LTG-01) kernen.

Je ziet hier donkere kalkstenen met een lage porositeit.

Deze stenen komen van een diepte van 4376 tot 4473 meter



DGEP/GSRT/GISS/CARB R05-035



DGEP/GSRT/GISS/CARB R05-035

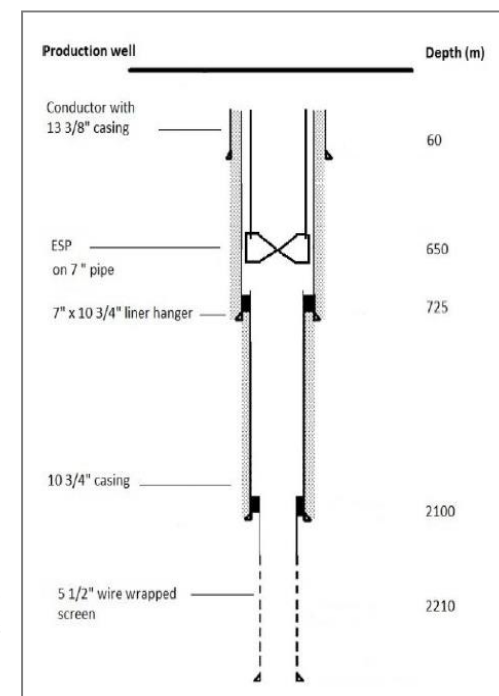
HET BELANG

- › Ook voor het mechanisch stimuleren van een gesteente, is er een fractionele permeabiliteit nodig
- › Convectie kan duiden op een (verticale) permeabiliteit van rond de 30 mD
- › Deze convectie kan geassocieerd zijn met verbreukingen en/of karstificatie in carbonaatplatformen
- › Dus niet alleen voor de temperatuur, maar ook voor de benodigde permeabiliteit: weet waar de carbonaatplatformen zijn (en of ze verkarst zijn)



MAAR DAN MOETEN WE ER NOG DE DIEPTE IN

- › De investeringen aan de voorkant van een geothermisch project worden voor een groot deel bepaald door de boorkosten
- › De boorkosten worden bepaald door het aantal dagen die er nodig zijn om een gat te boren (zgn. rig days)
- › Dit is afhankelijk van:
 - › hoe diep er geboord moet worden
 - › hoe lang het boorgat is (als er gedeveieerd geboord wordt, anders is het gelijk aan de diepte)
 - › door welke gesteentes er geboord moet worden, en
 - › met welke diameter er geboord wordt



Conventionele geothermie productieput van het Den Haag doublet (volgens DWA, E.ON Benelux & IF Technology (2008) and Schoof (2013))

OPEREREN IN UITZONDERLIJKE OMSTANDIGHEDEN

- › Bij boring naar dieptes van 5 – 7 km is het goed te realiseren dat we met uitzonderlijke omstandigheden te maken hebben; zgn. Hoge Druk, Hoge Temperatuur omstandigheden (HP-HT conditions)
- › *Men spreekt van HPHT condities als de druk > 69 MPa en de temperatuur > 150 °C*

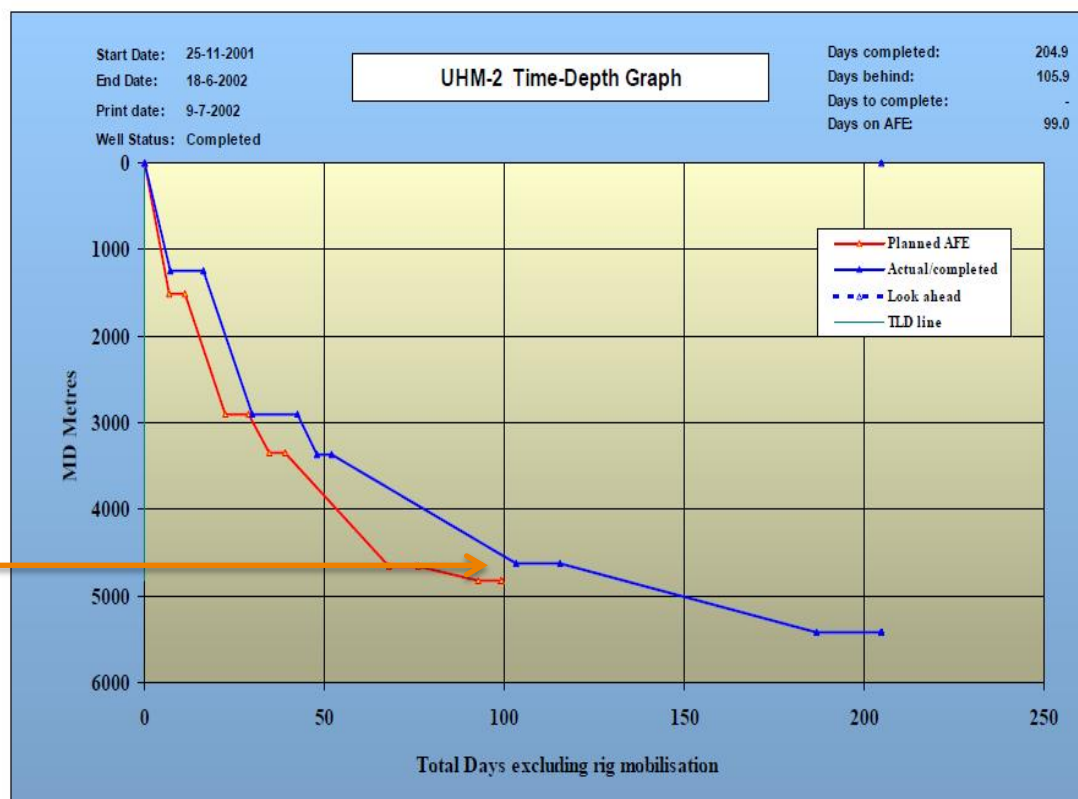
- › Dit betekent dat er:
 - › Limiterende factoren zijn m.b.t. keuze/beschikbaarheid materialen en technieken
 - › Veranderende rheologische eigenschappen zijn
 - › Uitdagende omstandigheden zijn voor cement (grootste zorg) in zo'n fysieke, maar ook chemisch actieve omgeving
 - › Daarom moeten de chemische en fysische eigenschappen van het cement altijd aangepast worden aan de lokale geologie
 - › Maar ook aan boorvloeistoffen worden andere eisen gesteld. Nu beste ervaringen met 'oil based muds'

LESSEN UIT HET VERLEDEN: *DELEN UIT 'CRITICAL WELL REVIEW REPORT' VAN UTM-02*

- › 'High temperatures probably have a bigger impact on the well and the equipment that's run into it, than the high pressures.'
- › Realise early in the planning stage that the equipment that you can use is severely restricted and continuously tell this to your contractors. Sometimes it takes a while before they final realise this.'
- › And **'Continuous Fingerprinting is essential in all high temperature wells'**
- › P17 of the report: 'The geothermal temperature was higher than the P85 estimate in the objective section. The bottom hole temperature at TD was 220degC. '
- › **'Do not rely on your local wireline/drilling staff to have the necessary high temperature experience. Agree in the planning phase that the operators have to supply personnel with high temperature experience; get the contractor to also supply their CV's to confirm this requirement.'**

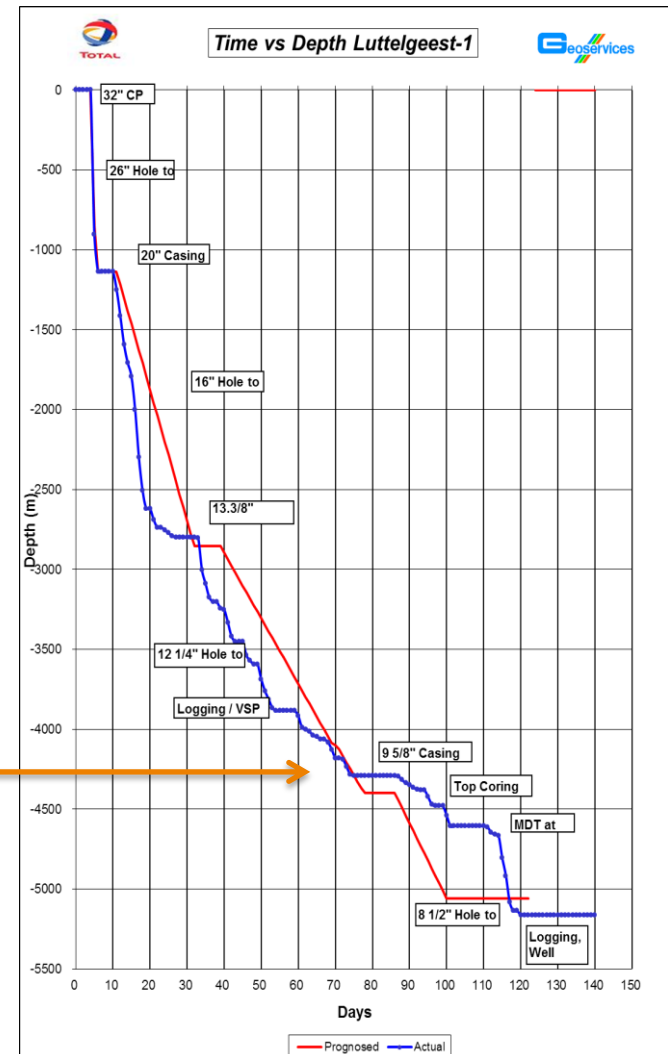
HOE ZAT DAT BIJ UITHUIZERMEEDEN?

› Met de Zeeland Fm op 4600m



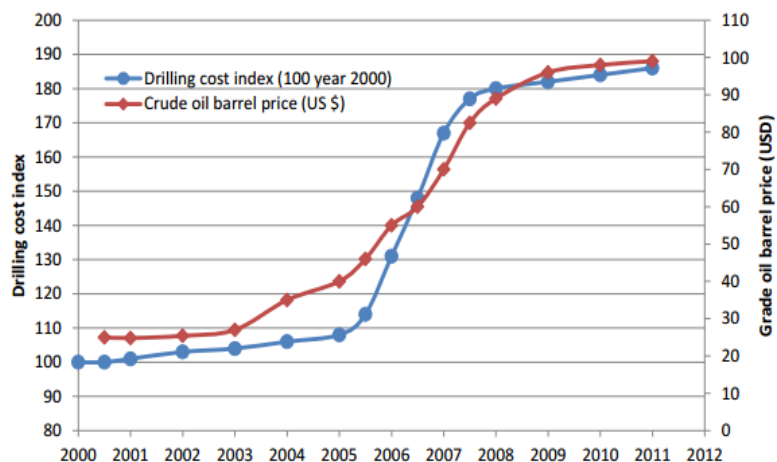
EN LUTTELGEEST?

- › Aldaar werd de Carboniferous Limestone aangedaan op 4355 m
- › Naar verluid is het gesteente daar sterk verkiezeld, wat de boorvoortgang sterk beperkt
 - › *De bit (boorkop) slijt onevenredig door de verkiezeling in dit gesteente*
 - › *Daardoor draait de boorkop zich hier vast*
 - › *Ca. om de 5 meter boorvordering moest de boorkop vervangen worden*

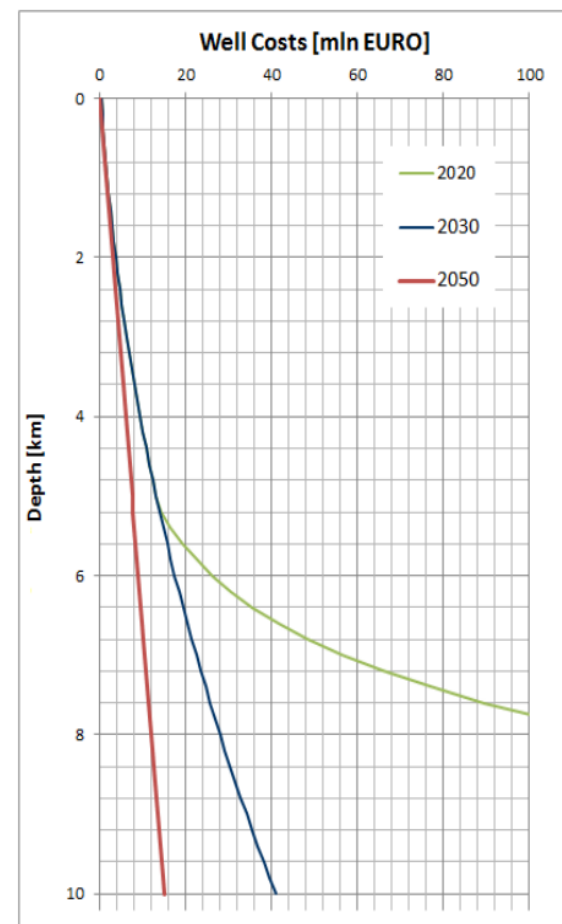


DE KOSTEN VAN EEN BORING

- › De prijzen voor het boren volgen de ontwikkeling van de olieprijs (wat momenteel gunstig is) → onder gegevens tot 2011
- › Ontwikkeling op de lange termijn dringt naar verwachting de kosten voor een boring terug → hiernaast forecast uit GEOELEC (2014)



Source: GEOELEC



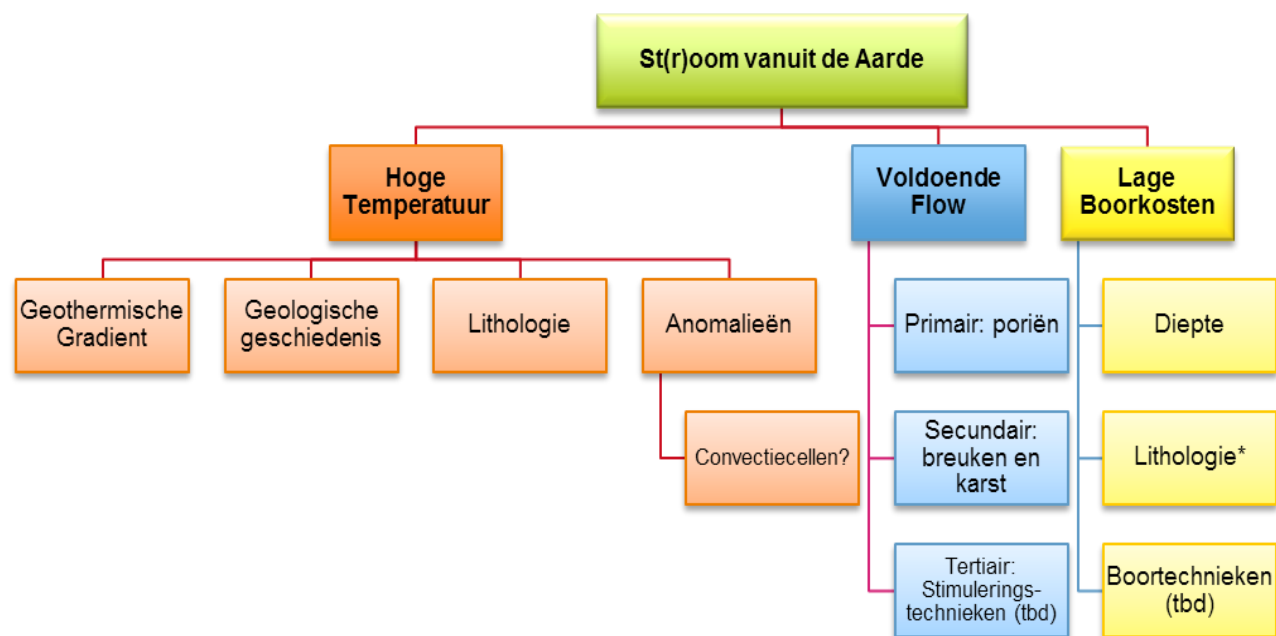
HET BELANG

- › Hoewel de boring een louter technisch verhaal impliceert, kan er aan de voorkant wel veel gedaan worden om de operatie zo efficiënt mogelijk te verlaten lopen:
 - › Weet waar je naartoe boort
 - › Weet wat je tegenkomt
 - › Ontwerp op basis van de geologische kennis een goed boorplan
 - › Etc.



CONCLUSIE: WAAROM GEOLOGIE BELANGRIJK IS

- › Omdat we als doel stellen dat we een **hoge temperatuur** met **voldoende flow** en tegen de **laagste (boor-)kosten** willen en dat de geologie daarin een cruciale factor is



VERKENNING ONDERZOEKSRICHTINGEN

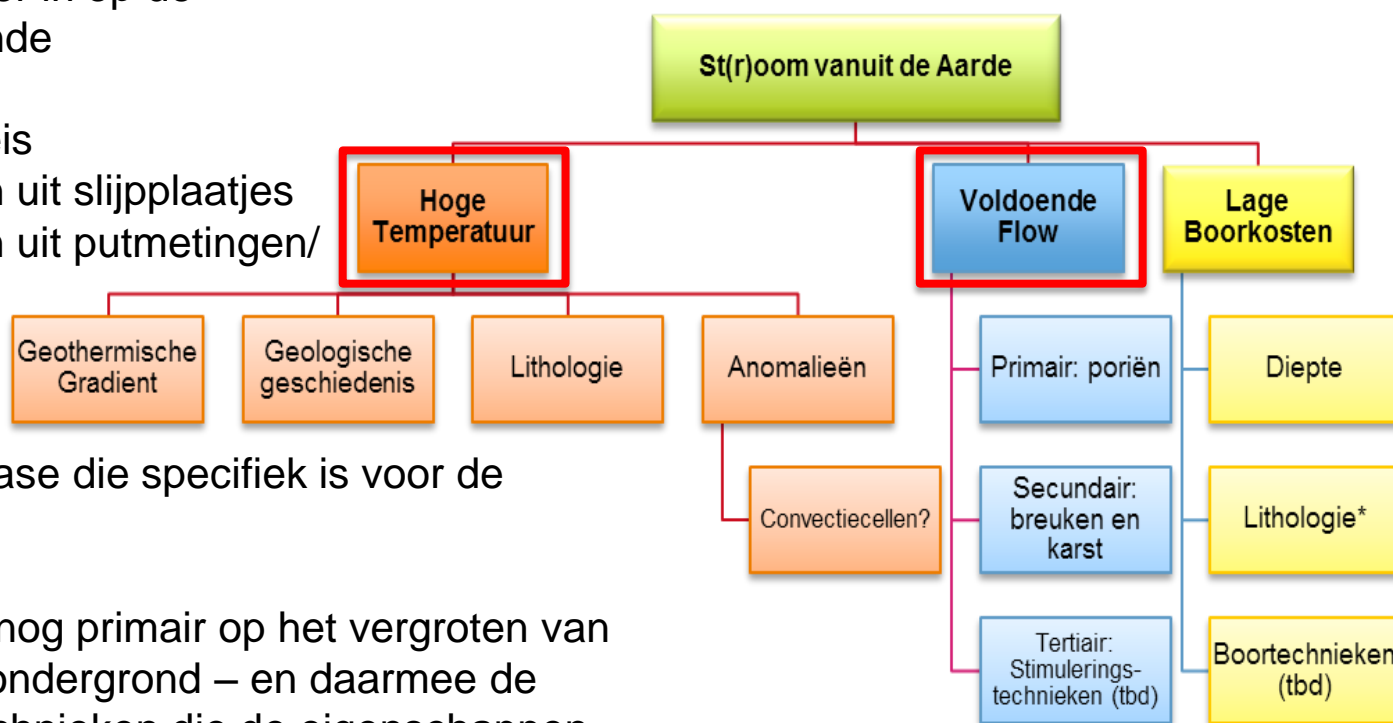
VERDIEPING VAN DE ONDERZOEKSRICHTINGEN

In dit hoofdstuk gaan we dieper in op de mogelijkheden van verschillende onderzoeksrichtingen:

- Seismische ontdekkingsreis
- Gesteente eigenschappen uit slijpplaatjes
- Gesteente eigenschappen uit putmetingen/ logs

Technieken worden verkend en indien mogelijk getest/gedemonstreerd in een test-case die specifiek is voor de Nederlandse situatie

Deze technieken richten zich nog primair op het vergroten van de kennis van de ultra-diepe ondergrond – en daarmee de verkleining van de risico's. Technieken die de eigenschappen geschikt maken kunt u vinden in het volgende hoofdstuk.

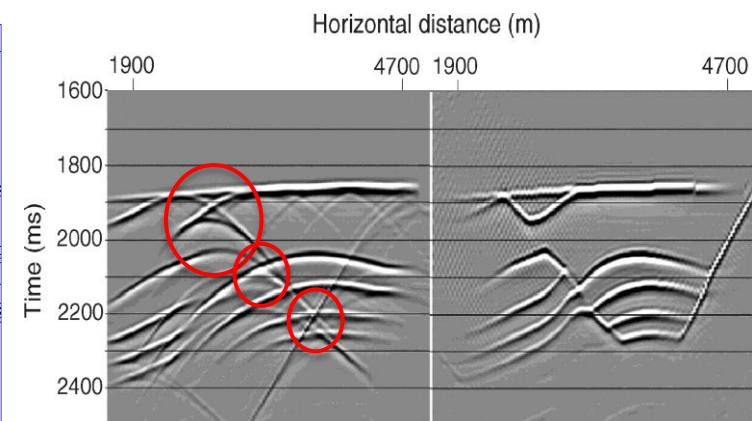
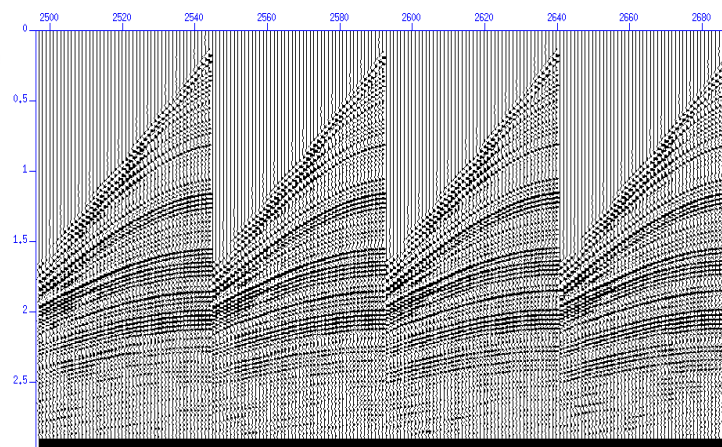
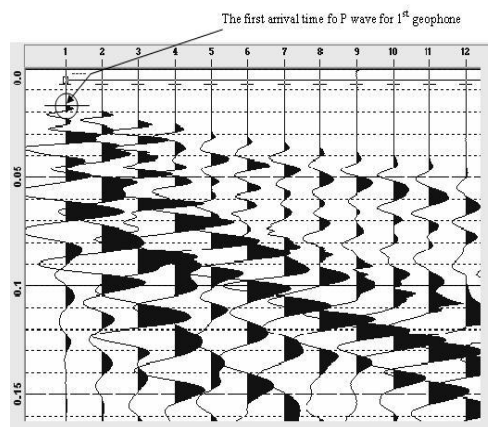


ONDERZOEKSRICHTING 1: EEN SEISMISCHE ONTDEKKINGSREIS

- › Seismische golven zijn als geluidsgolven die van bron (vocaal, instrument) naar ontvanger (oor, microfoon) reizen, maar dan door de bodem in plaats van door de lucht
- › Seismiek dient in eerste instantie om de ondergrond af te beelden, zoals sonar de zeebodem in kaart brengt en echo's in het ziekenhuis de inwendige mens inspecteren
- › Net als in akoestiek en echografie worden seismische data omgerekend naar composities en beelden, dit wordt 'seismische processing' genoemd
- › Door middel van seismische data vindt men de diepte, volumes en breuken van interessante gesteente-reservoirs in de aarde
- › In de toepassing van geothermie bepaalt diepte → temperatuur en volume + breuken → flow, debiet
- › Met seismiek worden dus belangrijke gegevens voor een levensvatbaar geothermisch systeem in kaart gebracht

VERBETERDE SEISMISCHE PROCESSING

- › Seismiek: van gemeten geluidsgolven naar een plaatje van de ondergrond is een zeer complex traject



- › Bij dit proces wordt de data dermate bewerkt (geprocesed) dat het gewenste diepte interval zo scherp mogelijk in beeld komt. Vergelijkbaar met het scherpstellen van een fotocamera.

ONZE UITDAGING: FOCUSSEN OP ULTRA-DIEP

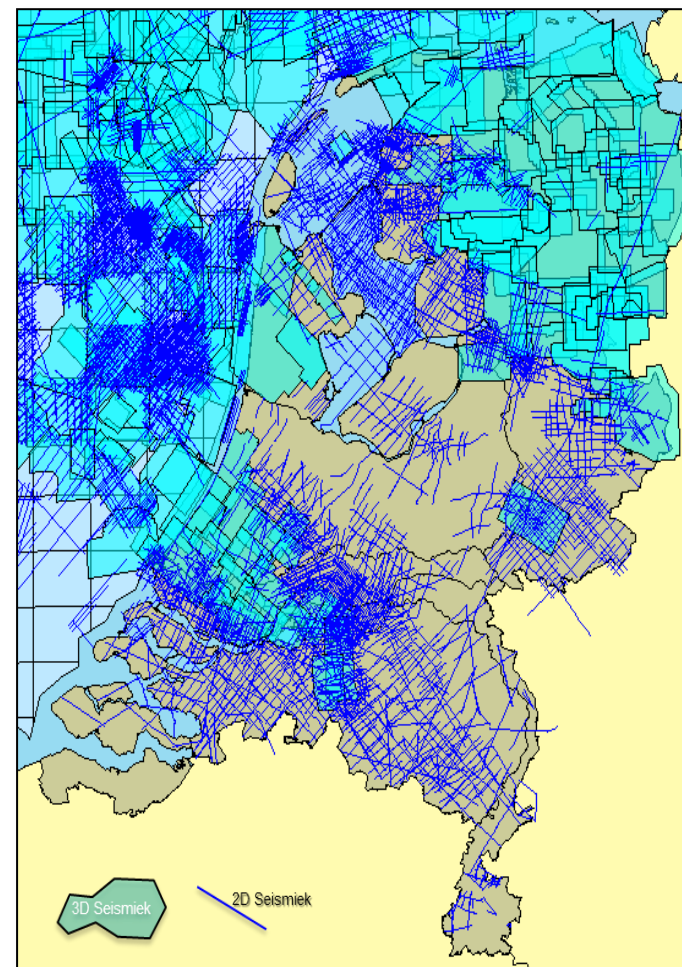
- › Bewerkingen van de huidige publiek beschikbare seismiek hebben zich gericht op het diepte-interval waar olie en gas voorkomt, wat kan zorgen voor een suboptimaal beeld op andere / diepere niveaus
- › De seismische resolutie neemt af met de diepte, dus hoe dieper, hoe lager het oplossend vermogen van de data
- › De uitdaging in de exploratie van de ultra-diepe ondergrond, is het focussen op de relevante lagen door:
 - › Het ontwikkelen van innovatieve geothermische exploratie technieken:
 - › Dus het verbeteren van de oude seismische reflectie data
 - › het verbeteren van de interpretatie
 - › en het terugdringen van het exploratie risico
- › Veelbelovend?
 - › Ja, maar is sterk afhankelijk van kwaliteit oude data (i.g.v post stack data) en zeer sterk afhankelijk van zgn. well-control: ijkpunten, zodat je weet waar je zit



Scherpte-diepte in fotografie

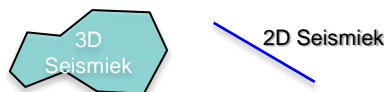
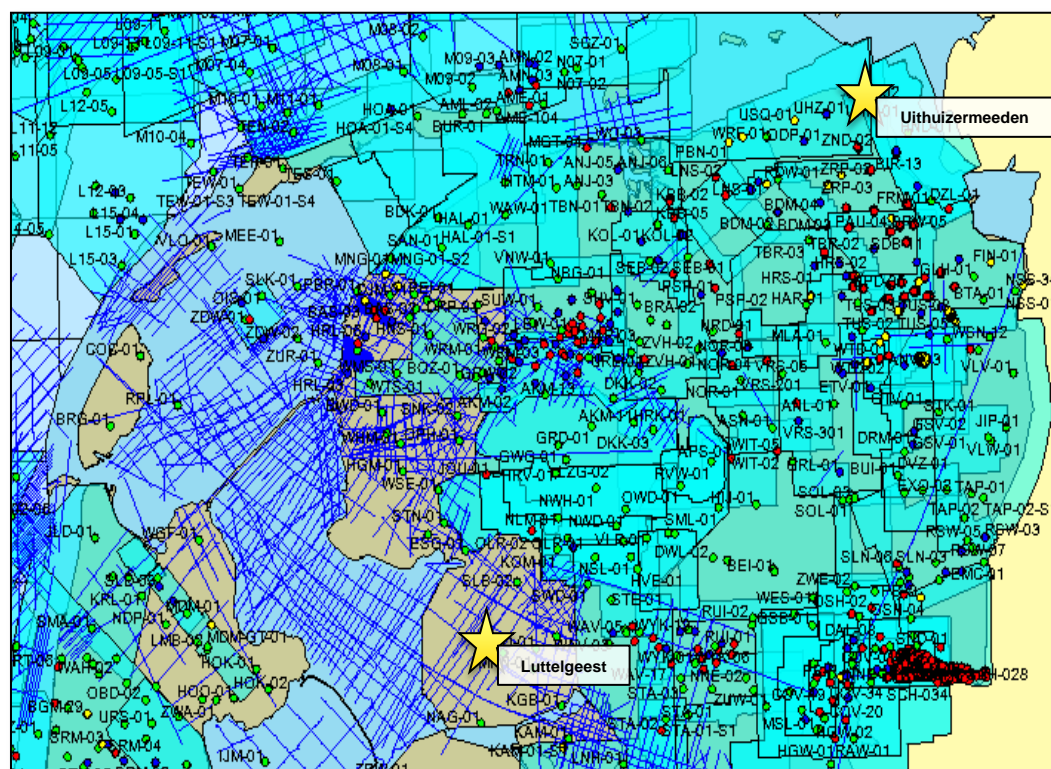
MAAR WAAR...?

- › Voor een testcase stellen we als voorwaarde dat het moet ergens op aangrijpen, dus:
 - › Is er Well Control?
 - › Is er seismische dekking van voldoende kwaliteit?



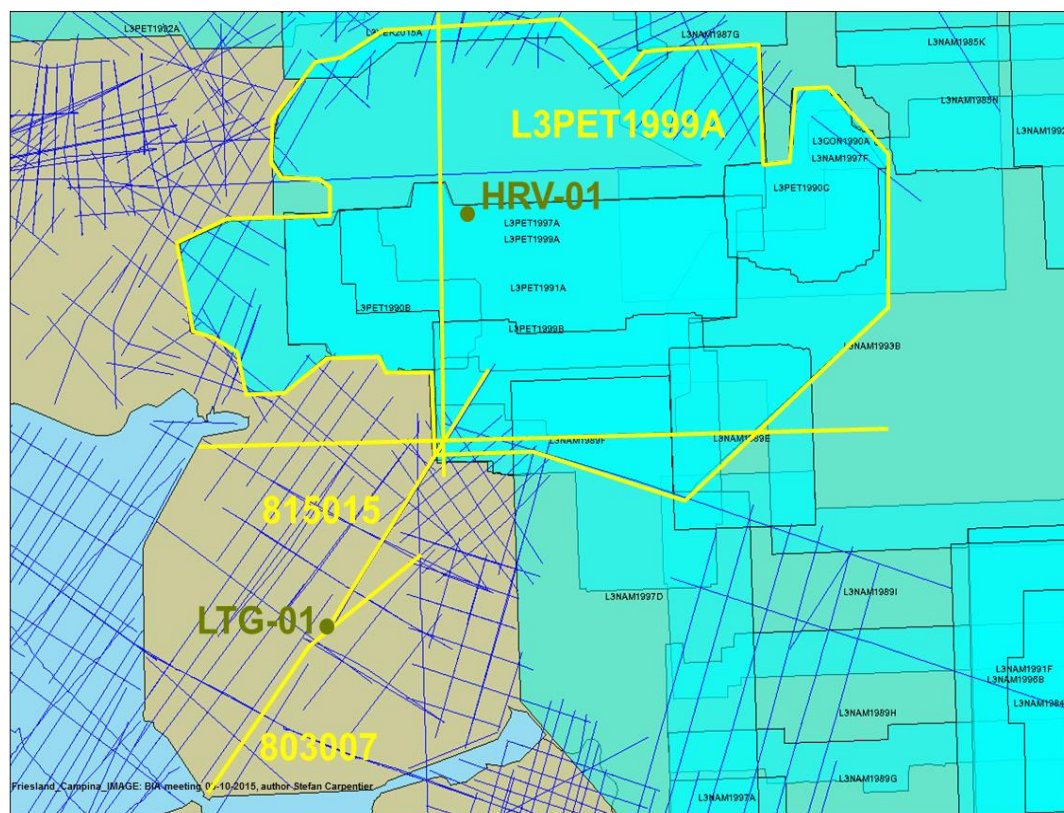
LOCATIE VOOR EEN TESTCASE

- › Voorwaarden:
 - › Is er Well Control?
 - › Is er seismische dekking van voldoende kwaliteit?
- › Well Control:
 - › 2 locaties (> 5km): LTG-01 & UHM-02
- › Seismische dekking:
 - › Zie kaart van NLOG →



WELL CONTROL EN EERSTE DEMONSTRATIE VAN DE TECHNIEK

- › We hebben LTG-01 als ijkpunt
- › We hebben binnen deze BIA de kans gezien nieuwe technieken toe te passen op post stack data (3D)

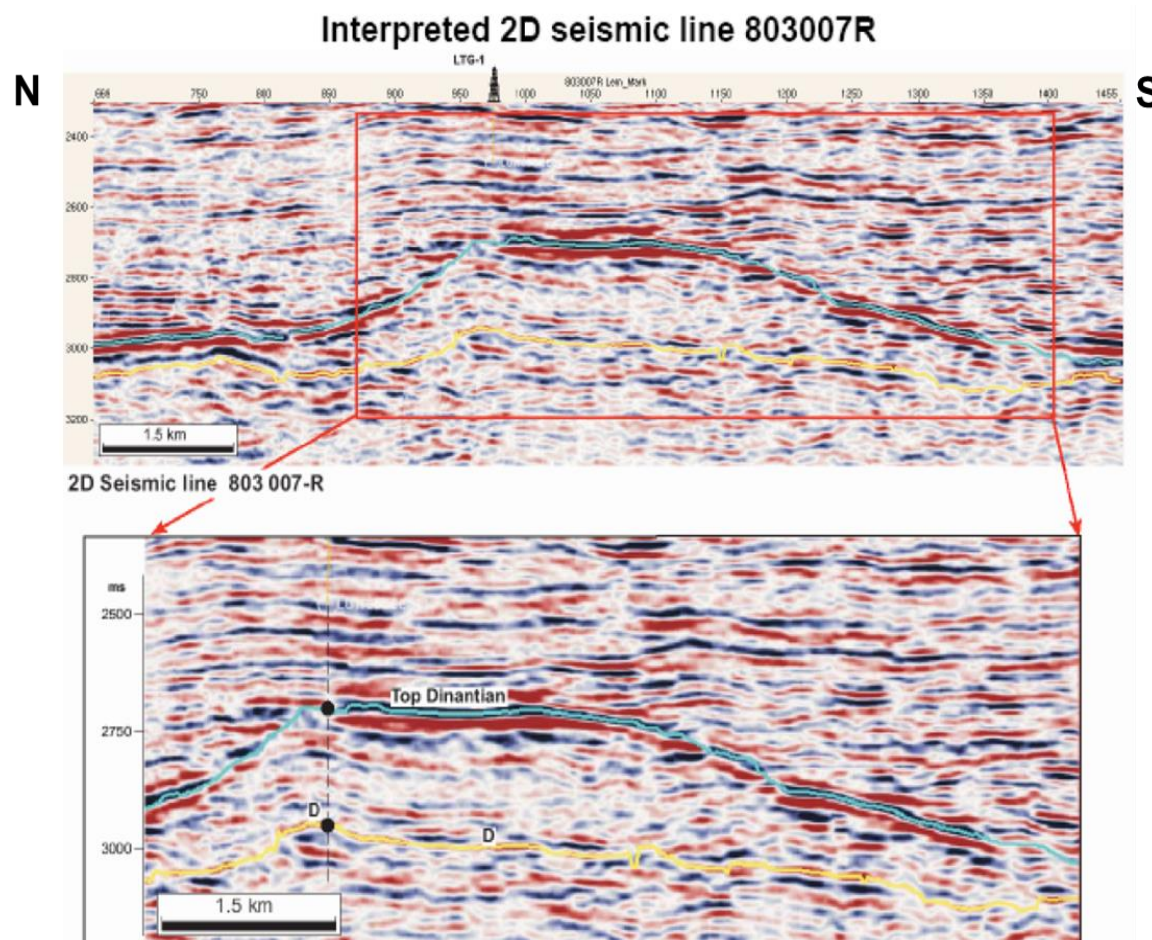


Friesland, Carpinz_IMAGE: BIA meeting 0-10-2015, author: Stefan Carpentier

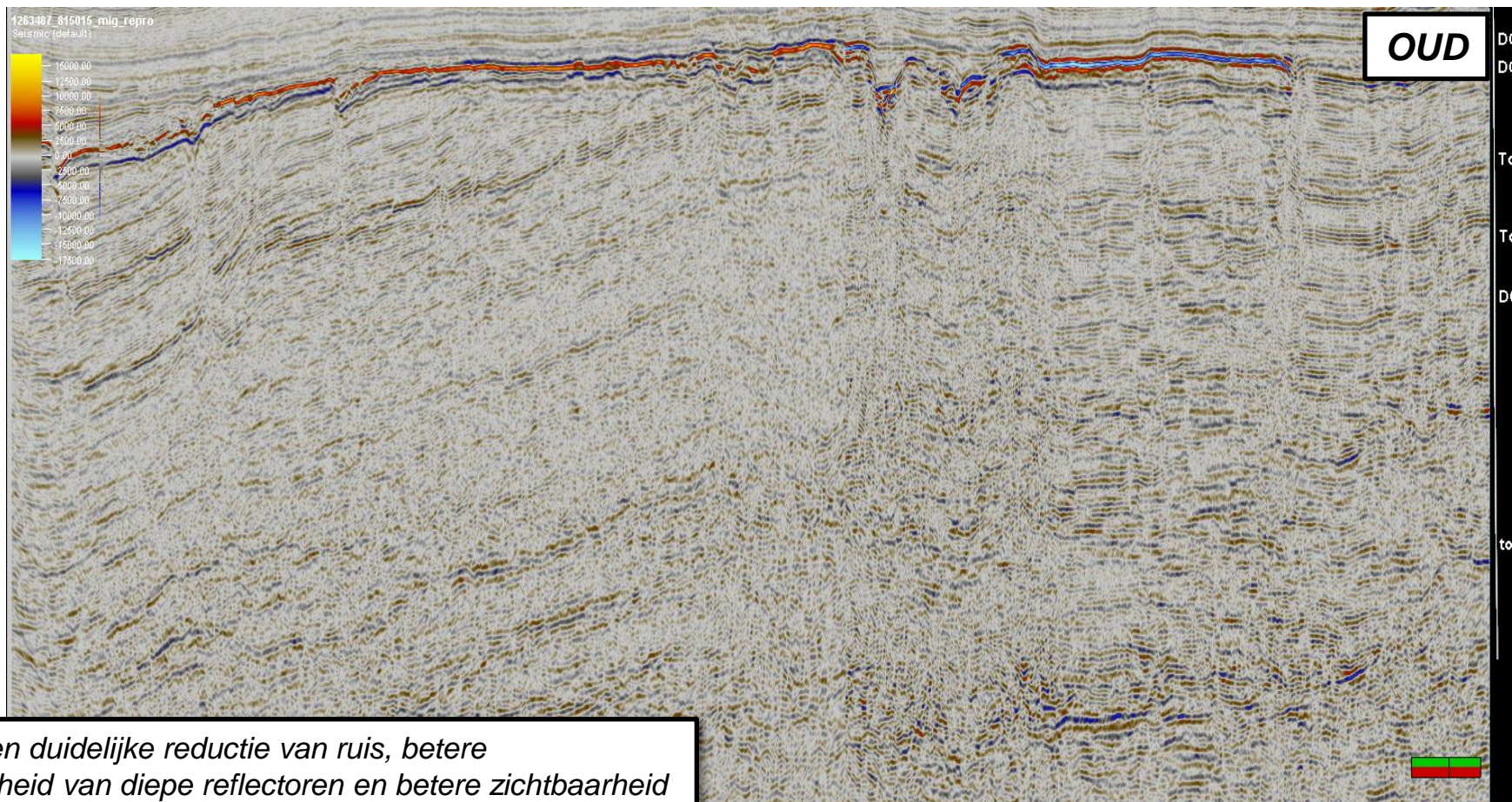
ORIGINAL LINE 803007: WELL CONTROL

- › De eerste stap is het vastknopen van LTG-01 aan het 3D blok ten noorden hiervan; zodoende weten we waar we zitten in de diepte
- › Dit is met de 2D seismische lijn van 803007R en 815015 gelukt om de verbinding te maken met het 3D blok L3PET199A

NB: Seismiek wordt doorgaans weergegeven in tijd (de tijd die geluidsgolven erover hebben gedaan om van de bron, via de laag, naar de geofon te komen; de zgn. two-way-travel-time, TWT)

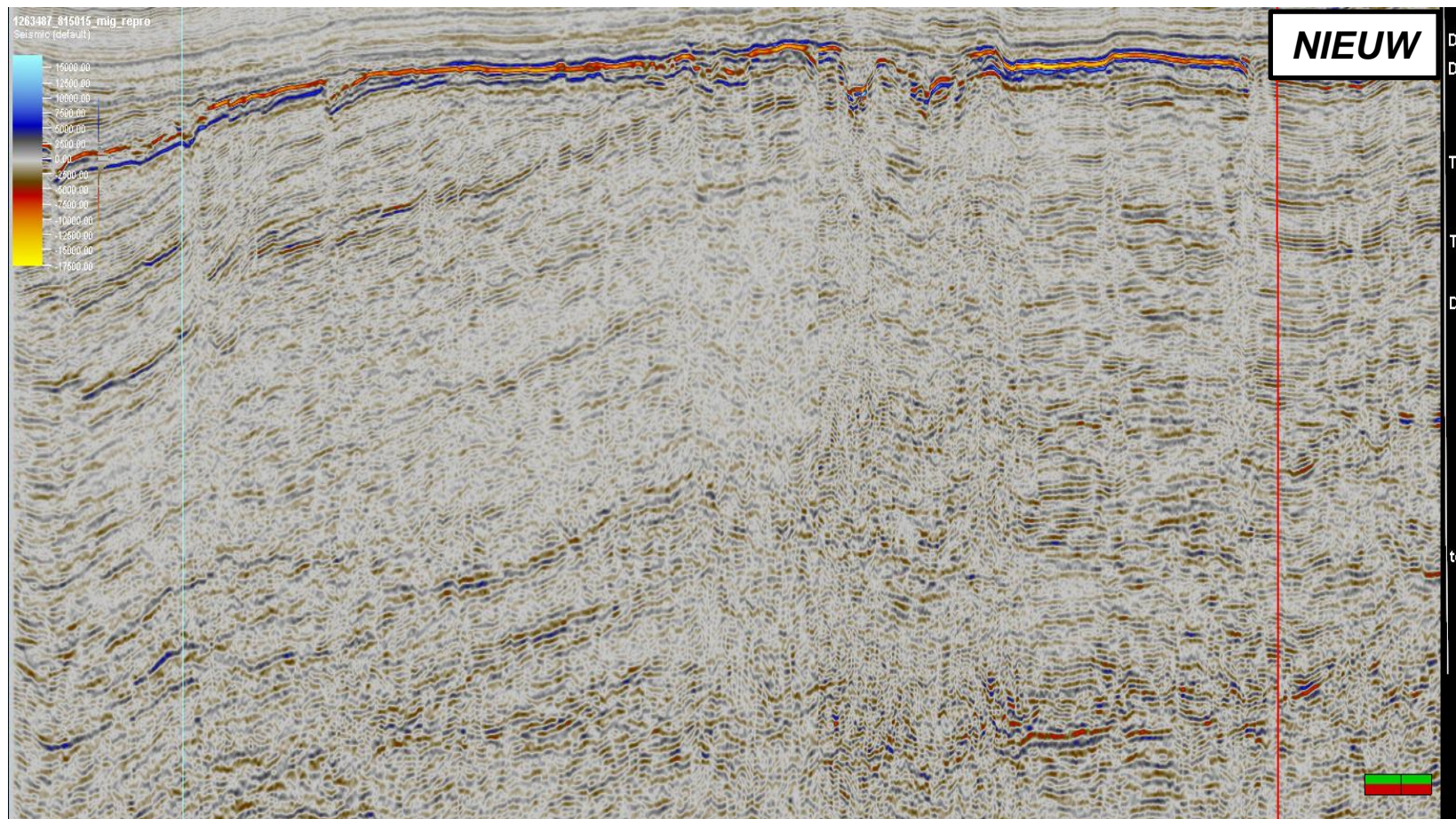


RESULTAAT VAN REPROCESSING 815015 (2D) EN



Dit levert een duidelijke reductie van ruis, betere traceerbaarheid van diepe reflectoren en betere zichtbaarheid van diepe breuken

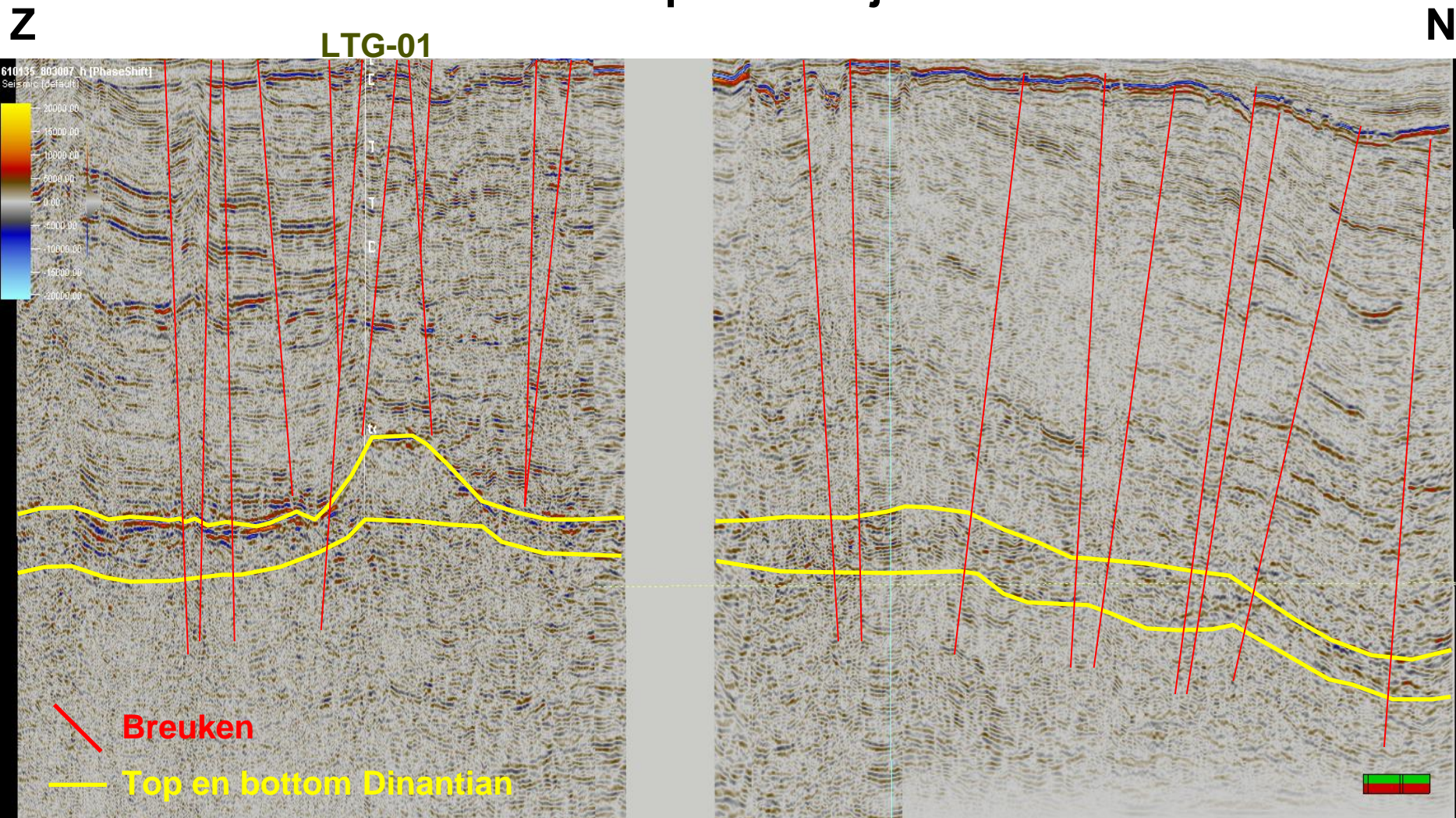
L3PET1999A (3D) SEISMISCHE SURVEYS



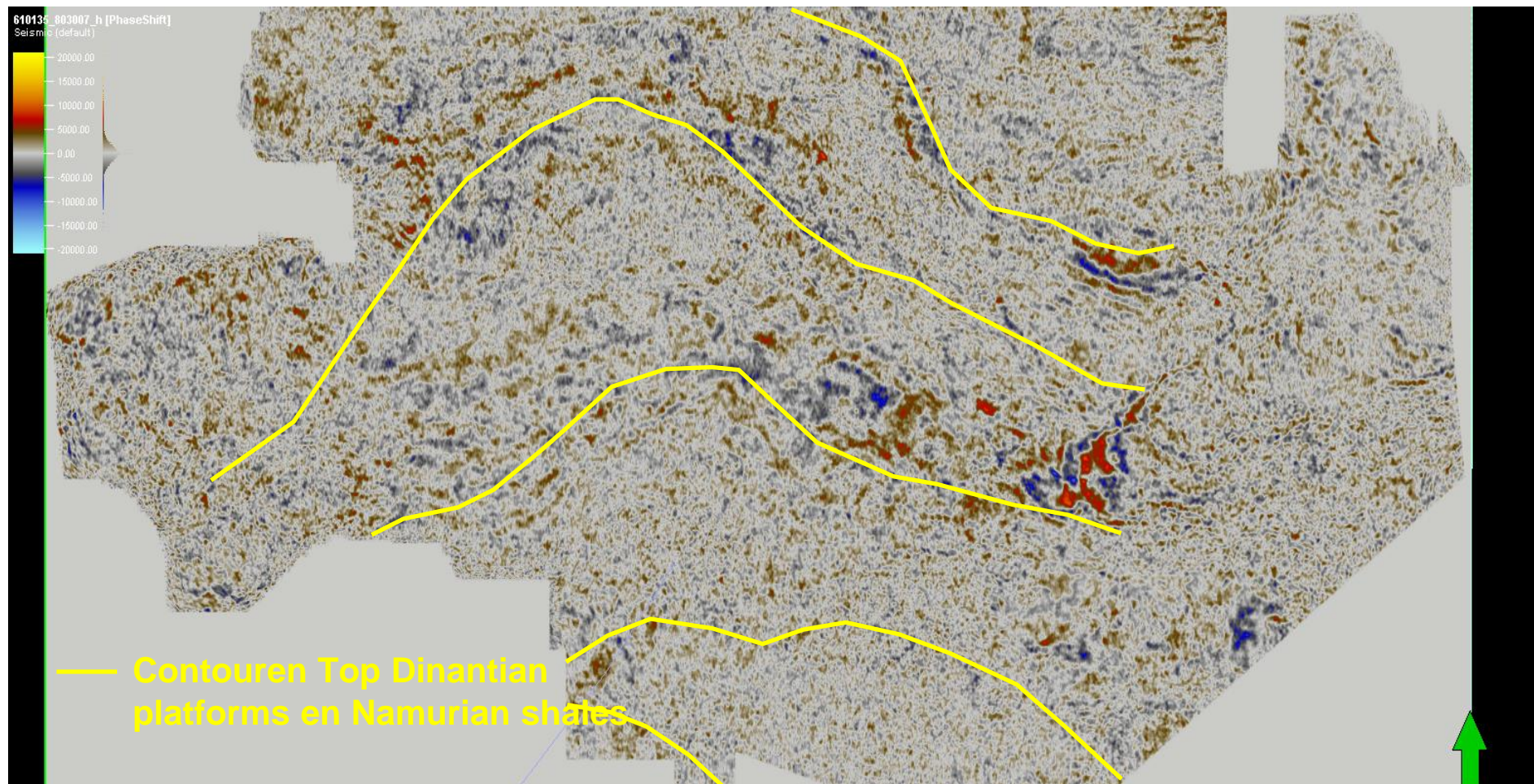
INTERPRETATIE OP BASIS VAN VERBETERDE SEISMIEK

- › Na het verbeteren van het beeld door de geofysicus, kan de geoloog aan de slag met de interpretatie
- › Op basis van de boorgatgegevens (in dit geval LTG-01) bepaalt de geoloog welke reflectoren behoren tot welke laag
- › De reflectoren kunnen dan gevolgd worden voor zover ze niet onderbroken/ duidelijk traceerbaar zijn
- › Onderweg kan een laag verdwijnen, kan een laag doorsneden worden door breuken of kan door veranderende eigenschappen het signaal veranderen
- › Het is aan de geoloog om al zijn kennis in te zetten hier een interpretatie van de maken
- › De interpretatie moet kloppen met de natuurwetten, bekende geologische verschijnselen en in een reconstructie moet de massabalans kloppen

Nieuwe interpretatie zijaanzicht



Nieuwe interpretatie bovenaanzicht Zgn. timeslice op +/- 5,5 km diepte



CONCLUSIE

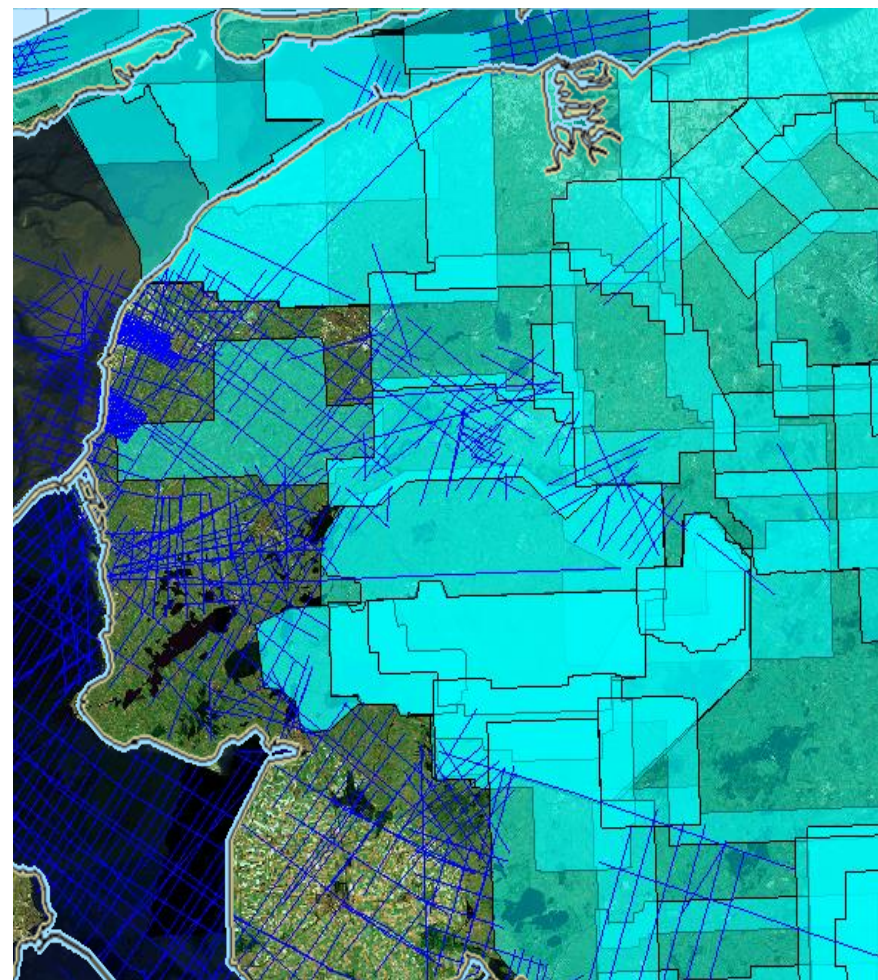
- › In dit project hebben we de eerste stappen gezet:
 - › *We zien voldoende verbetering om te concluderen dat:*
 - › *het mogelijk is om bestaande seismiek te verbeteren,*
 - › *hierdoor een betere interpretatie te maken, en*
 - › *hierdoor het exploratie risico te verkleinen*
- › Verder techniekontwikkeling voor seismische exploratie is nodig (en reeds gaande)
- › Wat voor het Luttelgeestplatform kan, kan ook voor andere gebieden met well-control en goede dekking van seismiek (waaronder in Noord Nederland het Friesland en het Groningen Platform)



HET BELANG



- › Dit zijn veelbelovende stappen op post stack data
- › Post stack data is (voor een groot deel) voor een minimale vergoeding (handling cost) verkrijgbaar
- › Opnieuw processen van pre-stack data is lastig:
 - › *Input data niet makkelijk verkrijgbaar*
 - › *Zeer tijds- en kapitaalintensief*
- › Deze innovatieve technieken en filters (die momenteel nog onder ontwikkeling zijn) geeft ons de mogelijkheid om voldoende focus te krijgen, met aanzienlijke voordelen.



ONDERZOEKSRICHTING 2: SLIJPPLAATJES

Mochten we met behulp van de innovatieve en nieuwe seismische processing technieken een verbeterd inzicht verkrijgen van de ultra-diepe ondergrond, dan is de volgende stap de eigenschappen van het gesteente in te schatten.

Dit is een zeer lastige exercitie, omdat we slechts op een paar datapunten kunnen voortbouwen: De boringen Luttelgeest en Uithuizermeeden.

In deze studie hebben we verzameld wat er bekend is van de geologie en petrografie van beide boringen. Daarnaast willen we kijken wat we kunnen aanvullen op die informatie door gebruik te maken van slijpplaatjes.

We hebben een foto van een slijpplaat van Uithuizermeeden gebruikt en van Luttelgeest hebben we een nieuwe slijpplaat laten maken die door TNO geanalyseerd is.

STARTPUNT: GEOLOGIE & PETROGRAFIE

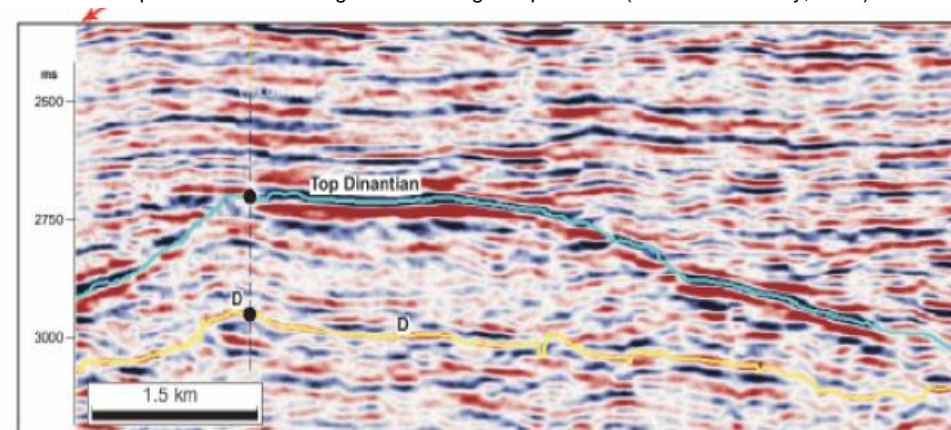
LTG-01

- De exacte locatie van de boorput op het carbonaatplatform is onduidelijk, maar waarschijnlijk is deze gepositioneerd aan de rand van het carbonaatplatform
- Monsters van de boorkern (dus op kleine schaal) geven een lage porositeit/ permeabiliteit weer
- Mud-losses zijn gerapporteerd (grotere schaal) dieper dan 4550 m
→ Dit kan een indicatie zijn van mogelijke fractures en openingen (zgn. vugs)
- Berekeningen op basis van deze mud-losses en druk metingen, geven een indicatie van hogere permeabiliteiten en duiden op de mogelijkheid van een fractured (verbreukt) reservoir

UHM-02

- Meest waarschijnlijk geboord in het hart van het Groningen platform
- Erg lage porositeit tussen de korrels van het gesteente (matrix~)
- Met calciet gevulde openingen (vugs) geven een indicatie van vroege karstificatie
- Er zijn geen indicaties gevonden van grote verbreukte intervallen of verhoogde porositeit

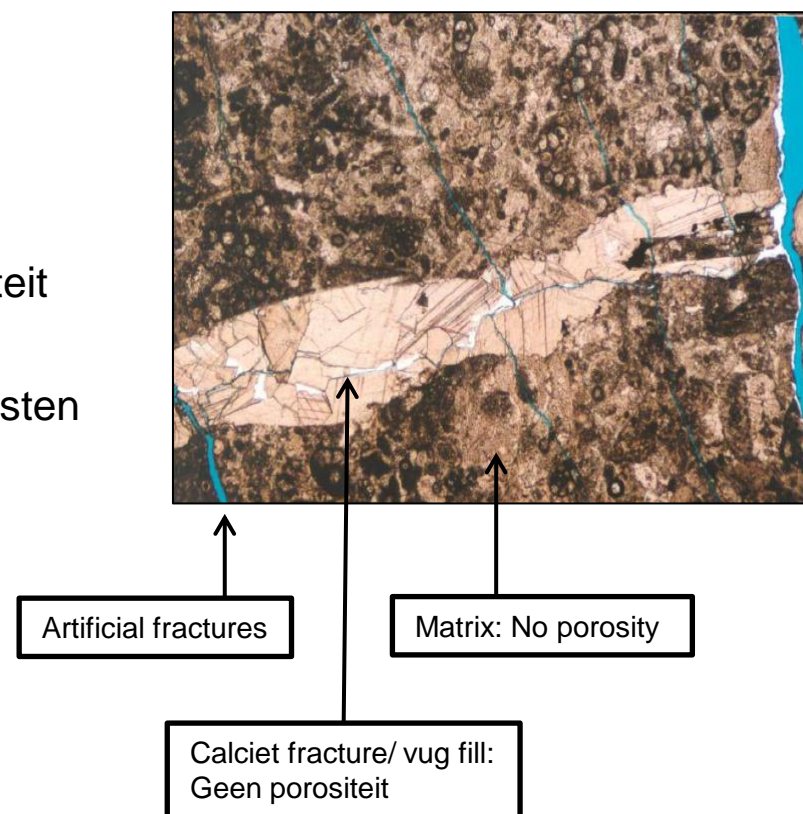
Seismic interpretations for Groningen and Luttelgeest platforms (van Hulten & Poty, 2009)



BETERE GRIP OF SECUNDAIRE POROSITEIT: UHM-02

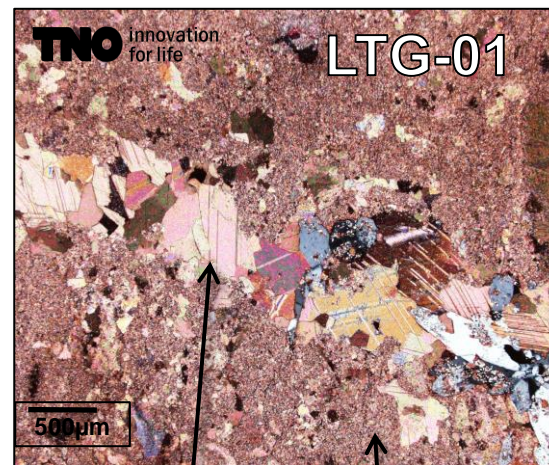
Slijpplaatje van UHM-02 (Gutteridge et al., 2002)

- › Analyse van slijpplaatjes geeft betere grip op:
 - › Afzettingsmilieu: geeft indicatie van de platformsetting
 - › Verkrijgen van indicaties voor karstificatie
 - › Diagenese: effecten op porositeit en permeabiliteit
- › Evaluatie van de permeabiliteit volgend uit de druktesten van UHM-02



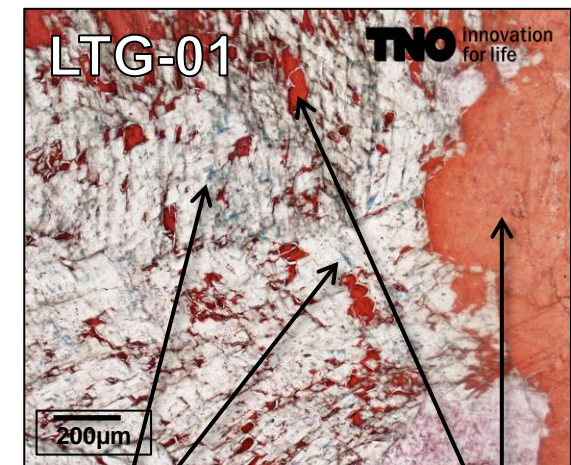
BETERE GRIP OF SECUNDAIRE POROSITEIT: LTG-01

- › Rechts de foto's van de nieuwe slijpplaatjes van LTG-01
- › Ook deze hebben we geanalyseerd op indicaties van karstificatie en diagenetische effecten op de porositeit/permeabiliteit
- › Een volgende stap zou een analyse van de facies zijn die een indicatie kunnen zijn van het afzettingsmilieu en de daarbij horende platformsetting



Calciet breukjes/vugs gevuld met calciet
 → geen porositeit
 → vroege karst?

Matrix: Geen Porositeit



Hoge Temperatuur Dolomiet
 → lage porositeit

diagenetische calciet (rood)
 → Geen Porositeit

ONDERZOEKSRICHTING 3: LOGS

Waar slijpplaatjes inzicht geven op een zeer kleine (en lokale) schaal, die indicatief zijn voor de processen die zich hebben afgespeeld sinds afzetting, is het lastig om dit te vertalen naar karakteristieken voor een groter diepteinterval.

Om inzicht te krijgen hoe deze eigenschappen zich verhouden/ zich laten vertalen naar boven en onder, kan er gekeken worden naar indicaties en metingen uit de logs. Logs zijn metingen en registraties van informatie uit het boorgat, afgezet tegen de diepte.

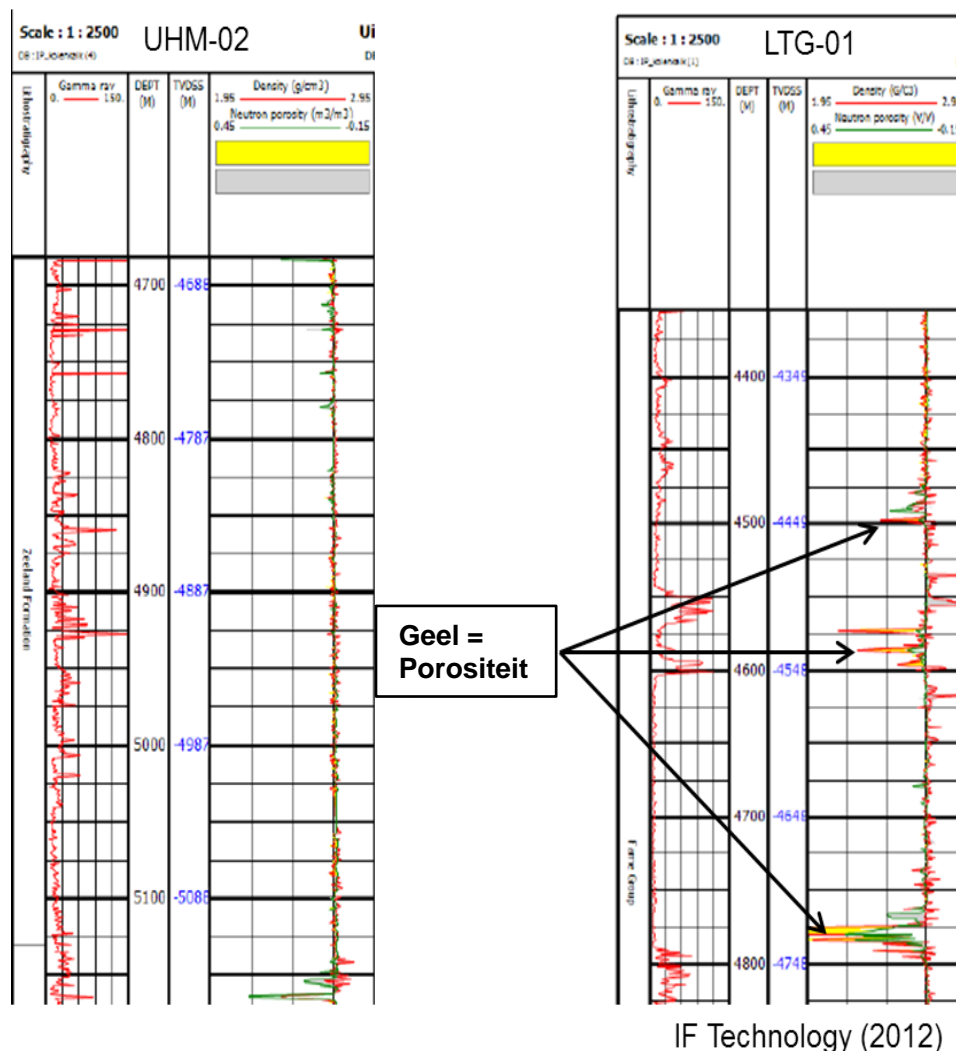
Op de volgende pagina's staan we kort stil bij welke informatie beschikbaar is en welke inzichten ons dit verschaft ten aanzien van indicatoren van (secundaire) permeabiliteit.

BETER BEGRIP UIT UTM/LTG LOGS

Door de techniek van het over elkaar leggen van de neutron porositeits- en de dichtheidslog krijg je een indicatie van de poreuze gebieden met mogelijk hoge permeabiliteit

Logs van de UHM-01 boring (Groningen Platform) laten geen significante porositeit zien

Logs van de LTG-01 boring (Luttelgeest Platform) laat verschillende niveaus van verhoogde porositeit zien

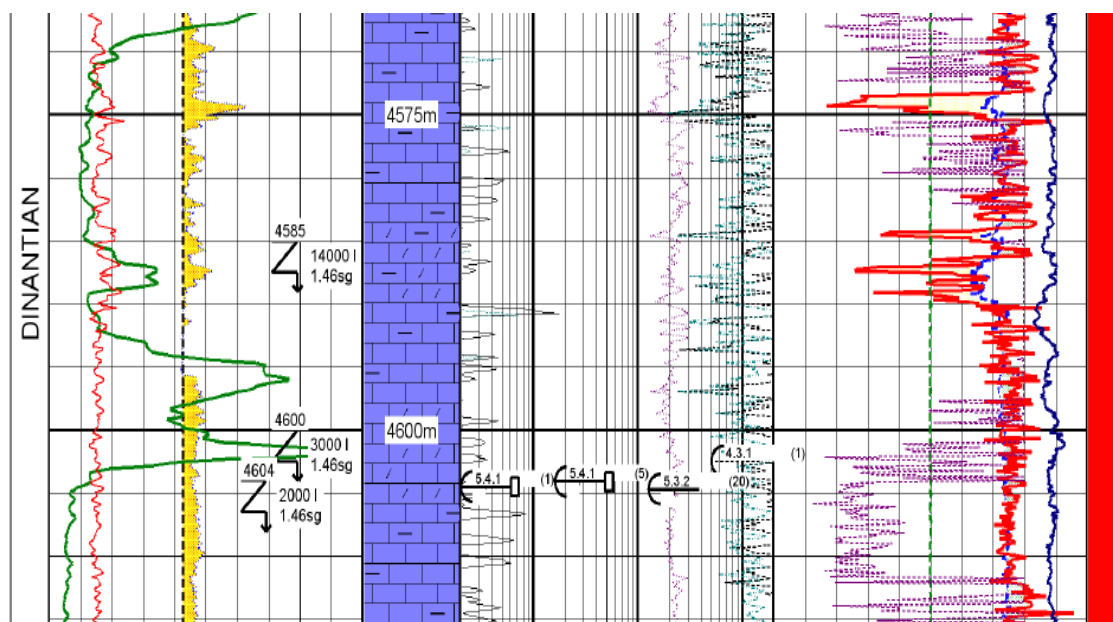


POROSITEITSMETINGEN/-AFGELEIDEN

- › Er zijn vele bronnen die een indicatie kunnen geven van de porositeit en permeabiliteit
- › Voor de Luttelgeest boring zien we grote verschillen tussen de afgeleide permeabiliteit uit monsters en uit de putmetingen / wireline logging

NB: links een screen capture van de boorlogs van LTG-01. De groene lijn is de gamma ray log, te geel gearceerde gebieden laat zien hoeveel ruimte er zit tussen de diameter van het boorgat en grootte van de boorkop. De zwarte lijntje geven aan waar er mud-lossen zijn opgetreden. De rode lijn geeft de dichtheid aan (bulk~). De lichtblauwe lijn is de neutron log.

→ Zie de glossary voor meer achtergrondinformatie



PERMEABILITEIT



Depth(m)	Permeability	Estimate of the transmissivity		
m	mDarcy/cPoise	mDarcy	m ²	
4534,9	0,50	48	4,8 10 ⁻¹⁴	20 mDarcy x 100 m = 2,0Darcym
4602,5	0,11	10	1,0 10 ⁻¹⁴	300 mDarcy x 0,5 m = 0,15 Darcym
4604,1	6,30	598	5,99 10 ⁻¹³	
4604,5	1,40	133	1,33 10 ⁻¹³	Total 2 Darcym or 2 10 ⁻¹² m ³
4604,7	2,20	209	2,09 10 ⁻¹³	
4646,8	0,20	19	1,9 10 ⁻¹⁴	

Rock Samples:
Geeft inzicht in de eigenschappen op de schaal van een monster en daarmee een indicatie van de natuurlijke porositeit

Wireline logging:
Geeft inzicht in de bulk eigenschappen en over een groter interval

Sample no. - Measurement	Depth(m)	Por.	Permeability	Estimate of the transmissivity	
	m	%	mDarcy	m ²	
Sample 1 - 3a	4378,05	1,30	7,70	7.70 10 ⁻¹⁵	5 mD. x 100 m = 0.5 Darcym or 5 10 ⁻¹³ m ³
Sample 2 - 2a	4470.40	1.60	9.60	9.60 10 ⁻¹⁵	
Sample 2 - 2b	4471.25	1.30	1.00	1.30 10 ⁻¹⁵	
Sample 2 - 2c	4472.70	1.00	0.20	0.20 10 ⁻¹⁵	

→ **Gemiddeld voor nu genomen op 60 mD**

VERGELIJKING MET ANALOOG

Ter vergelijking hebben we twee passende analogen gevonden:
Kashagan en Tengiz platforms, beiden in Kazachstan

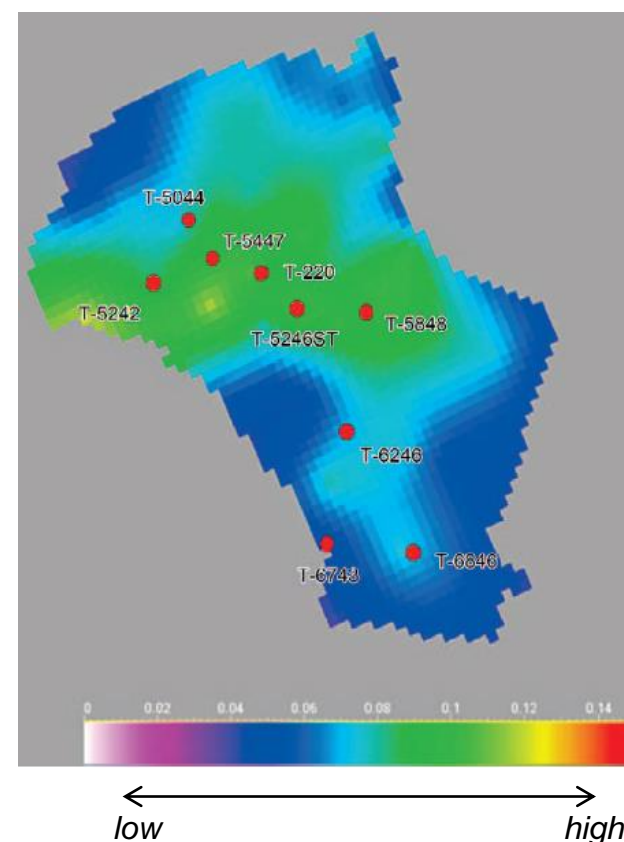
- Hart van het platform: de permeabiliteit is in het algemeen bepaald door de primaire (natuurlijke) porositeit en is van betere reservoir kwaliteit
- De rand van het platform is hoofdzakelijk gekarakteriseerd door secundaire porositeit en permeabiliteit veroorzaakt door verbreukingen en karstificatie
- Bekken: zeer lage porositeit en permeabiliteit

De platformen in Kazachstan en Noord Nederland komen overeen qua geometrie (vorm) en diepte.

Het is wel een groot verschil dat in Noord Nederland t.o.v. Kazachstan vrijwel geen primaire porositeit/permeabiliteit is behouden

NB: de Kolenkalken in het zuiden van Nederland hebben dezelfde ouderdom, maar wezenlijk andere ontstaansgeschiedenis en eigenschappen

Gemiddelde porositeitsverdeling in het Tengiz platform (Collins et al., 2009)



OPLOSSINGSRICHTING 4: MODELLEN

Betere grip op de geometrie en de eigenschappen, kan de onderzoeker bewegen zijn modellen aan te passen en daarmee een betere benadering van de werkelijkheid te modelleren.

Voor een verbetering van het temperatuurmodel is het van belang dat de meest recente data en kennis gebruikt wordt:

1. Nieuwe inzichten in de complexe convectie
2. Eigenschappen van het gesteente door afzetting en latere processen bij begraving
3. Bestaande vormen en structuren die invloed hebben op stroming, geleiding en drukken

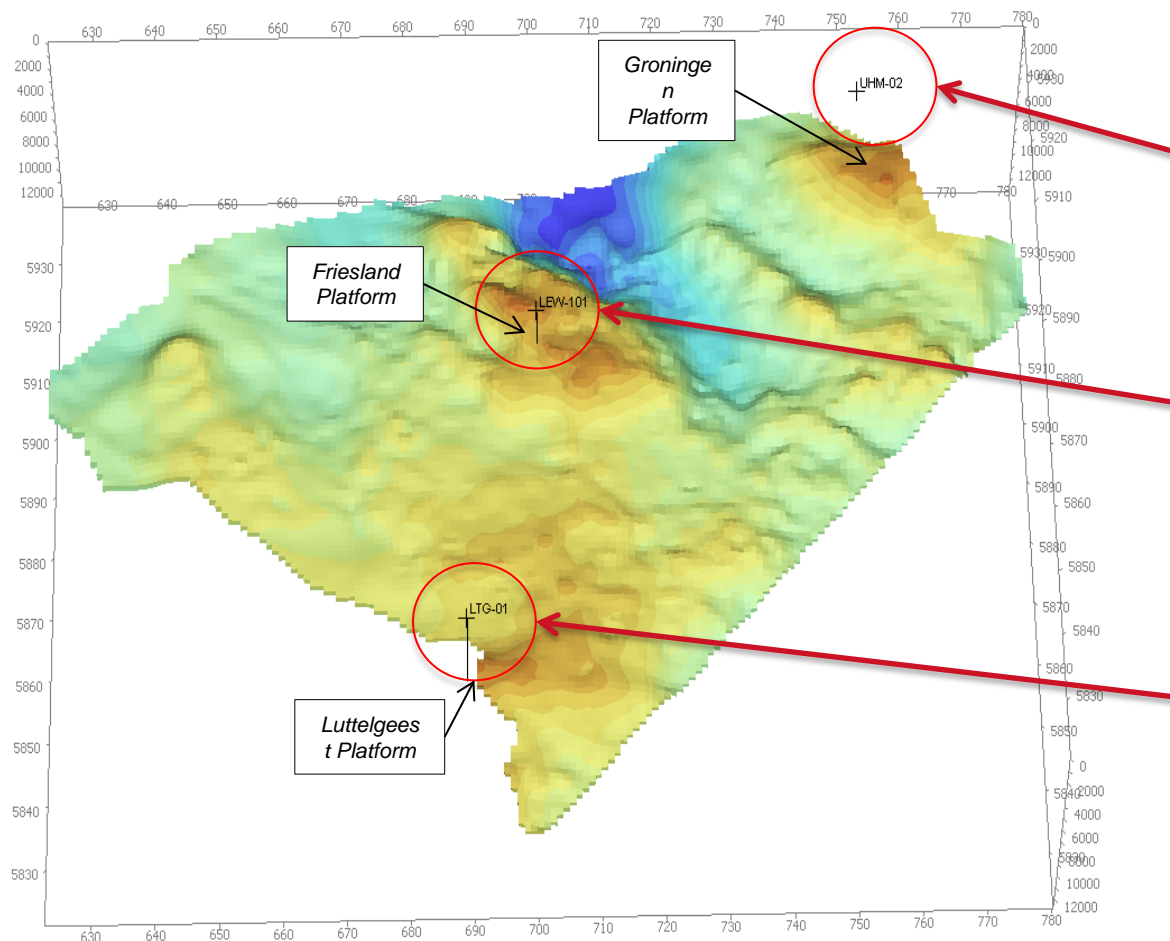
De expertise die zich hiermee bezig houdt heet 'basin modelling'. In de volgende paar slides geven we inzicht in de huidige stand van zaken en wat het startpunt zou zijn van een nieuw temperatuurmodel

HUIDIG ONDERGRONDMODEL VAN FRIESLAND

Gevisualiseerd een dieptekaart van de top van het Dinantien (uit het huidige 3D model van N.NL)

De donkerbruine, hoger gelegen gebieden zijn typisch de platformen

Het donkerblauwe, diepe gebied in het noorden is de Hantum breuk die tussen het Groningen en Friesland Platform doorloopt



UTM-02 op het Groningen Platform

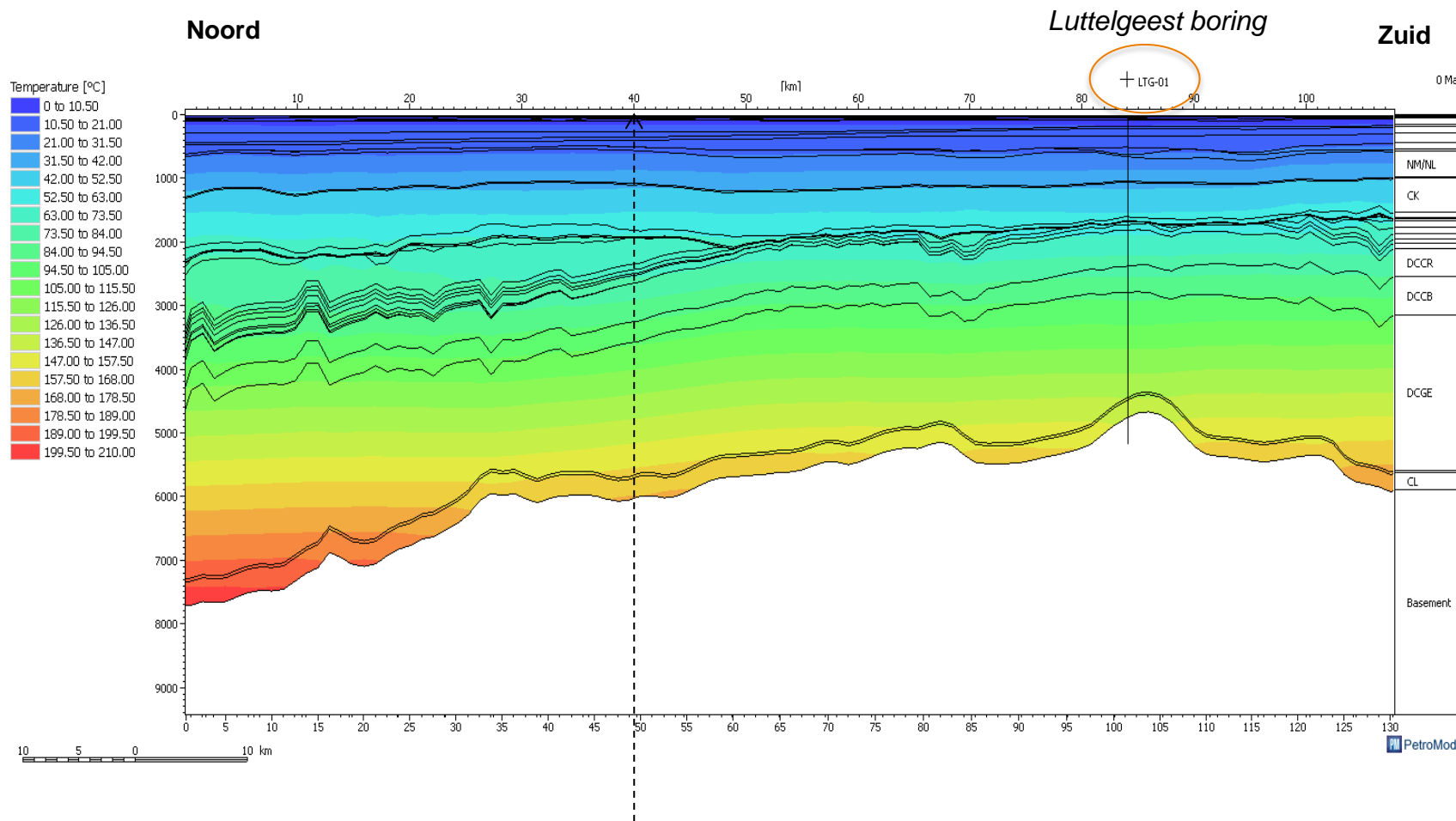
LEW-101 (als referentie voor locatie) op het Groningen Platform

LTG-01 op het Lutjelgeest Platform

HUIDIGE TEMPERATUURMODEL VAN NOORD NEDERLAND

- › Met behulp van geavanceerde bekkenmodelleringsoftware is in het kader van de onderzoekstaak die de geologische dienst van Nederland heeft voor de overheid, een 3D model van de Nederlandse ondergrond gemaakt
- › Dit model geeft op basis van empirisch vastgestelde gesteente eigenschappen, wetmatigheden die de processen in de ondergrond beschrijven en randvoorwaarden door de tijd heen (o.a. een klimaatmodel) een weergave van de huidige omstandigheden en eigenschappen
- › Dit is een modelmatige weergave op basis van de kennis die we nu hebben

HUIDIGE GEMODELLEERDE (!!) TEMPERATUURPROFIEL NOORD-ZUID



Projectie van de locatie van Leeuwarden

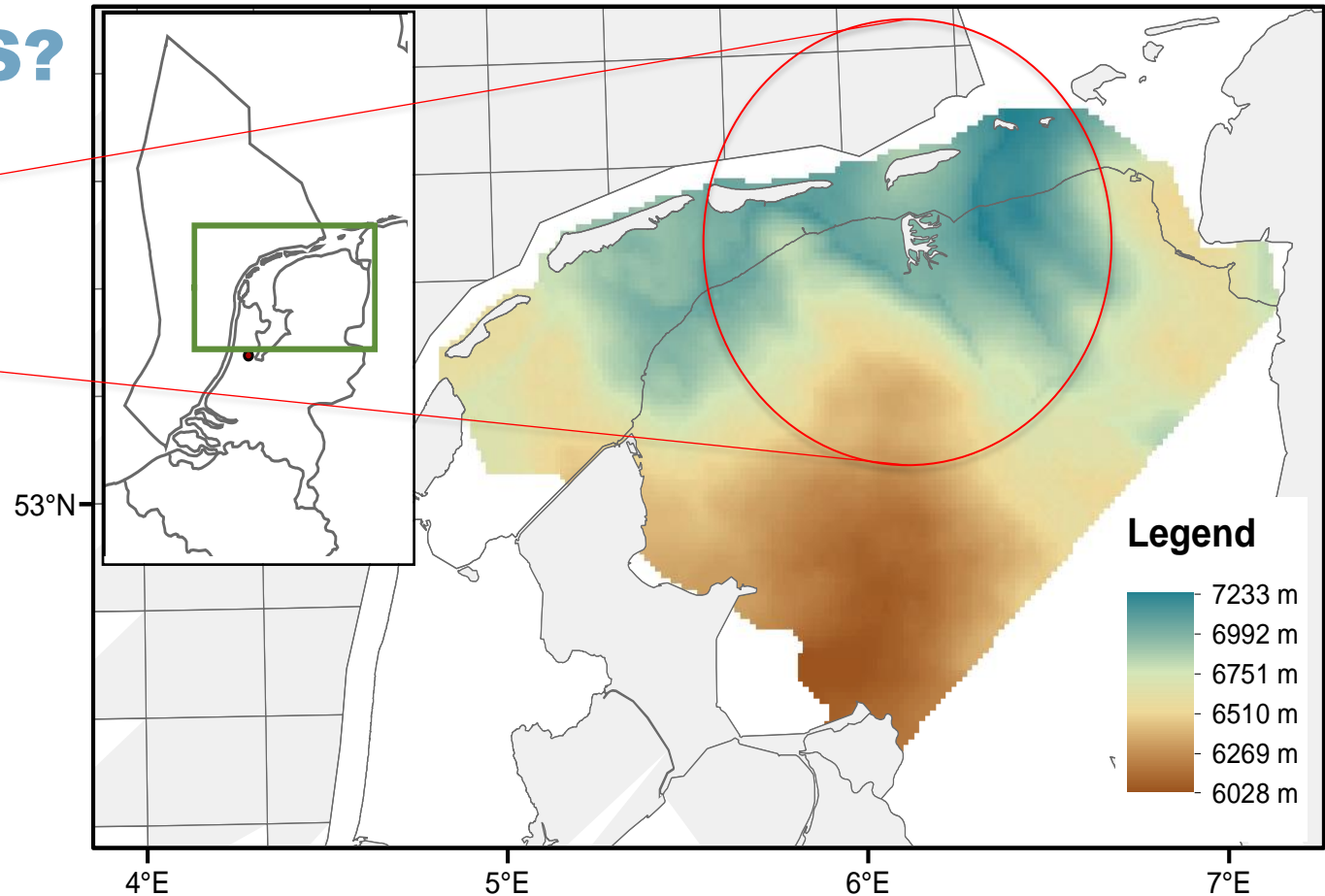
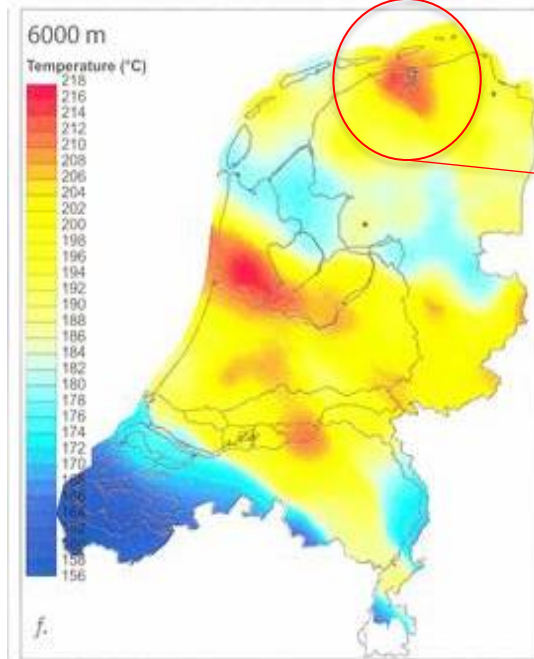
OBSERVATIES IN HET HUIDIGE T-MODEL

- › De ultra-diepe ondergrond is nog erg onbekend en slecht begrepen
- › In het huidige model treffen we de benodigde temperatuur pas aan op grote diepte aan (> 6km)
- › De metingen aan LTG-01 komen niet overeen met de gemodelleerde waarden in dit model
- › Een van de mogelijke oorzaken hiervoor zou kunnen zijn omdat er in dit model geen rekening wordt gehouden met mogelijke convectie (cellen).

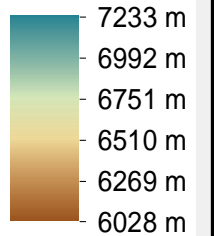
- › Er is dus een duidelijke verbeter slag nodig om:
 - A. Met grotere zekerheid een geschikte locatie te kunnen bepalen
 - B. De onnauwkeurigheid op de eerste schetsen van de business case te reduceren

DUS HOE DIEP LIGT DE 190 GRADEN GRENS?

*NB: No calibration data
available!*



Legend



Dieptekaart van de 190 graden grens

KUNNEN WE EEN VERBETERSLAG MAKEN IN DE TARGETDIEPTE?

- › De gewenste diepte gebaseerd op de gemiddelde gradiënt is ~5,5 km, maar sterk afhankelijk van lokale, geologische karakteristieken
- › Derhalve kan de regionale temperatuur gemodelleerd worden met de aanwezige kennis (zoals de temperaturen in vorige slide)
- › Het huidige temperatuurbeeld van Dinantiën is vanwege de gebrekkige data erg model afhankelijk...
- › **Gebaseerd op de huidige modellen moet je rekenen op een diepte van 6 tot 6,5 km**
- › Echter, in deze modellen is de nieuw ontwikkelde kennis (bijv. de effecten van convectie) nog niet meegenomen
- › Met behulp van de nieuwe kennis moet de targetdiepte aangescherpt kunnen worden.



STIMULERINGSTECHNIEKEN

BEPERKINGEN VAN HET GESTEENTE OP GROTE DIEPTE

- › In deze studie lieten we al zien dat de natuurlijke doorlatendheid tekort schiet om hieruit direct te produceren met een debiet van 150-300 m³/uur
- › Daarom zullen we de omstandigheden geschikt moeten maken
- › Dit moet gebeuren zonder (onbedoelde) schadelijke effecten voor de omgeving:
 - › Denk daarbij aan schadelijke chemicaliën of geïnduceerde seismiciteit
- › Mede daarom verkennen we de mogelijkheden van zgn. 'soft stimulation'

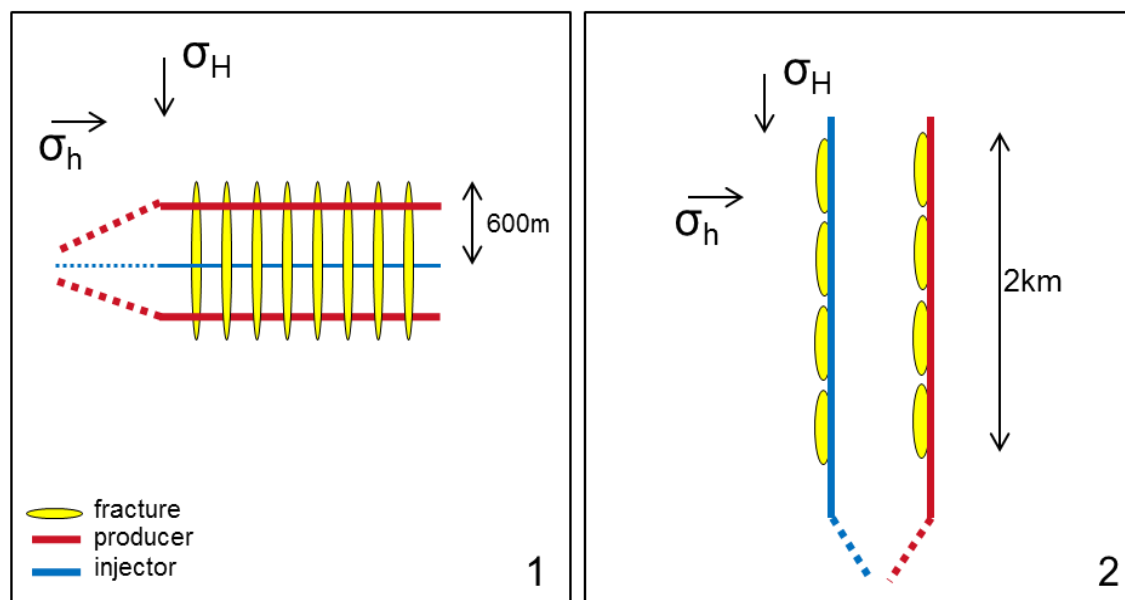
INVENTARISATIE STIMULATIETECHNIEKEN

Type of treatment	Well Stimulation Technique
Chemical	Matrix Acidizing (HCl or HCl+HF)
Chemical and mechanical	Fracture Acidizing
	Coiled Tubing Acid Stimulation
Hydraulic	Hydraulic Fracking (Tensile mode)
	Hydroshearing (Shear mode)
Thermal	Thermal Fracturing
Thermal and hydraulic	Thermal (cryogenic) Fracking**
Special drilling techniques	Radial Jetting
	Fishbone
	Casing Perforation
Mechanical	High Energy Gas Fracturing (HEGF) or Explosive Stimulation
Acoustic	Acoustic Well Stimulation (AWS)**
Electric	Electric Stimulation**

Type of treatment	Well Stimulation Technique	Description	Drawbacks	Treated In OTC	Geological settings	Case study	Parental Service Company	Industria Class*
Chemical	Matrix acidizing (HCl or HCl+HF)	Matrix acidizing is done through the matrix with natural fractures being placed in the matrix with acidizing. Acidizing is done with low pH (low pH) acidizing. Acidizing is done with low pH (low pH) acidizing. Acidizing is done with low pH (low pH) acidizing.	Acidizing minerals (and/or) limited acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes and no (low pH acidizing in hydrocarbon industry).	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Low-Medium
Chemical and mechanical	Fracture acidizing	It is performed above fracture planes and reservoir to create fractures, as acid is transported, dissolution occurs and conductivity is increased (Khalil, 2007).	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
	Coiled Tubing Acid Stimulation	A combination of treatment using coiled tubing and acidizing. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
Hydraulic	Hydraulic Fracking (Tensile mode)	High-pressure fluid is injected into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	High
	Hydroshearing (Shear mode)	High-pressure fluid is injected into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	High
Thermal	Thermal Fracturing	Thermal fracturing is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
Thermal and hydraulic	Thermal (cryogenic) Fracking**	Thermal fracturing is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
Special drilling techniques	Radial Jetting	Radial jetting is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
	Fishbone	Fishbone is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
	Casing Perforation	Casing perforation is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
Mechanical	High Energy Gas Fracturing (HEGF) or Explosive Stimulation	High energy gas fracturing is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
Acoustic	Acoustic Well Stimulation (AWS)**	Acoustic well stimulation is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium
Electric	Electric Stimulation**	Electric stimulation is done by injecting a fluid into the reservoir to create fractures. It is used to stimulate the reservoir and to create fractures.	Fracture acidizing. Fracture acidizing. Fracture acidizing.	Yes	Carbonates, Sandstones, Gels, etc.	USA, Canada, Mexico, etc.	Schlumberger, Baker Hughes, etc.	Medium

SCENARIOS...

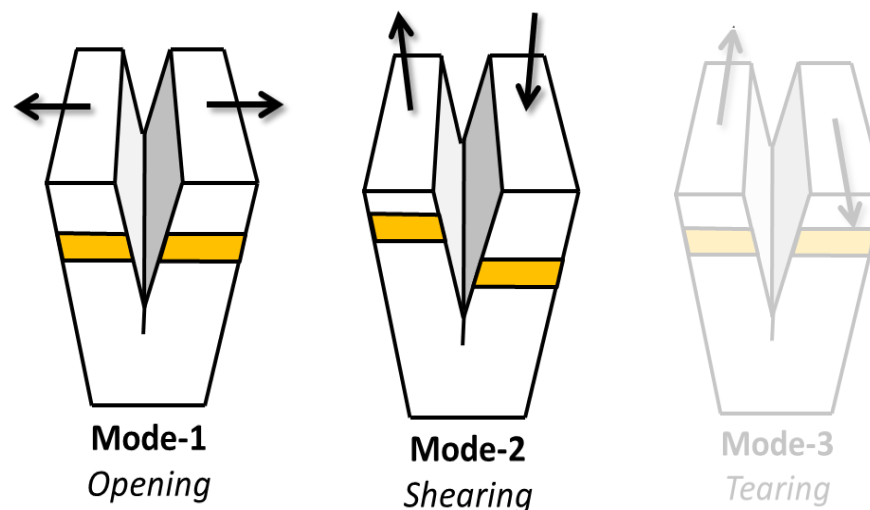
- › Scenario 1 gaat uit van een ondoorlatend gesteente en vraagt derhalve een groter aantal fracks.
- › Scenario 2 tapt in op bestaande doorlatendheid en kan door een andere configuratie volstaan met minder fracks.
- › Uiteindelijk kosten hangen af van keuze techniek, eigenschappen van de ondergrond, ontwerp van de installaties, etc.



STIMULERINGSSCENARIOS

- › Gelet op de grote diepte en bijzondere omstandigheden, richten we ons op hydraulische stimulatie
- › Er zijn twee modi in hydraulische stimuleren:
 - › Mode-1 stimulatie, hierbij ontstaan tensile fracs: het gesteente opent
 - › Mode-2 stimulatie, hierbij ontstaan shear fracs: het gesteente verbreekt en schuift langs elkaar
- › De voorkeur gaat naar mode-1 stimulatie, omdat daar geen tot zeer weinig seismiciteit mee geassocieerd is

NB. Mode-1 Stimulatie (hydraulisch) is tevens onderdeel van het H2020 project 'DESTRESS'



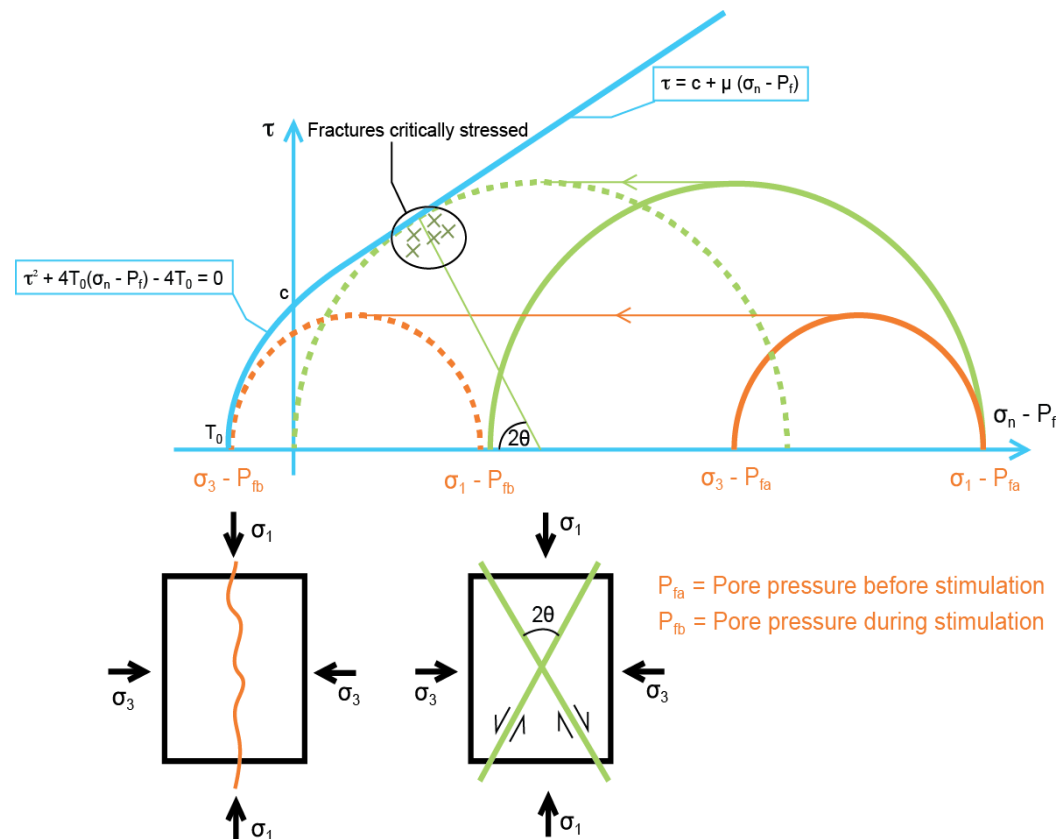
HYDRAULIC MODE-1 STIMULATION

Opgetreden seismiciteit bij EGS installaties in Europa zijn geassocieerd met mode-2 stimulatie

- › Bijvoorbeeld bewegingen langs bestaande breuken, zgn. reactivatie van breuken

Dit te voorkomen door (= H2020 DESTRESS)

- › Slim ontwerp (upfront modelleren) van de stimulatie
- › Stimuleren met lage differentiële stress om re-activatie te voorkomen
- › Gebruik hoog viskeuze vloeistoffen ter voorkoming shear in bestaande breuken



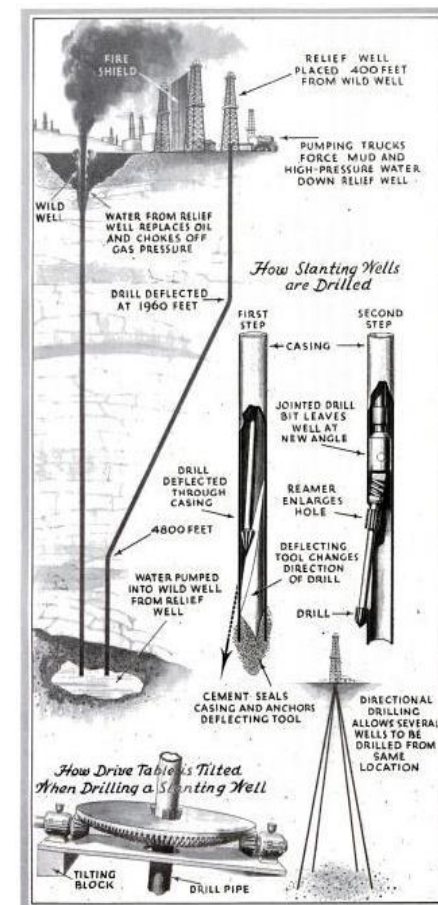
PERFORMANCE VERBETERING

Het is natuurlijk mogelijk om verschillende technieken met elkaar te combineren, echter mag je de resulterende skin niet zomaar bij elkaar optellen.

Hieronder het resultaat van een mathematische benadering om inzicht te krijgen in de performance verbetering van gecombineerde technieken

	Skin	Improvement	Combined	Slanted	Bilateral	Acid	Frac
Slanted	- 1,5	19%		→	-	60-70%	64%
Bilateral	- 3,4	56%	→	-	-	90%	300-400%
Acid 1 m	- 2,2	30%	→	-	-	-	180%
Frac 100m	- 6,1	180%	→	-	-	-	-

NB: Bilateral is een senario van twee verticale boorputten 100m uit elkaar op reservoirniveau

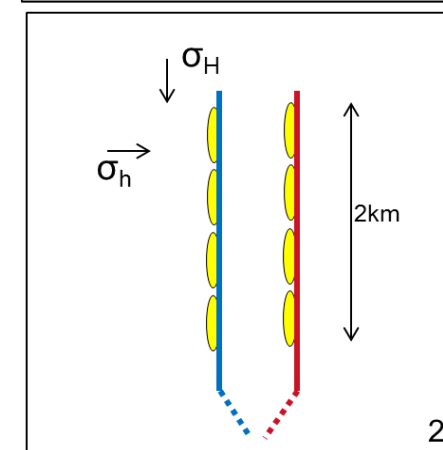
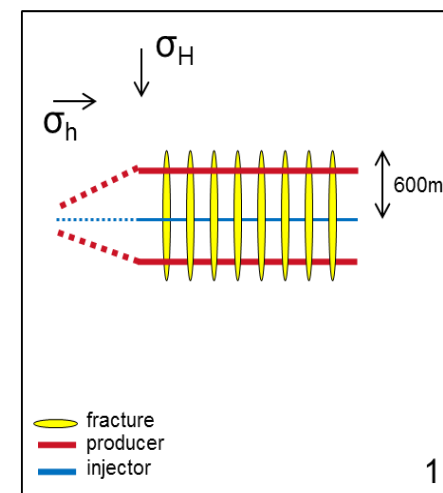


Bron: Popular Science – May 1934

Strange Tools Revolutionize Drilling and Open Way to Development of Fields Under Mountains or Beneath Sea's Floor

KOSTEN VAN HYDRAULISCH STIMULEREN

- › EU studie (GEOELEC) naar gedragen resource base voor elektriciteitsopwekking met geothermie:
 - › Optimistische scenario's waarin € 10 mln wordt gebruikt
- › Realistischer (met in achtning van approach):
 1. Ondoorlatend gesteente (figuur 1):
 - › Werkend naar een debiet van 150-300 m³/h (uitgaande van een totaal aantal benodigde fracs 9 tot 17)
 - › Stimuleringskosten: € 20 – 50 mln
 2. Doorlatend gesteente (figuur 2):
 - › Afhankelijk van de ondergrond (m.n. bestaande fracture networks en karstificatie) kan dit aanzienlijk minder zijn dan onder punt 1.



KIEZEN TUSSEN DE SCENARIO'S

- › Alvorens een keuze te maken, is het van zeer groot belang er bij stil te staan dat deze techniek nog nergens ter wereld daadwerkelijk is vertoont!
- › De keuze tussen de lay-out van de fracks bij het Hydraulisch Mode-1 Stimuleren is afhankelijk van het aldanniet kunnen aantappen op natuurlijke doorlatendheid
- › Minimaal moet je dan rekenen op een doorlatendheid hoger dan 5 mD
- › Uit de eerste – schaarse – gegevens blijkt dat de gemiddelde doorlatendheid ergens schommelt tussen de 30 en 60 mD, maar dat het uiteen kan lopen van bijna niets tot bijna 600 mD
- › Hoewel deze waarden per locatie kan verschillen, laat het wel zien dat het loont om hier goed grip op te krijgen. Daarbij moet je denken aan (maar niet uitsluitend):
 - › Locatie van de platformen, want secundaire doorlatendheid is veelal daarmee geassocieerd
 - › Locatie op de platformen, want verbreukingen vind je typisch in de randen van een platform
 - › Goed begrip van de geologische geschiedenis (uplift/ zeespiegelfluctuaties), omdat het aldanniet vroegere droog vallen van het platform van belang kan zijn van mogelijke karstificatie

RISICOREDUCTIE

RISICO VERKLEINEN?

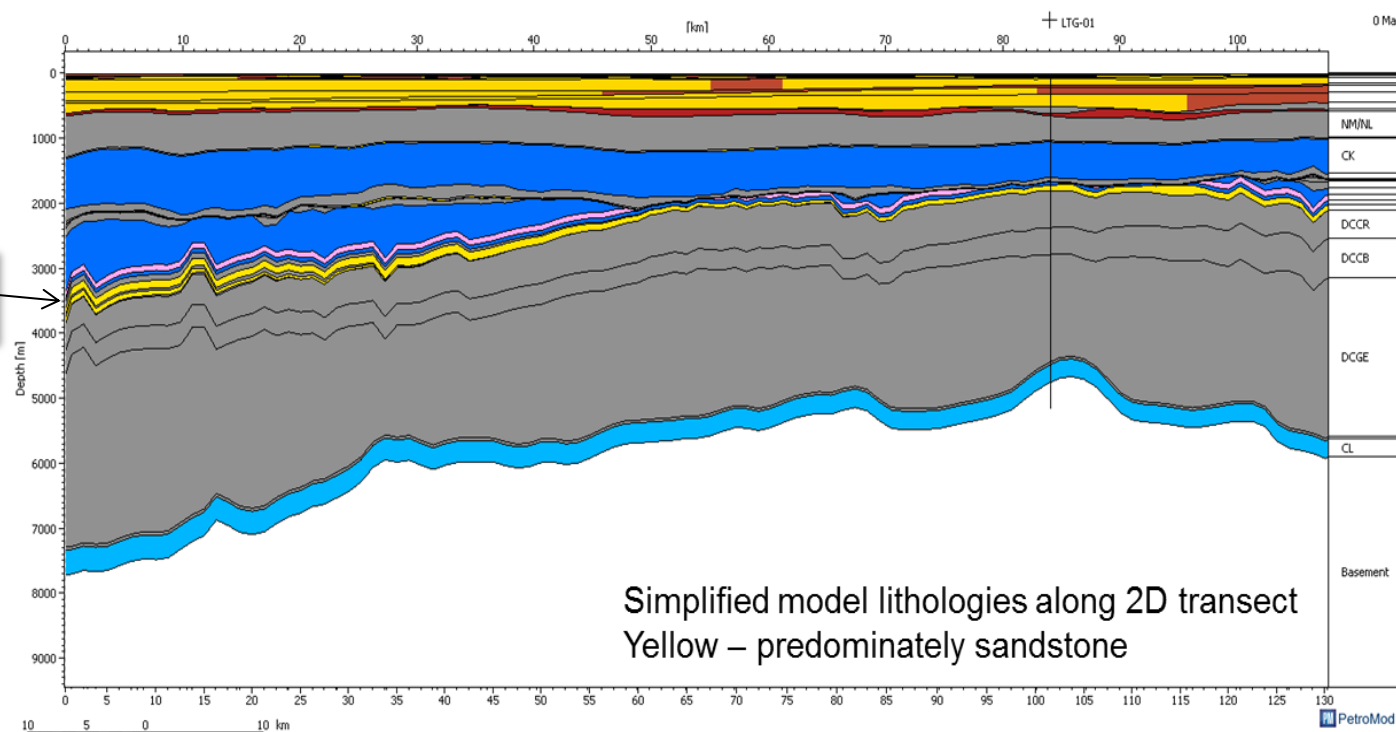
- › Zoals eerder al genoemd zijn zowel de capex als de onzekerheden (nog) zeer hoog. Daarom loont het om te bedenken hoe we de onzekerheid op de investeringen te verkleinen
- › Dit kan door:
 - › Fall-back scenario's te definiëren, zoals bijvoorbeeld een ondiepere laag met lage onzekerheden om het risico m.b.t. de ROI te verkleinen
 - › Het uitvoeren van gedegen onderzoek om de technische onzekerheden te verkleinen
 - › Een zorgvuldige locatieselectie (minimale productiediepte) voor een eerste proefboring, om de initiële investeringen zo laag mogelijk te houden
- › Dit hoeft – gelet de nog generieke uitdagingen – niet door één partij gedragen te worden:
 - › Samenwerking in gezamenlijke projecten
 - › Cofinanciering Nederlandse overheid, aldanniet binnen de topsectoren
 - › Onderzoeksbudgetten zoals het Europese Horizon 2020

ZIJN ER ALTERNATIEVEN ONDIEPER DIE BIJ FALEN EEN FALL BACK BIEDEN?

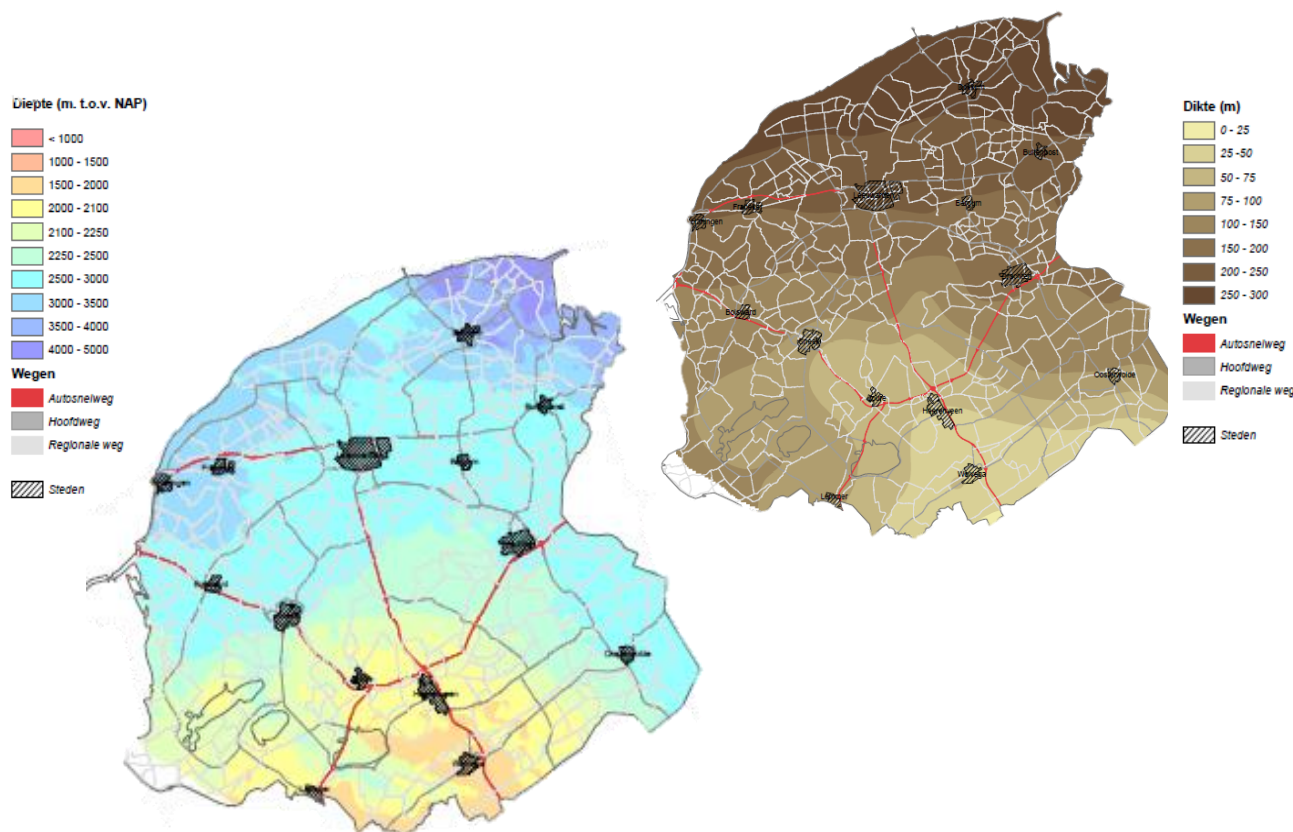
- › Indien een toekomstige (proef) boring naar het Dinantien uitwijst dat de heersende doorlatendheid, temperatuur of andere eigenschappen ongeschikt zijn om een sluitende business case te maken, zijn er alternatieven in de ondergrond voor succesvolle fall-back?
- › Het is mogelijk om een side-track (een afsplitsing) te maken bij ondiepere intervallen om aan te tappen op ondiepere geothermische reservoirs;
- › Bewezen formaties in Nederland zijn de Trias en het Rotliegend.

ZIJN ER ALTERNATIEVEN IN DE ONDERGROND?

- › In delen van Friesland, uitgaande dat we dan over direct gebruik van de warmte spreken, zijn er alternatieve targets.



FALL BACK: GEOTHERMIE (WARMTE) UIT HET ROTLIEGEND?



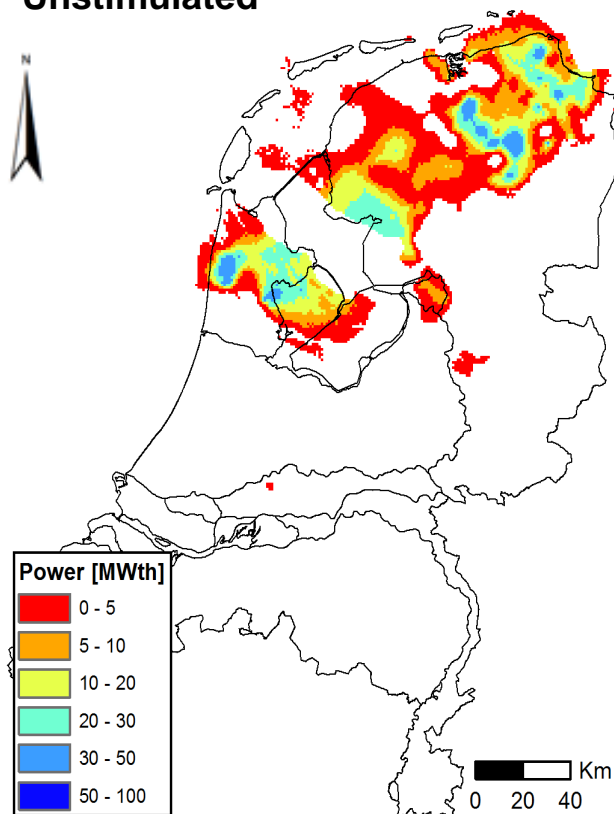
Dan hebben we voldoende diepte (plaatje links) en voldoende dikte (plaatje rechts) nodig

Diepte vertaalt zich naar temperatuur en de dikte is nodig om voldoende transmissiviteit (doorlatendheid t.o.v. de dikte van de laag)

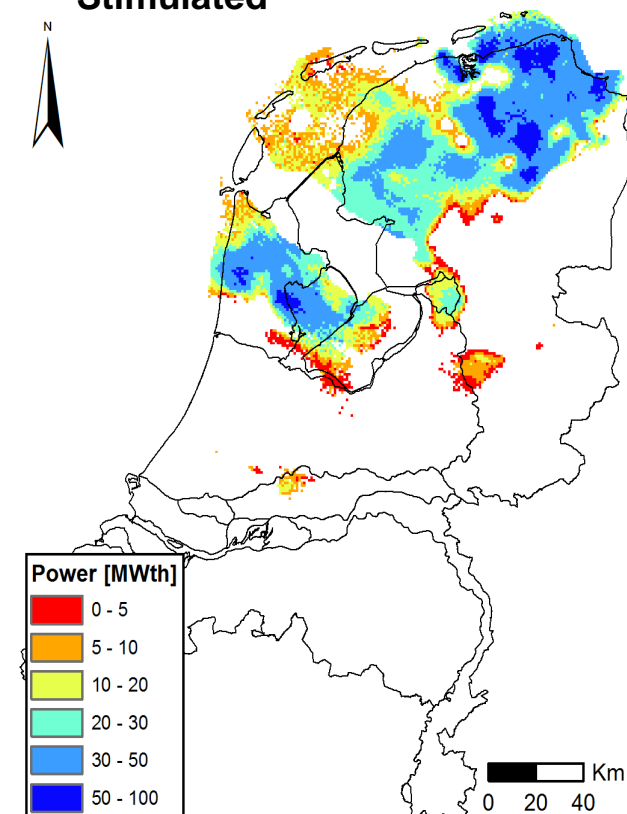
GEOOTHERMISCHE POTENTIE ROTLIEGEND

Modelleringen van de geothermische potentie in Friesland voor direct gebruik van de warmte in een gestimuleerde (rechts) en een ongestimuleerd (links) scenario, leidt tot de volgende uitkomsten

Unstimulated



Stimulated



GEDEGEN/ GEDEELD ONDERZOEK

- › Door onderzoek naar risico- en onzekerheidsverkleining, capaciteitsvergroting en innovatieve technieken, kan de onzekerheidsmarge op de business case kleiner worden
- › Investerings op onderzoek kunnen kleiner worden wanneer dit in een samenwerkingsverband plaatsvindt
- › De kwaliteit van onderzoek kan groter zijn door strategische keuzes van partners
- › Aanhaken op lopende onderzoeksprogramma's kan de financieringslast verlicht worden

- › Zie de volgende slide betreffende de draft titels van de Europese Horizon 2020
- › LCE-18-2017 (EGS in different geological conditions) klinkt op voorhand als de meest veelbelovende call
- › De calls richten zich allemaal op het maken van stappen in de TRL (technology readiness level) van 5-6 naar 6-7 (zie slide 95)

KANSEN IN EUROPA?

Voorlopige lijst (nog niet gepubliceerde) calls

Call	Deadline	TRL	Omvang	Inhoud/Industrie
LCE-7-2016-2017	5 jan 2017	5-8	2-5 MEuro	Developing the next generation technologies of renewable electricity and heating/cooling
LCE-17-2017	7 sept 2017	7	5-8 Meuro	Easier to install and more efficient geothermal systems for retrofitting buildings
LCE-18-2017	7 sept 2017	7	6-10 MEuro	EGS in different geological conditions
LCE-21-2017-5	7 sept 2017		1-3 Meuro	Market uptake of renewable energy technologies

LCE-18-2017: EGS IN DIFFERENT GEOLOGICAL CONDITIONS

- › Single-stage Innovation Action
- › **Opening:** 11 mei 2017
- › **Deadline:** 7 september 2017
- › **Budget:** 10 mln euro

- › **Doelstelling:**
Het testen van een EGS systeem om reservoir productiviteit in verschillende geologische omstandigheden aan te tonen en te laten zien dat energie geproduceerd kan worden tegen competitieve kosten

TOPIC DESCRIPTION

Specific Challenge:

Geothermal resources at medium-high temperature can produce at competitive costs electricity, heat or a combination of both. Routinely created enhanced geothermal systems (EGS) offer the opportunity to produce geothermal energy throughout Europe, including in locations where natural reservoirs are not available. In order to increase the number of geothermal installations, enhanced geothermal systems (EGS) have to be demonstrated as cost-competitive whereby innovative solutions are needed to allow for applications in geologic systems with different characteristics and of different origin.

Scope:

Proposals should aim at **testing EGS systems to ensure reservoir productivity in different geological settings and energy production at competitive costs**. Proposals could propose up-scaling existing EGS systems.

TRL 7 shall be achieved at the end of project activities (please see part G of the General Annexes).

Opening the project's test sites, pilot and demonstration facilities, or research infrastructures for practice oriented education, training or knowledge exchange is encouraged.

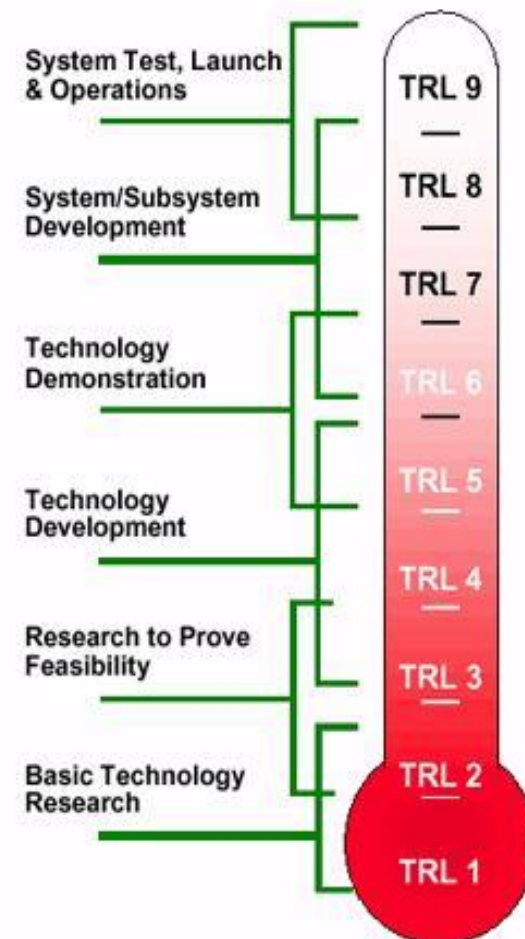
The Commission considers that proposals requesting a contribution from the EU of between EUR 6 to 10 million would allow this specific challenge to be addressed appropriately. Nonetheless, this does not preclude submission and selection of proposals requesting other amounts.

Expected Impact:

The actions will provide the data and the experience required to lower the costs for geothermal electricity and heat production in different geological conditions applying the EGS technology. The action will contribute to increase the penetration of geothermal energy by demonstrating the viability of EGS.

TECHNOLOGY READINESS LEVELS

- TRL 1 – 4: Van basic principles observed tot een techniek die in een laboratorium is gevalideerd.
- **TRL 5** – technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- **TRL 6** – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- **TRL 7** – system prototype demonstration in operational environment
- TRL 8 – system complete and qualified
- TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)



CONCLUSIES

CONCLUSIES DIE WE KUNNEN TREKKEN UIT DE VERKENNING VAN DE ULTRA-DIEPE ONDERGROND

- › We hebben aangetoond dat het mogelijk is om met de nieuwe seismische filters en innovatieve reprocessing op bestaande post-stack seismiek een beter inzicht te krijgen in de ultra-diepe ondergrond
- › Er lijkt voldoende data om dit ook op andere locaties te doen
- › Op de seismiek kunnen we nu de uitbouwende platformen zichtbaar maken en kan derhalve de seismiek als basis dienen voor nieuwe, verbeterde modellen
- › De analyses op LTG-01 laten afwisselende resultaten zien, maar er zijn indicaties van verhoogde porositeit uit de wireline log analyse, de drukdata en de mudlosses. Waar deze porositeit door veroorzaakt wordt en waar deze zit, is nog onbekend
- › De aard en/of oorzaak van de porositeit kan mogelijk blijken uit de analyse van zgn. slijpplaatjes
- › Uit de huidige bron van gegevens nemen we nu een gemiddelde permeabiliteit van 60 mD aan
- › Een analoog in Kazachstan laat zien dat het interieur van het platform m.n. primaire porositeit laat zien en de randen m.n. secundaire porositeit. In LTG-01 is de primaire porositeit zeer laag, dus inzicht in de secundaire porositeit is cruciaal

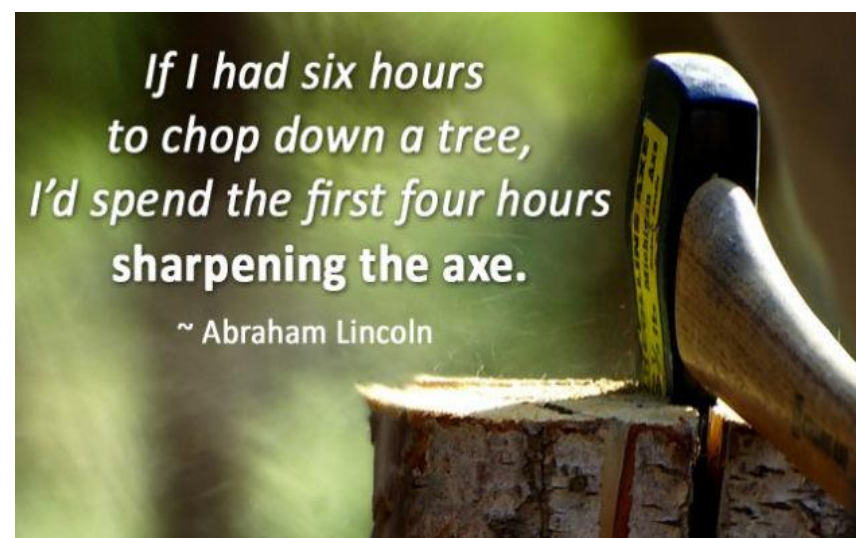
CONCLUSIES OVER DE EIGENSCHAPPEN EN MAAKBAARHEID VAN DE ULTRA-DIEPE ONDERGROND

- › We hebben kunnen concluderen dat we beter grip kunnen krijgen op de ultra-diepe ondergrond (morfologie en eigenschappen), maar wel informatie die gebaseerd is op slechts 1 punt: de LTG-01 put
- › LTG laat convectie zien en heeft afdoende temperatuur 4,5 – 5,5 km diepte (~190 graden Celsius)
- › Op de timeslices (seismiek) zien we uitbouwende platformen binnen hetzelfde dieptebereik
- › De primaire porositeit is te laag, dus moeten we mikken op de secundaire porositeit, zoals breuken en karsten. Deze vind je in carbonaatplatformen m.n. langs de randen.
- › Nader onderzoek moet uitwijzen waardoor deze secundaire doorlatendheid is ontstaan en waar we het kunnen verwachten
- › Analyses geven een indicatie van een gemiddelde permeabiliteit van 60 mD. Dit is te laag om de beoogde debieten te behalen
- › Uitgaande van de huidige permeabiliteitsschattingen, is het theoretisch mogelijk om op die dieptes hydraulisch te stimuleren volgens scenario 2
- › Om ongewenste neveneffecten te vermijden, kan er gekeken worden naar Mode-1 Stimulation. Echter is dit nog nooit eerder ergens toegepast.
- › Andere technieken zijn in ontwikkeling (oa. needle wells), maar nog niet (breed) toegepast.

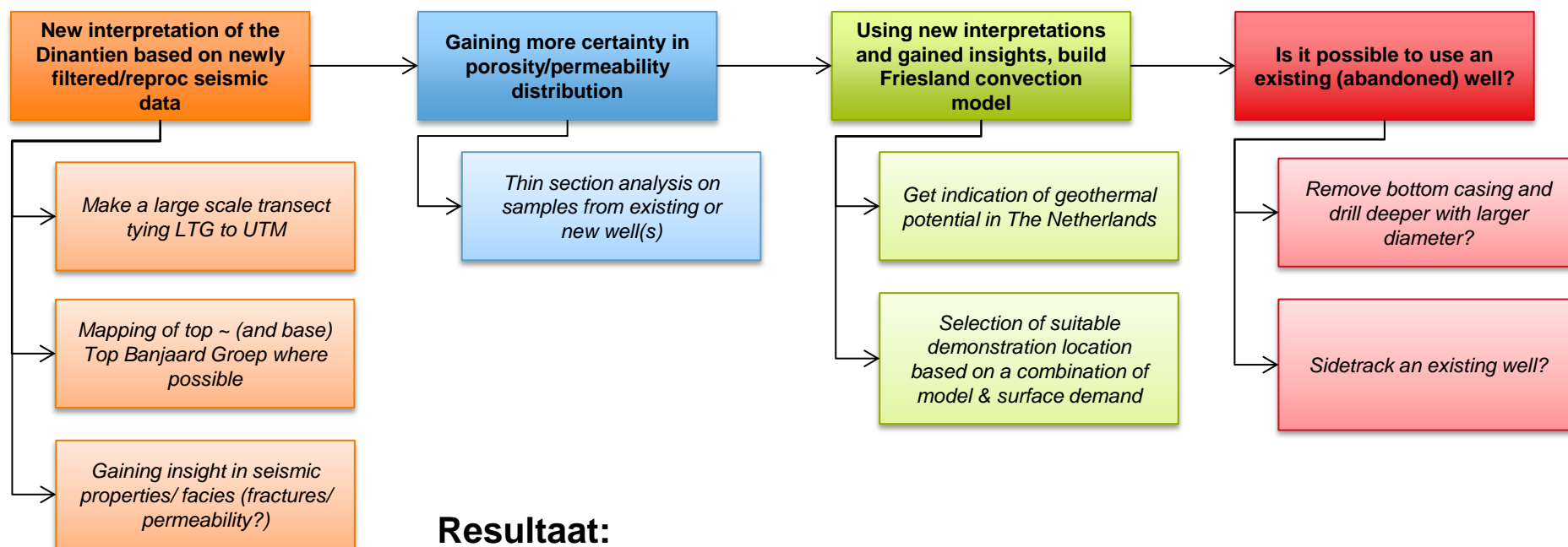
VERVOLGSTAPPEN

VERVOLGSTAPPEN

- › Door middel van onderzoek naar risico- en onzekerheidsverkleining, capaciteitsvergroting en innovatieve technieken, kan de onzekerheids- en risicomarge op de business case kleiner worden
- › Investerings in onderzoek kunnen kleiner worden wanneer dit in een samenwerkingsverband plaats vindt
- › De kwaliteit van onderzoek kan hoger zijn door een juiste keuze in partners
- › De financieringslast kan verlicht worden door aan te haken op lopende onderzoeksprogramma's



VERVOLGSTAPPEN



Resultaat:

Vergroot begrip van de kansen voor ultra-diepe geothermie in Nederland

Vervolgstep:

Selecteren van een locatie voor de eerste onderzoeks boring?

STAP 1: SEISMISCHE DETAILSTUDIE VAN DINANTIËN GEOTHERMISCH RESERVOIR

- › Ontwikkeling en toepassing van next-generation seismische filters binnen TNO
- › Seismische reprocessing van 2D en 3D data rond LTG-01/Heerenveen/Leeuwarden met filters
- › Her-interpretatie van top Dinantiën en nieuwe interpretatie bottom Dinantiën
- › Detectie en karakterisatie van breuken in het Dinantiën in reprocessed data oa. met seismic attributes
- › Schatting van trends in fracturing/porositeit/permeabiliteit/lithofacies in reservoir met seismische inversie
- › Resultaat: diepte, dikte, volume, breukdichtheid en trends in permeabiliteit van het reservoir

STAP 2: VERGROTING VAN HET BEGRIIP VAN DE GESTEENTE EIGENSCHAPPEN

- › Petrografische analyse:
 - › Zijn er bewijzen van / aanwijzingen voor karstificatie?
 - › Zijn er diagenetische effecten op de porositeit en permeabiliteit?

- › Facies analyse:
 - › Kunnen we op basis van microscopische indicaties grip krijgen op het afzettingmilieu en dan in het bijzonder de platformsetting?

STAP 3: UPDATE VAN TEMPERATUURMODEL

- › Kunnen we het huidige temperatuurmodel updaten door gebruik te maken van:
 - › De nieuwe dieptekaarten van de boven- en onderkant van de Dinantiën lagen
 - › De resultaten van de petrografische en facies-analyses; bijv. secundaire permeabiliteitsverdeling
 - › Concept van convectie, met een realistische morfologie

STAP 4: VERKENNEN MOGELIJKHEID HERGEBRUIK EN/OF VERDIEPING VAN VERLATEN PUTTEN

- › Kandidaat putten bijvoorbeeld Dongjum-01, Huins-01 (eindigen in Rotliegend, hebben infrastructuur)
- › Heropening en side-tracken van een 3 km diepe put kost ongeveer 2,5 miljoen euro (minder risico)
- › Heropening en uitboren bredere onderkant kost ongeveer 2,2 miljoen euro (meer risico)

STAP 5: ONDERZOEKSBORING

- › De technische en financiële risico's voor eerste ultra-diepe geothermische boring zijn groot
- › Risico's kunnen aanzienlijk verminderd worden middels een exploratieboring
- › Exploratieboring betekent– gelet op de investering – dat deze (her-) gebruikt moet kunnen worden voor exploitatie (dus niet zoals de diepste put ter wereld: Kola (RU))
- › De financiering bepaalt het karakter van de boring



In 1989 is het diepste punt bereikt: 12.262 m

ERRATUM:

NIET TECHNISCHE ASPECTEN

De implementatie van een nieuwe energietechnologie in een complexe maatschappelijke context

NIET TECHNISCHE ASPECTEN

- › Bij het vormgeven en starten van een innovatief project met een (mogelijk) grote impact op haar omgeving, is het belangrijk om a) bewust te zijn van en b) vroegtijdig aandacht te besteden aan de omgeving van de innovatie.
- › Belangrijke aandachtspunten als het gaat om de omgeving van innovatie zijn:
 - › De maatschappelijke relevantie van een initiatief.
 - › Sociaal culturele kenmerken van de omgeving/ het gebied waar je een project wilt starten.
 - › Stakeholders die je gaat tegenkomen bij de ontwikkeling en implementatie van je project
 - › Belangen – invloed – houding ten opzichte van het initiatief/de technologie – rol
 - › Gelijkere verdeling van kosten en baten tussen stakeholders
 - › Indien dit niet haalbaar blijkt, welke passende compensatie mogelijkheden zijn er?



Deze inzichten helpen om vooraf effectieve project-, stakeholder- en communicatiestrategie te ontwerpen

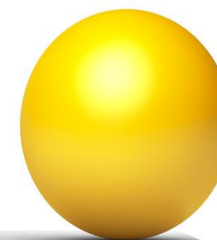
NIMBY: BESTAAT HET WEL?

- › Vaak wordt dan gesproken over het zgn. NIMBY effect.
 - › **Not in my backyard**, oftewel, niet in mijn achtertuin!
- › Maar bij voldoende, tijdige zorg en aandacht voor de omgeving van een innovatie en een helder plan over de verdeling van de baten en de lasten, bestaat het NIMBY effect dan eigenlijk nog wel?

*Waarschijnlijke
voordelen voor hun*



*Kosten en impact
op hun*



*Larry Susskind
(MIT, Boston)*



ONTWIKKELEN VAN VERTROUWEN

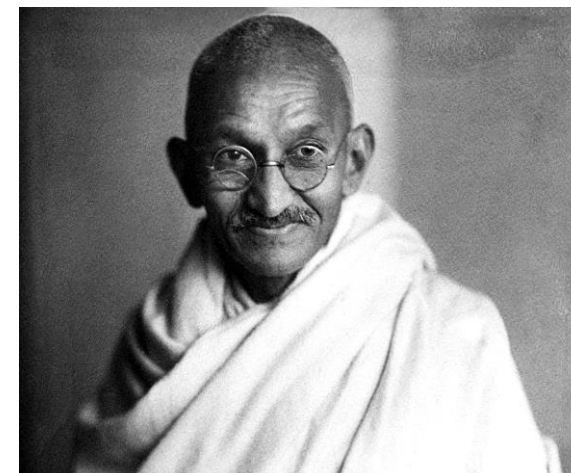
Gandhi:

“Alles wat je doet voor mij, zonder mij, doe je tegen mij”.

Vertrouwen begint met een gelijkwaardig gesprek en een open houding. Alle mogelijke uitkomsten zijn “welkom”.

Uitgangspunt: Mutual Gains Approach (Susskind):

- ✓ Waarom dit project en waarom op deze plek?
- ✓ Wie wil vertrouwen ontvangen van wie?
- ✓ Welke stakeholders kom je tegen in de omgeving van je project en wat zijn hun belangen?
- ✓ Meerwaarde van het project voor wie? What's in it for whom?



Bron: nonviolenceinternational.net

Bouwstenen:

- ✓ Intenties (projectinitiators)
- ✓ Competenties (idem)
- ✓ Kennis(experts) en onderzoek
- ✓ Initiatiefnemers (baathebbers)
- ✓ “Getroffenen” (lastendragers)
- ✓ Besluitvormers & Uitvoerders
- ✓ Meervoudige belangen!
- ✓ Compensatie-opties?

ONZEKERHEID VAN KENNIS

Nieuwe, innovatieve technologieën brengen veel nieuwe kennisvragen met zich mee. Zowel aan de technologische kant, vaak geformuleerd vanuit onderzoeksperspectief, als aan de maatschappelijke kant, vaak geformuleerd vanuit de samenleving door 'niet-experts'

Belangrijk bij onderzoeksprojecten is om alle kennisvragen die onder de verschillende stakeholders leven mee te nemen in het onderzoek en deze te vertalen naar een breed gedragen onderzoeksagenda.

Deze onderzoeksagenda wordt bij voorkeur niet alleen door onderzoekers en experts geformuleerd, maar door een brede representatieve groep stakeholders. Op deze manier wordt in de onderzoeksagenda aandacht besteed aan vragen, zorgen en onzekerheden die vanuit verschillende perspectieven (stakeholders) worden aangereikt

Joint fact finding en **kennismediation** zijn passende methoden om een gezamenlijke onderzoeksmethode te ontwikkelen en vertrouwen te krijgen voor het benodigde onderzoek.

HOE: EEN EERSTE STAP

*Heel gangbaar via
standaard
haalbaarheidsstudies*

Karakteristieken
ondergrond &
benodigde
technologie

*Ondergeschoven
kindje, maar
voorkomt veel
ellende en
'verrassingen'*

Karakteristieken
maatschappelijk
speelveld

Project
Strategie

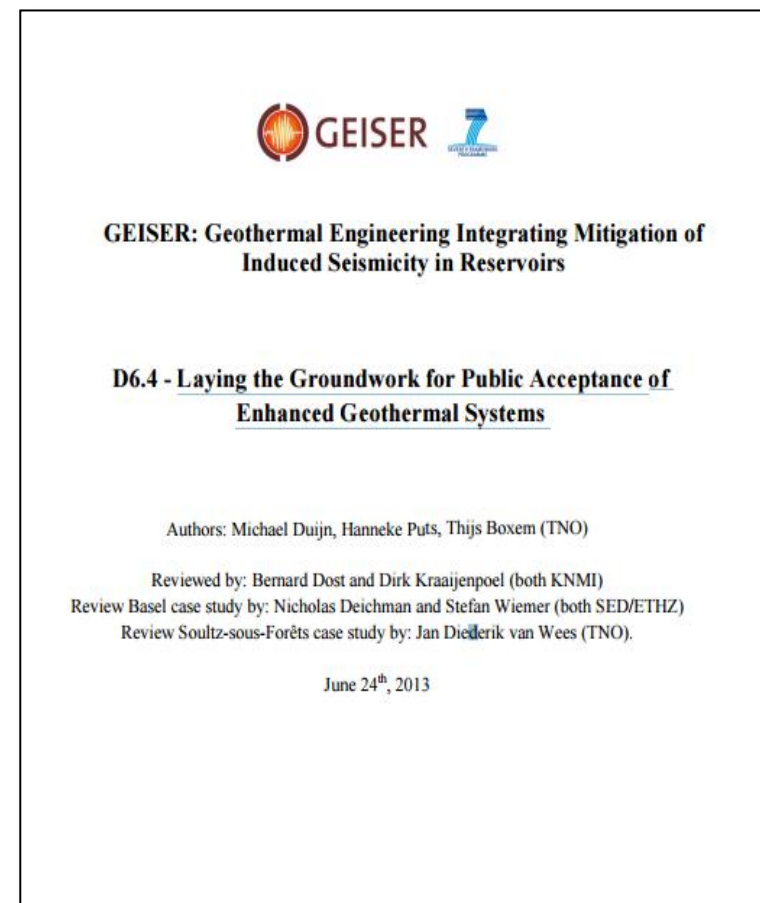
- Culturele en historische achtergrond
- Actoren analyse
- Balans tussen kosten en baten

ERVARING TNO MET OPZETTEN STAKEHOLDER PROCESSEN IN COMPLEXE DOSSIERS

- › Ruimtelijke vraagstukken: ontwerp en begeleiding stakeholder processen rondom controversiële en kennisintensieve dossiers; Ontpoldering, Bagger, Opslag Radio-actief afval, etc.
- › Kennismediation: samen met stakeholders vaststellen kennisagenda, selecteren praktijk & kennisexperts, betekenis geven aan uitkomsten en onderhandelen over projectcondities.
- › EU FP7 project GEISER: ontwikkeling methodologie sociaal-maatschappelijke feasibility study.
- › CATO2: inzicht in valkuilen besluitvormingsprocessen complexe energie dossiers
- › ERP Complexity – ontwikkeling stakeholderstrategie voor grootschalige monitoringsnetwerken

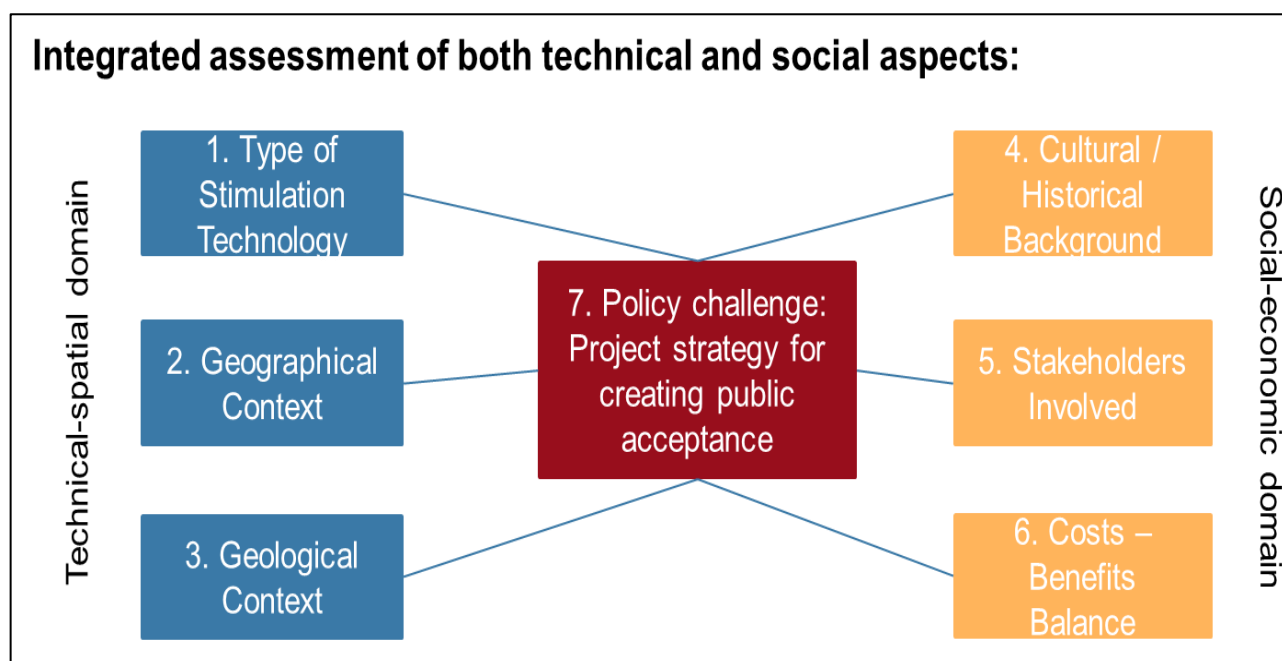
EU-FP7 PROJECT 'GEISER'

- › GEISER staat voor: Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs
- › GEISER was een Europees project on het zevende Framework Programma (FP7)
- › Binnen GEISER is er – naast vele andere zaken – de basis gelegd voor publieke acceptatie bij EGS (enhance geothermal systems)
- › Deliverable 6.4: Laying the Groundwork for Public Acceptance of Enhanced Geothermal Systems



AANBEVELINGEN UIT GEISER

- › Combineer de uitkomsten van een technische én maatschappelijke haalbaarheidsstudie en gebruik **BEIDE** studies om je project- en stakeholderstrategie te bepalen.



Boxem, Duijn, Puts (2012) "Laying the Groundwork for Public Acceptance of Enhanced Geothermal Systems" deelrapportage EU-FP7 project GEISER.

WANNEER MOET JE HIERMEE BEGINNEN?

- › Zo vroeg mogelijk in het technische ontwikkelproces moet – zeker bij potentieel controversieel energieprojecten – ook aandacht besteed worden aan de maatschappelijke aspecten van een initiatief.
- › Samen met de uitkomsten van de technische haalbaarheidsstudie kan vervolgens een strategie bepaald worden voor de daarop volgende (nu nog vooral technische georiënteerde) ontwikkelfasen.

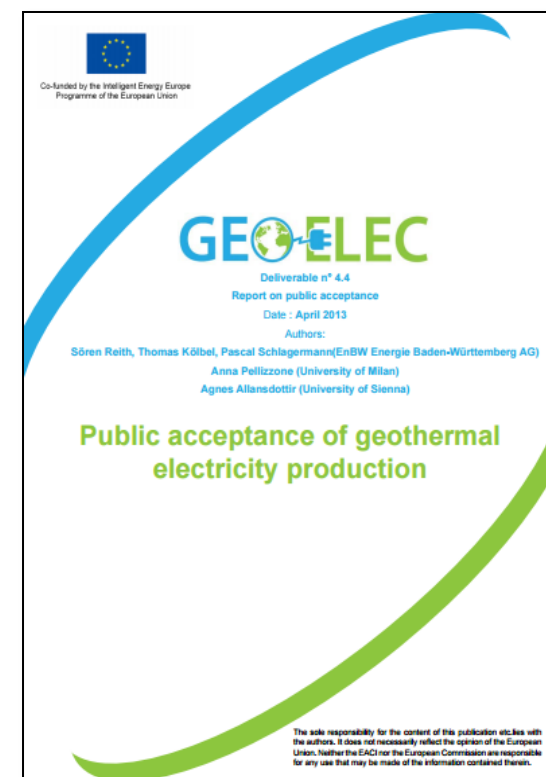


De huidige 5 fases van een EGS-project, hoofdzakelijke gefocust op technische aspecten van de voorgenomen innovatie

- › Deze strategie is niet alleen technisch van aard, maar gaat ook in op de te betrekken stakeholders per fase (dit kan verschillend zijn) en de wijze waarop dit moet gebeuren (participatie, communicatie).

GEOELEC: ASSOCIATIES MET GEOTHERMIE IN DE MEDIA

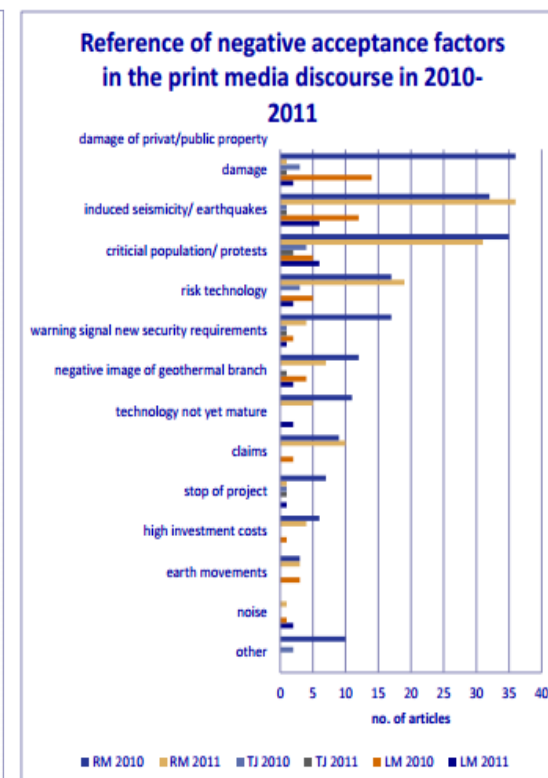
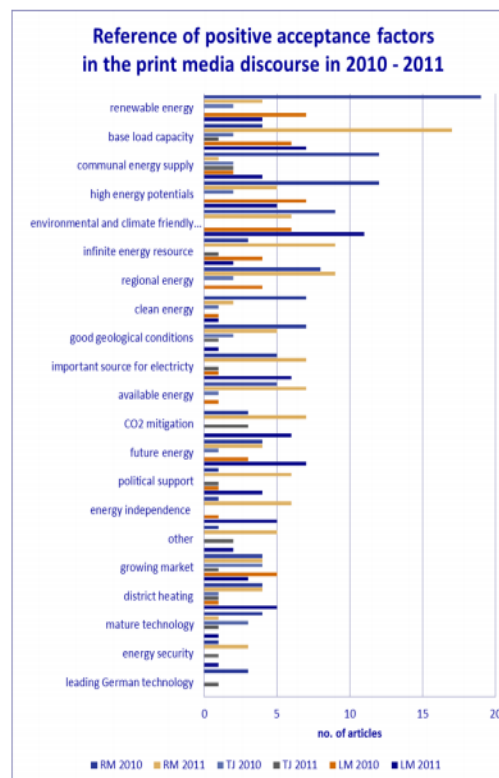
- › GEOELEC staat voor ‘geoelectriciteit’ en was een Europees project ten behoeve van het stimuleren van het bewustzijn van de kansen van elektriciteit opgewekt met geothermische warmte.
- › Binnen GEOELEC is – naast vele andere onderwerpen – gekeken naar publieke acceptatie rondom elektriciteitswinning met behulp van een geothermische bron
- › Deliverable 4.4: Public acceptance of geothermal electricity production



<http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2014/03/D-4.4-GEOELEC-report-on-public-acceptance.pdf>

IN EUROPESE MEDIA IS ER EEN TREFWOORDENANALYSE GEDAAN

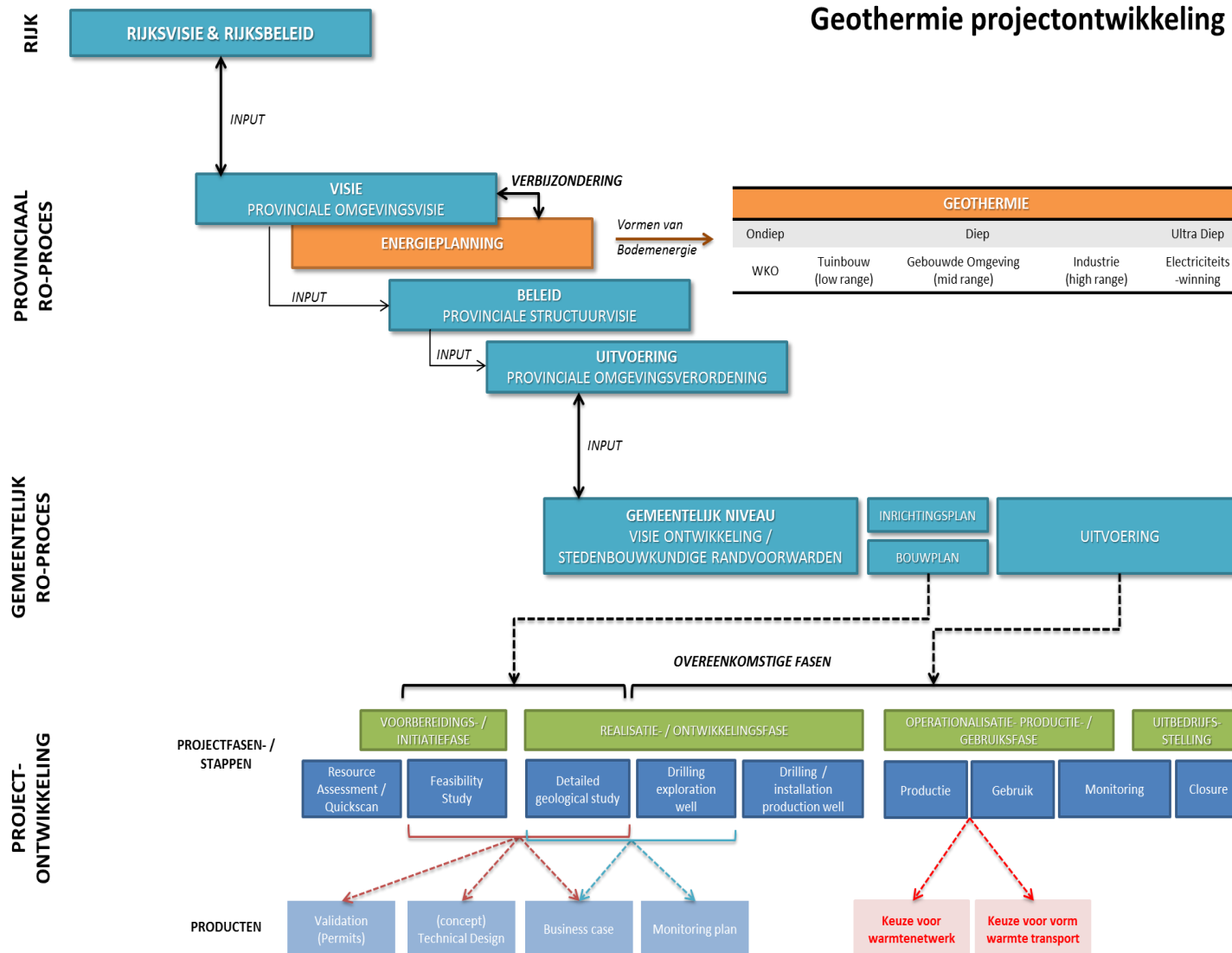
- › De positieve aspecten die terugkwamen uit de analyse waren de factoren dat het om hernieuwbare energie gaat, dat het een base-load energielevering is en dat het een bron is die direct aan een gemeenschap levert.
- › De negatieve aspecten waren de angst voor veroorzaakte schade (aan publieke en private eigendommen), geïnduceerde seismiciteit en een kritische bevolking (protesten)



ONTWIKKELING GEOTHERMIEPROJECT IN RELATIE TOT RUIMTELIJKE OF ENERGIEPLANNING

- › Bij de ontwikkeling en implementatie van een nieuw geothermieproject, wordt vaak geredeneerd vanuit de technische ontwikkelstappen.
- › De kans van slagen wordt echter groter als een geothermie project zoveel mogelijk aansluit bij andere ruimtelijke ontwikkelingen en/of de energieplanning van bijv. een provincie of gemeente.
- › Hoe meer de timing en maatschappelijke inpassing van een nieuw geothermie project hieraan gelieerd is, hoe groter de kans op succes.
- › TNO heeft in een eigen kennisproject aandacht besteed aan de vervlechting van het technische ontwikkelproces van een geothermieproject en de ruimtelijke planningsprocessen op de verschillende overheidsniveaus. (volgende slide)

Workflow vanuit het perspectief van Geothermie projectontwikkeling



VERKLARENDE WOORDENLIJST

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Abandoned well: een boorgat wat niet meer gebruikt wordt en derhalve afgesloten en verlaten is.

Afzettingsmilieu: alle sedimentaire systemen zijn ooit in de geologische geschiedenis afgezet. Hoe deze zijn afgezet (locatie, setting, klimaat, etc.) wordt het afzettingsmilieu genoemd. Veel eigenschappen van sedimentaire gesteenten kunnen afgeleid worden uit hun afzettingsmilieu (of visa versa)

Boorvloeistof: de vloeistof die bij het boren gebruikt wordt om bijvoorbeeld de boorkop te koelen, het boorgruis af te voeren of instroom van gas, olie of water uit de formaties tegen te gaan

Carboniferous: de Engelse benaming voor het Carboon. Een geologisch tijdperk wat duurde van 358,9 tot 298,9 miljoen jaar geleden

Conductiviteit: de mate waarin een materiaal in staat is warmte te transporteren

Convectie: proces van warmtestroming door verplaatsing van materiaal, in dit geval formatiewater

Debiet: het Nederlandse woord voor flow vanuit een geothermieput en wordt doorgaans uitgedrukt in kubieke meters per uur (m³/u)

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Density Log: techniek om ononderbroken informatie van de gemiddelde (bulk) dichtheid te krijgen van de doorboorde formaties en kan - naast sonic- en neutron porosity logging - gebruikt worden om de porositeit te bepalen

Diagenese: de verandering van/in een gesteente die gedreven wordt door chemische, fysische of biologische processen

Differential stress: beschrijft het verschil tussen de richting van de grootste en kleinste spanning

Dinantien: de Europese aanduiding van de onderste serie van het Carboon. Het Dinantien duurde van 358,9 tot 330,9 miljoen jaar geleden. Het Dinantien komt internationaal overeen met het Vroeg en Midden Mississippian (zgn. Tournaisian & Visean)

EGS: afkorting van de Engelse term 'Enhanced (of Engineered) Geothermal Systems'. Geothermische systemen die geen gebruik maken van de natuurlijke doorlatendheid, maar vallen of staan bij de maakbaarheid van de doorlatendheid

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Extrusief gesteente: een stollingsgesteente wat is ontstaan na eruptie door bijvoorbeeld een vulkaan (door lava gevormd)

Facies: verwijzing naar gesteentes die onder bepaalde omstandigheden gevormd zijn

Gamma Ray Log: techniek om de natuurlijke gamma-straling te meten. Typisch is dit een handige tool om onderscheid te maken tussen zanden en kleien.

HPHT: high pressure, high temperature (ENG). Een typische aanduiding voor processen die bij hoge druk en temperatuur plaatsvinden

Intrief gesteente: een stollingsgesteente die in de korst is doorgedrongen, maar niet het oppervlakte heeft bereikt (door magma gevormd). Deze vormen zgn. sills en dikes.

Matrix: een gesteente bestaat uit korrels. Tussen de korrels zit ruimte die soms open blijft (uitgedrukt als porositeit), maar soms ingevuld wordt door kleine deeltjes (silt, klei, kalk). De invulling tussen de korrels wordt de matrix genoemd.

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Mud losses: als er van 'mud losses' wordt gesproken verwijst men naar het verliezen van boorvloeistof (mud) in de formatie. Dit kan voorkomen bij breuken, openingen of door het boren ontstane instabiliteiten. Hieraan wordt ook wel eens gerefereerd als 'lost-circulation'.

Neutron Porosity Log: een wireline logging techniek die de hydrogen index in een reservoir meet en een goede indicator is voor de porositeit van een gesteente

NLOG: de afkorting van het Nederlandse Olie- en Gasportaal, een website van het Ministerie van Economische Zaken en TNO waar alle openbare data van de Nederlandse ondergrond beschikbaar gesteld wordt

Permeabiliteit: geeft de mate aan waarin de ruimte tussen de korrels (porositeit) met elkaar in verbinding staat en is daarmee een indicator van de doorlatendheid. Wordt veelal uitgedrukt in Darcy (D) of miliDarcy (mD)

Petrografie: de gedetailleerde beschrijving van gesteenten waarbij o.a. gekeken wordt naar mineralogie, structuren, mineralogische eigenschappen, etc.

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Porositeit: geeft de verhouding tussen korrels en niet opgevulde ruimte tussen de korrels weer. Wordt uitgedrukt in procenten (%)

Primaire Porositeit/Permeabiliteit: de porositeit/permeabiliteit van een gesteente die er door afzetting en begraving is

Rotliegend: de naam van een groep gesteente opeenvolgingen uit het Perm (298,9 - 272,3 miljoen jaar geleden) die in Nederland veelal is opgebouwd uit zand wat ooit door m.n. wind, maar ook rivieren is afgezet.

Secundaire Porositeit/Permeabiliteit: de porositeit/permeabiliteit van een gesteente die er door latere processen bij is gekomen. Denk daarbij aan verbreukingen, verkarsting, etc.

Seismiciteit: mate van veelvuldigheid en hevigheid van trillingen in de ondergrond

Seismiek: techniek om door middel van geluidsgolven een beeld te krijgen van de ondergrond. Oudere seismiek werd doorgaans langs een lijn geschoten en leverde 2D seismiek. Later werd de overstap gemaakt naar 3D seismiek

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Seismische processing: net als in akoestiek en echografie worden seismische data omgerekend naar composities en beelden, dit wordt 'processing' genoemd

Skin: een indicator van de formatieschade die de flow beïnvloed. Bij een positieve skin is de flow lager dan beoogd/verwacht. Door middel van stimuleringstechnieken wil je de skin negatief maken, wat dus de flow naar het boorgaat ten goede komt.

Slijpplaatjes: zeer dunne plakjes van een steen op een preparaatglasje zodat deze onder de microscoop geanalyseerd kan worden

Sonic Log: techniek om de specifieke mate van snelheid te meten waarmee geluid door het gesteente gaat. Aangezien deze snelheid verandert onder invloed van gesteentesoort en invulling van de poriënruimte is dit - naast density- en neutron porosity logging - een indicator van de porositeit

Stress: de Engelse term voor een kracht die op een oppervlakte werkt (NL: spanning). In de ondergrond bijvoorbeeld door de gesteentes die bovenop de bekeken laag ligt.

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Timeslice: in de seismiek worden, omdat het over de snelheid van geluid door gesteentes gaat, dieptes uitgedrukt in tijd. Een bovenaanzicht van een bepaalde diepte, wordt dus in de seismiek als een 'timeslice' aangeduidt.

Trias: een periode in de geologische geschiedenis die van 252,2 tot 201,3 miljoen jaar geleden duurde.

TRL: de afkorting voor de Engelse term 'Technology Readiness Levels'. Een schaal die de maturiteit van een innovatie aangeeft. De TRL niveaus zijn oorspronkelijk ontwikkeld door de NASA, maar worden inmiddels breed gebruikt.

Well Control: bij het interpreteren van seismiek heb je de informatie nodig uit een boorgat om te verifiëren waar je zit in de diepte. Het ijken van je seismiek op een boorput heet well control

Wireline Logging: techniek om gedetailleerde informatie uit een boorgat te verkrijgen. Er bestaan veel soorten van wireline logging, maar de meest voorkomende zijn de gamma ray (meest gebruikt voor onderscheid zand/klei), sonic (voor seismische snelheid en tijd-diepte relatie) en density logs (porositeit)

BRONVERMELDING

REFERENCES

- Bonté, D., van Wees, J.D., Verweij, J.M., Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling, Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw, 91–4, 491-515, 2012
- Guilloi-Frottier et al., Structure of hydrothermal convection in the Upper Rhine Graben as inferred from corrected temperature data and basin-scale numerical models, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2013
- Kombrink, H., Leever, K. A., Van Wees, J. D., Van Bergen, F., David, P. & Wong, T. E., 2008. Late carboniferous foreland basin formation and Early Carboniferous stretching in North-western Europe: Inferences from quantitative subsidence analyses in the Netherlands. Basin Research 20(3): 377-395.
- Lipsey, L.C., Numerical Modelling of Thermal Convection Related to Fracture Permeability: Implications for Geothermal Exploration and Basin Modelling, Utrecht University, July 2014
- Van Hulten F.F.N., 2012. Devono-carboniferous carbonate platform systems of The Netherlands. Geologica Belgica 15(4): 284-296.
- Van Oversteeg, K., Lipsey, L.C., Pluymaekers, M., van Wees, J.D., Fokker, P.A. & Spiers, C.J., 2014. Fracture Permeability Assessment in Deeply Buried Carbonates and Implications for Enhanced Geothermal Systems: Inferences from a Detailed Well Study at Luttelgeest-01, The Netherlands. Proceedings: Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, February 24-26, Stanford University, Stanford, California.
- Wong, T., Batjes, D.A.J., Geology of the Netherlands, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007

NB: alle gebruikte figuren zijn – indien nodig – in de slides voorzien van de referentie

OVERZICHT STIMULERINGSTECHNIEKEN

Type of treatment	Well Stimulation Technique	Description	Drawbacks	Tested in GT	Geological context	Case study	Potential Service Company	Indicative Costs*
Chemical	Matrix Acidizing (HCl or HCl+HF)	Always performed below fracturing rate and pressure. Acid flows through the matrix with reactions taking place in existing pores and natural fractures. Matrix stimulation is accomplished by injecting a fluid with low pH to dissolve and/or disperse materials that impair well production and is mainly used to treat the near-wellbore region.	Scaling minerals (and clogging). Limited active acid penetration. Casing corrosion Flowbacks (HSE concerns).	Yes and well documented in hydrocarbon industry.	Sandstones Carbonates Granites	Soultz-sous-Forets, France Los Azufres field, Mexico	Halliburton (USA) Schlumberger Fangmann GPC Instrumentation Process (France)	Low-Moderate
Chemical and mechanical	Fracture Acidizing	It is performed above fracturing rates and pressures. Acid is injected into the geothermal reservoir to create fractures, as acid is transported, dissolution etching occurs and conductivity is increased (Kalfayan, 2007)	Induced seismicity (inherent to fracture). Fracture overlapping.	Yes	Carbonates Sandstones		Halliburton Schlumberger Fangmann	Moderate
	Coiled Tubing Acid Stimulation	A conventional acid treatment using continuous length of small-diameter steel pipe and related surface equipment (Akin, et al., 2015) Chemical and mechanical removal.	The same than in conventional matrix acidizing	Yes	Carbonates	Alaşehir Geothermal Field, Turkey	GPC Instrumentation Process (France) Trican (USA) Schlumberger	Moderate
Hydraulic	Hydraulic Fracking (Tensile mode)	High rate injections pressurizes the reservoir, leading to the creation of new fractures or to the enhancement of the permeability of pre-existing ones.	Induced seismicity (social concern in the NL). Less risk than in hydro shearing.	Yes	Sandstones Carbonates Granites Volcanics	Soultz-sous-Forets, France	Baker Hughes Ciadel Energy Schlumberger	Very High
Thermal	Thermal Fracturing	It is a stimulation phenomenon that occurs when a fluid (e.g. produced water, seawater, aquifer water or surface water), considerably colder than the receiving hot formation, is injected (Flores, Davies, Couples, & Païsson, 2005). It can be combined with other stimulation techniques such as Matrix Acidizing and Fracture Acidizing.	Induced micro seismicity	Yes	Volcanic	Rotokawa field, New Zealand	AtariRock Energy	High
Thermal and Hydraulic	Thermal (cryogenic) Fracking**	It is a fracture technique which combine hydraulic fracking and fractures caused by thermal stress due to the injection of cold liquid CO ₂ (Mueller et al., 2012).				None yet		
Special drilling techniques	Radial Jetting	Hydraulic jetting is used to create small-diameter laterals up to 100 m long from a main backbone (TNO report, 2015). It is also referred to as radial jet drilling or radial drilling.	No major risks to the well or environment have been identified. (limited experiences)	No		None yet	Radial Drilling Petroulet Coiled Services USR Drilling Services (USA)	High
	Fishbone	It is a stimulation technique invented by Fishbone AS in which a (horizontal) backbone is completed with many small and short laterals (up to 100 laterals of 12-24m long). Fishbone stimulation creates more uniform drainage pattern in the reservoir because of the lateral placement of the jets (Freyer, Kristiansen, Vadia madiand, Omdal, & Omdal, 2009). Only applicable in new wells.	No major risks to the well or environment have been identified. (limited experiences)	No, successful pilots in ECBM and carbonates	Carbonates (using hydraulic jetting) Sandstone ("Dreamliner" technique which uses drilling)	None yet	Fishbones AS (Norway)	High
Mechanical	Casing Perforation	It is a stimulation technique designed to access cased-off permeable horizons by perforating the well casing. Designed to provide effective flow communication between a cased wellbore and a productive reservoir (Aqui & Zarrouk, 2011)	Casing-strength reduction (casing failure) Widely apply in oil & gas industry.	Yes (with acidizing)	Any		Halliburton Schlumberger TCO, Norway Expro	Moderate
	High Energy Gas Fracturing (HEGF) or Explosive Stimulation	It is a tailored pulse fracturing technique which uses propellants to obtain controlled fracture initiation and extension. This stimulation treatment is restricted to the open hole, because the shock wave could damage well casing and production hardware. Quite common technique of the petroleum industry.	Instability of explosives at high temperatures Micro seismicity (?)	Yes	Sandstones Carbonates Granites Volcanics	Geyser's Field, Northern California	Servo-Dynamics, Inc.-STRESSFRA C® (USA)	Low
Acoustic	Acoustic Well Stimulation (AWS)**	It uses simple ultrasonic wave source, the interaction between the acoustic field and the saturated porous rock can cause changes in the permeability or removal of plugging (Aqui & Zarrouk, 2011)	Not invasive.	Not to our knowledge			Siberian-Uralis Geologicaal oil servicing Company Ltd Applied Seismic Research (ASR)	Difficult to evaluate with the current status of knowledge
Electric	Electric Stimulation**	It uses electric current to stimulate the well. The effect could either be electrothermal or electrodynamic type. The electrothermal effect is evident in the near wellbore zone during heating with infrared or high frequency or microwaves. The electrodynamic effects create a cleaning of the bottom hole formation zone from clay particles restoring or improving the well productivity (Aqui & Zarrouk, 2011)	Process is not well understood yet. Penetration in the formation is small.	Not to our knowledge				Difficult to evaluate with the current status of knowledge

*Hebt u naar aanleiding van dit rapport vragen?
Neemt u dan contact op met TNO Geo-Energie:*

Maurice Hanegraaf

maurice.hanegraaf@tno.nl

+31 (0)88 866 15 24