# De mogelijkheden voor ondiepe en diepe geothermie in Gelderland

Project: 2500125

Maart 2026

# De mogelijkheden voor ondiepe en diepe geothermie in Gelderland

**Auteurs**
Denis Katkov
Chris Dalby
David Steer
Raidel Djodi
Marcel Zwaan
Jörg Feddersen
Thomas Mooij

**Kwaliteitscontrole door**
Bert Dijksman

**Vrijgave toegestaan door:**
Marcel Zwaan (Manager Subsurface and Engineering)

**Opdrachtgever:**
Provincie Gelderland
Markt 11
6811 CG, Arnhem
Nederland

**Opgesteld door:**
PanTerra Geoconsultants B.V.
Weversbaan 1-3
2352 BZ Leiderdorp
Nederland
T +31 (0)71 581 35 05
F +31 (0)71 301 08 02
info@panterra.nl

Dit rapport bevat analyses, meningen en/of interpretaties die zijn gebaseerd op observaties en materialen die zijn verstrekt door de klant aan wie en voor wiens exclusieve en vertrouwelijke gebruik dit rapport is gemaakt. De geuite interpretaties of meningen vertegenwoordigen het beste oordeel van PanTerra Geoconsultants B.V. (alle fouten en weglatingen voorbehouden). PanTerra Geoconsultants B.V. en haar functionarissen en werknemers aanvaarden geen verantwoordelijkheid en geven geen garantie of verklaringen met betrekking tot de productiviteit, goede werking of winstgevendheid van olie, gas, water of andere minerale putten of zand in verband waarmee een dergelijk rapport wordt gebruikt of waarop wordt vertrouwd.

# Samenvatting en aanbevelingen

*Waarom dit onderzoek?*

De provincie Gelderland wil graag geothermie inzetten als warmtebron met een lage $CO_2$-uitstoot. PanTerra Geoconsultants BV, hierna PanTerra genoemd, is gevraagd om beeld van de ondergrondse potentie van geothermie te updaten. De update is mogelijk dankzij de gegevens die onlangs beschikbaar zijn gekomen uit het EBN SCAN project. SCAN (Seismische Campagne Aardwarmte Nederland) is een landelijk onderzoek dat wordt bekostigd door de rijksoverheid. Het studiegebied omvat de hele provincie Gelderland en de ondiepe ondergrond (>500 m) en de diepe ondergrond (>1500 m).

Wat *is geothermie?*

Bij geothermie, ook wel aardwarmte genoemd, wordt warm tot heet water uit de aarde gewonnen. Met behulp van een warmtewisselaar wordt de warmte uit het water gehaald, waarna het afgekoelde water weer terug de ondergrond in wordt gepompt. Aardwarmte wordt in Nederland meestal gewonnen uit lagen van 500 tot 4000 m diepte. Deze warmte wordt gebruikt in kassen, huizen en gebouwen. Als de temperatuur hoog genoeg is, kan het hete water ook worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. Bij de productie van aardwarmte komt minder $CO_2$ vrij dan bij aardgas, en dus is geothermie een schoon alternatief. Ook is het een betrouwbare bron omdat je niet afhankelijk bent van weersomstandigheden zoals zon en wind. Eind 2025 waren er in Nederland 23 aardwarmte-locaties.

*Wat is de aanpak van PanTerra?*

Voor dit geologische onderzoek heeft PanTerra gebruik gemaakt van openbare gegevens en interne expertise. De volgende belangrijke onderwerpen zijn onderzocht:

- Het vaststellen van geschikte gesteentelagen (reservoirs) in de provincie;
- Bepalen waar in de provincie de reservoirs voorkomen op basis van seismische data;
- Bepalen van de reservoirkwaliteit op basis van putdata;
- In kaart brengen van het geothermische vermogen in de provincie, in vier scenario's;
- Aanwijzen van kansrijke gebieden en mogelijke doubletlocaties*, op basis van het vermogen in de ondergrond;
- Onderzoeken van de mogelijkheden voor warmte-opslag en lage temperatuur geothermie;
- Uitvoeren van een onzekerheidsanalyse;
- Vaststellen van vervolgstappen voor de provincie.

*Een doublet is een combinatie van een put voor het oppompen (productieput) en een put voor het terugvoeren van het formatiewater (injectieput)

**Tabel 0-1: Samenvatting van stratigrafische groepen in de Nederlandse ondergrond en de acties die in dit onderzoek per groep zijn uitgevoerd, inclusief onderbouwing en conclusie. Groene vakken geven aan dat een actie is uitgevoerd in dit rapport; grijze vakken geven aan dat geen actie is uitgevoerd of dat deze niet van toepassing is.**

| Groep, afkorting (ouderdom) | Belangrijke formaties voor geothermie | Kansrijkheid voor geothermie in Gelderland | Beeld eerdere studies (2021 en 2022) | Actie dit rapport | Op basis van | Verandering conclusie/beeld potentie geothermie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Noordzee Groep,** NU/NL (Kenozoïcum) | Laagpakket van Berg<br>Laagpakket van Orp<br>Zand van Brussel Laagpakket | Kansrijk voor bodem-energie, warmte-opslag of ondiepe geothermie | Kansrijk voor warmte-opslag of ondiepe geothermie | Onderzoeken warmte-opslag en ondiepe geothermie | ThermoGIS | Gebieden met potentie veranderd |
| **Rijnland Groep,** KN (Krijt) | Vlieland Formatie | Niet kansrijk | Mogelijk van goede kwaliteit | Geen vermogenskaart gemaakt, te weing data | SCAN put BLT-01 en EDE-01 | Permeabiliteit onvoldoende |
| **Schieland Groep,** SL (Jura-Krijt) | Laagpakket van Alblasserdam | Onbekend | Mogelijk kansrijk in de Betuwe | Overnemen beeld 2022 studie | Geen nieuwe putdata | |
| **Boven- en Onder Germaans Trias Groep,** RN/RB (Trias) | Röt Randzandsteen Laagpakket<br>Formatie van Hardegsen<br>Boven- en Onder Volpriehausen Laagpakket<br>Boven- en Onder Dethfurth Laagpakket | Kan kansrijk zijn | Reservoirkwaliteit kan lokaal goed zijn, maar reservoirdikte is een beperking | Opstellen vermogenskaart | SCAN putten | Weinig (<1 MW) vermogen |
| **Zechstein Groep,** ZE (Perm) | Z1 Randcarbonaat Laagpakket | Kan kansrijk zijn | | Onderzoeken geologische trends en co-productie | EDE-01 | Rond Peel-Maasbommel Complex doorlatend, kan een toevoeging zijn aan het Rotliegend (co-productie) |
| **Boven-Rotliegend Groep,** RO (Perm) | Formatie van Slochteren | Kansrijk | Lokaal kansrijk, sterk afhankelijk van reservoirkwaliteit | Opstellen vermogenskaart, in kaart brengen prospecten en mogelijke doubletlocaties | SCAN putten | Lokaal kansrijk, vooral aan de flanken van het Peel-Maasbommel Complex |
| **Limburg Groep,** DC (Carboon) | Formatie van Tubbergen | Niet kansrijk | Reservoirkwaliteit vaak onvoldoende | Overnemen beeld 2022 studie | Geen nieuwe putdata | |

*Wat zijn de conclusies?*

- De belangrijkste conclusie is dat er alleen significant (diep) geothermisch potentieel in het Slochteren reservoir (Rotliegend Groep) in het westen van de provincie is geconstateerd, in een zone rond Ede. Daar zijn vijf mogelijke doubletlocaties aangemerkt waar genoeg vermogen en ruimte in de ondergrond wordt verwacht.

- Maar er zijn ook onzekerheden die nader onderzocht moeten worden, voordat er een doublet gerealiseerd kan worden.

- In de andere delen van de provincie ziet PanTerra geen mogelijkheden voor diepe geothermie, voor het Slochteren en de Trias Groep-reservoirs.

- Voor warmte-opslag zijn kansrijke lagen aanwezig in de provincie, met uitzondering van het oosten. Er zijn echter wel beperkingen in de ondergrondse eigenschappen, die nader onderzocht kunnen worden.

- Lage temperatuur geothermie is ook mogelijk in ondiepe lagen van de Noordzee Groep, vooral in het noorden van de provincie. Maar er zijn ook onzekerheden over deze ondiepe lagen.

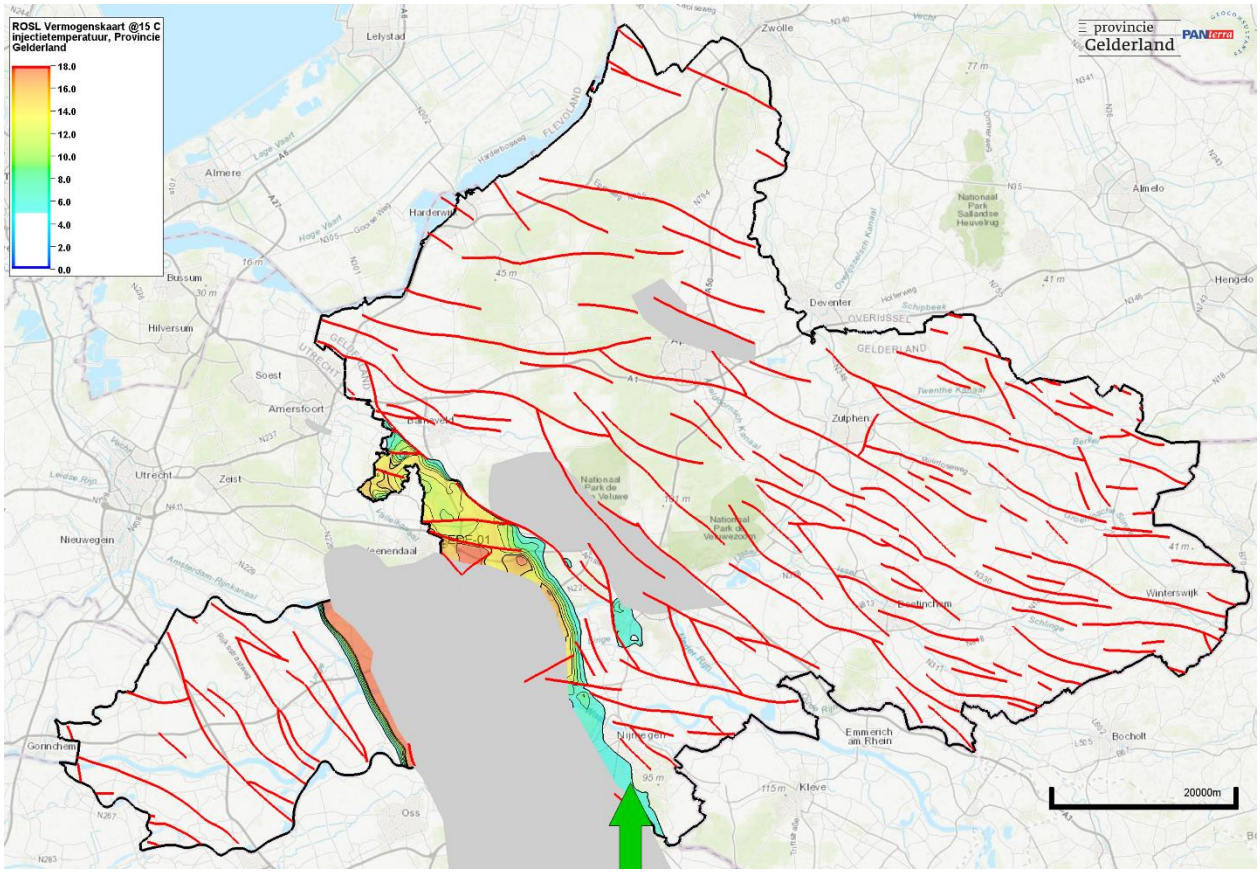
*Welke gesteentelaag is kansrijk voor geothermie?*

- In de provincie Gelderland is de Formatie van Slochteren het meest kansrijke reservoir (Figuur 0-1). Doorgaans heeft de Formatie van Slochteren een goede reservoirkwaliteit, tenzij het heel diep begraven ligt (>2500 m diep). Goede reservoirkwaliteit in het Slochterenreservoir is te vinden rond het zogenaamde Peel-Maasbommel Complex. Dit complex is een geologisch hoog, waarbij gesteenten dichter aan het oppervlak komen. Het complex strekt zich uit in een noordwest-zuidoost richting vanaf

Soest/Amersfoort. Dit is ook bevestigd door de gegevens uit de EDE-01 put; deze put is geboord als onderdeel van het EBN SCAN project. In de rest van de provincie ligt de Formatie van Slochteren zeer diep begraven, waardoor wij de reservoirkwaliteit als onvoldoende beoordelen voor economisch rendabele winning van geothermie.

- Er zijn vier reservoirs binnen de Trias-Groep. Deze reservoirs, die van goede kwaliteit kunnen zijn, zijn vanwege de zeer beperkte dikte (<40 m) in Gelderland vaak niet geschikt voor geothermie. Opgestelde vermogenskaarten van twee Trias-reservoirs lieten daarom zeer weinig vermogen zien (<1 MW), waardoor het Trias niet kansrijk is.

- Overige reservoirs in de provincie zijn niet geschikt voor geothermie, of het beeld is niet veranderd ten opzichte van 2022. Zeer ondiepe lagen van de zogenaamde Noordzee Groep (<500 m diep) zijn interessant voor warmte-opslag. Tot 1500 m diepte is lokaal lage temperatuur geothermie mogelijk uit de Noordzee Groep, of uit het Slochteren- reservoir in de kansrijke gebieden. Het vermogen is hoog daar waar de Formatie van Slochteren minder dan 1500 m diep gelegen is.




**Figuur 0-1: Vermogenskaart van de Formatie van Slochteren in de provincie Gelderland. Enkel gebieden met >5 MW zijn weergegeven met kleuren. Niet-gekleurde gebieden kennen geen of te weinig vermogen. Grijs vlak = Formatie van Slochteren niet aanwezig door erosie. Variant van het middel scenario, zonder put WYH-01.**

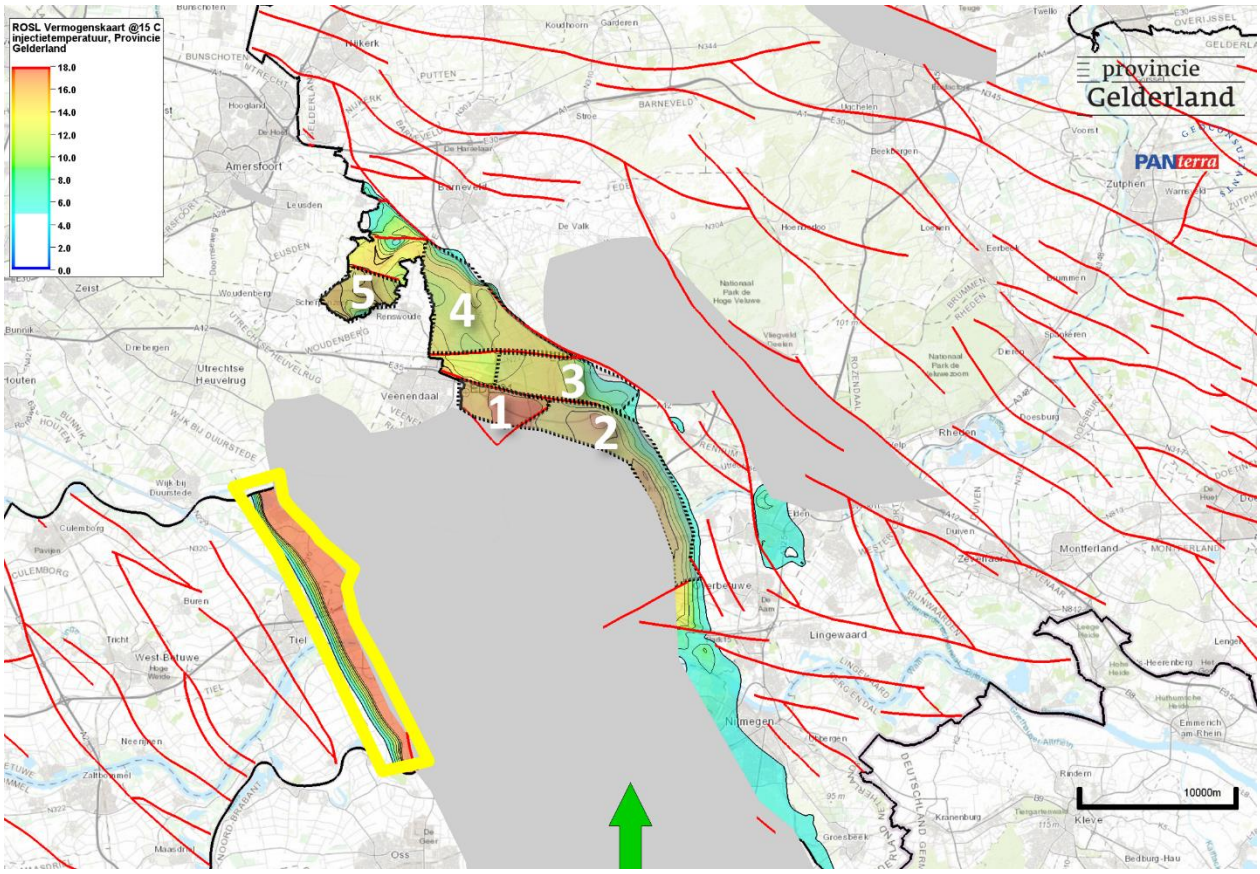
*Welke gebieden zijn (niet) kansrijk voor geothermie?*

- Voor de Formatie van Slochteren zijn vijf kansrijke gebieden, zogenaamde prospecten, voor geothermie vastgesteld (Figuur 0-2). Bij prospecten 1 en 2 wordt het hoogste vermogen geschat, ongeveer tot 18 MW. Dat vermogen neemt naar het noorden en oosten af tot ongeveer 5 MW bij de prospecten 4 en 5. Door de beperkte diepte van de Formatie van Slochteren is de

reservoirtemperatuur 45 tot 60 °C. Afhankelijk van de warmteafnemer kan een warmtepomp nodig zijn om de temperatuur verder op te waarderen. In overleg met de opdrachtgever zijn alleen prospecten 1 en 2 nader geanalyseerd, omdat er bij de andere prospecten onvoldoende warmtevraag is.

- Buiten de hierboven aangegeven prospecten ziet PanTerra onvoldoende potentie voor de ontwikkeling van geothermie op basis van een standaarddoublet voor de Formatie van Slochteren. Diverse innovaties zijn nog in ontwikkeling. Deze zijn echter nog niet voldoende kostenefficiënt en in dit onderzoek niet nader betrokken. Er is wel hoog-over gekeken naar een triplet, subhorizontaal boren en coproductie. Doorgaans geeft een triplet tweemaal zoveel vermogen, subhorizontaal boren geeft 20% extra vermogen en coproductie uit het Zechstein carbonaat ter plaatse van EDE-01 kan 1.24 MW toevoegen (geologische bijlage hoofdstuk 4.5).

- In de geel omlijnde zone ten westen van het Peel-Maasbommel Complex wordt geologisch een goede reservoirkwaliteit verwacht, maar er is te weinig putdata om dit te bevestigen. Er is daarom voor deze locatie geen prospect vastgesteld. Afhankelijk van de ontwikkelplannen kan hier aanvullende datavergaring waardevol zijn, bijvoorbeeld met een proefboring, om meer zekerheid te krijgen over de ondergrond en de kansrijkheid te bepalen.




**Figuur 0-2: De kaart toont een deel van de provincie Gelderland met vijf geïdentificeerde prospecten op basis van de Formatie van Slochteren vermogen groter dan 5 MW. Breuken zijn weergegeven als rode lijnen, de provinciegrens als een zwarte lijn en gebieden waar de Formatie van Slochteren door erosie afwezig is als grijze vlakken. Het geel-gearceerde gebied vormt geen prospect, hier is de ondergrondse onzekerheid te groot.**

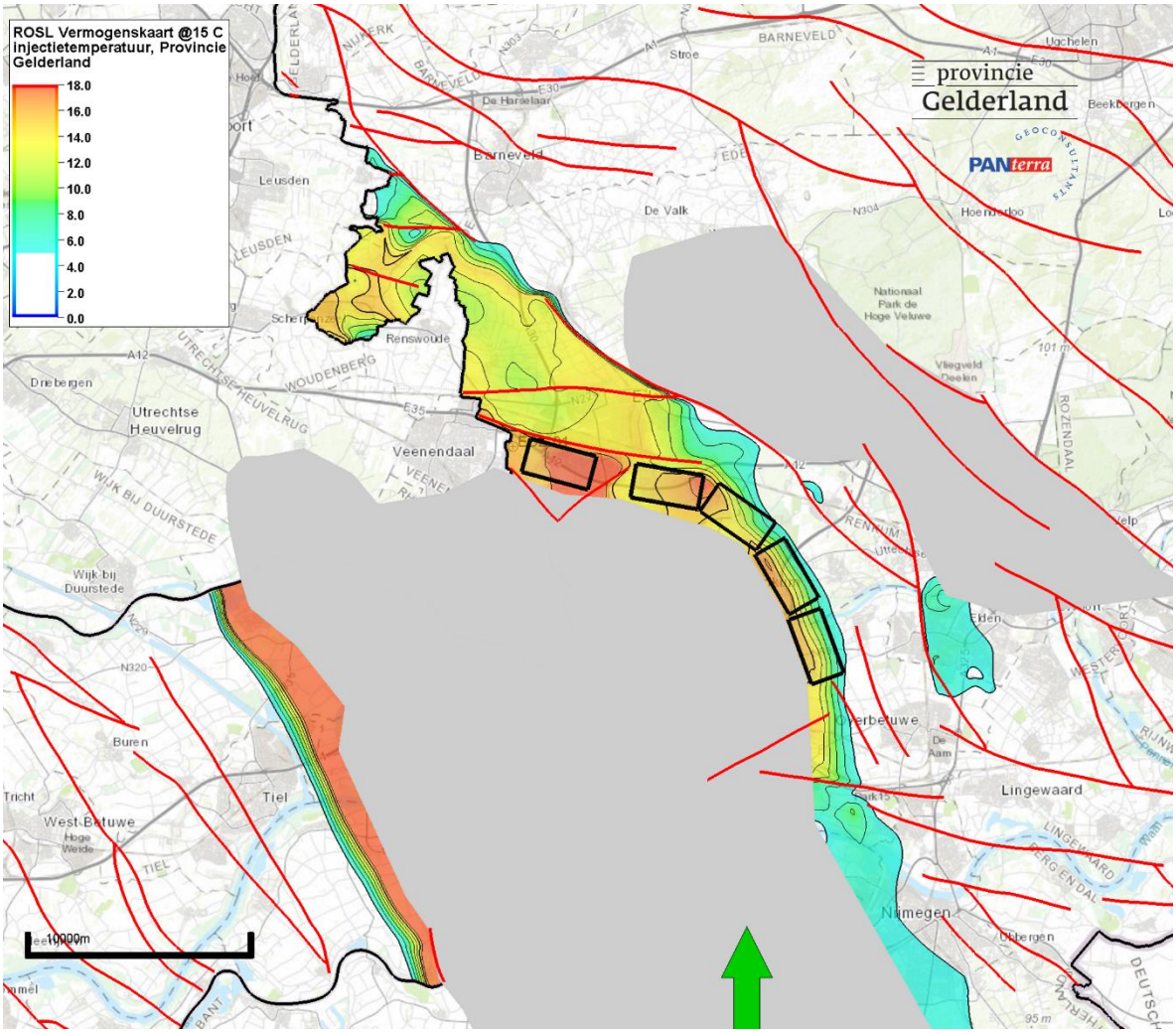
Tabel 0-2 toont een samenvatting van de eigenschappen van de ondergrond in prospecten 1 en 2.

**Tabel 0-2: Samenvatting van enkele belangrijke ondergrondse eigenschappen per prospect.**

| Prospect # | Typisch vermogen (MW) | Temperatuur reservoir (°C) | Dikte reservoir (m) | Transmissiviteit (Dm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14-18 | 45-60 | 60-80 | 15-125 |
| 2 | 5-18 | 45-55 | 30-55 | 20-100 |

*Waar zijn mogelijke doubletlocaties?*

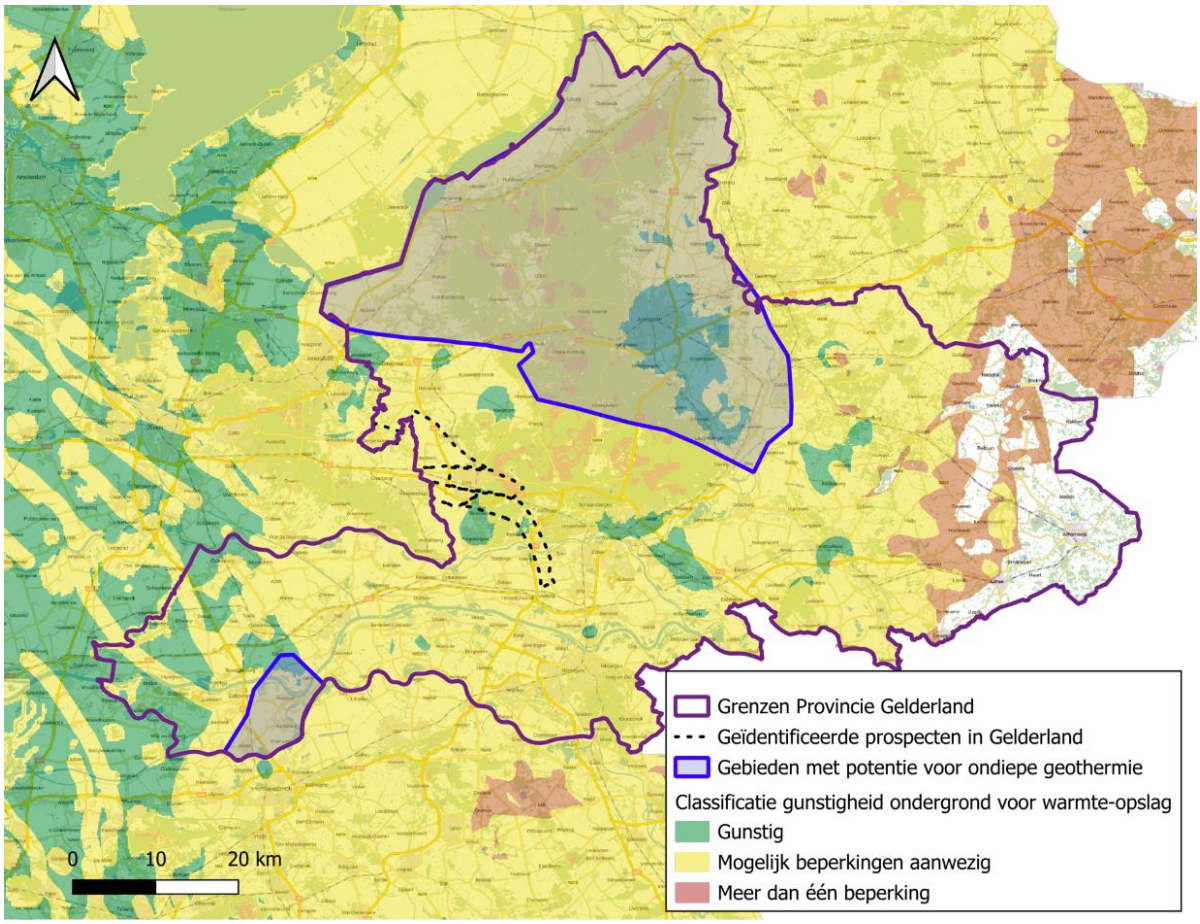
Binnen de prospecten 1 en 2 heeft PanTerra vijf mogelijke doubletlocaties geïdentificeerd (Figuur 0-3). In de kaart is elk doublet getekend met een oppervlakte van 3.000 bij 1.500 m, bij benadering voldoende voor een geschatte levensduur van dertig jaar voor het doublet. Meer gedetailleerde studies zijn nodig om te onderzoeken of realisatie van de doubletten mogelijk is, rekening houdend met de ondergrond én de bovengrond. Dit geldt ook voor de ondergrond aan de westkant van het Peel-Maasbommel Complex, waar momenteel de onzekerheid te groot is om doubletten in te tekenen.




**Figuur 0-3: Kaart van de mogelijke doubletlocaties in de provincie Gelderland, weergegeven als zwart omlijnde vlakken van 3000 × 1500 meter op de vermogenskaart. Alleen locaties met een vermogen groter dan 5 MW zijn weergegeven. De zone met een hoog vermogen aan de linkerkant van de kaart is uitgesloten, omdat hier te veel geologische onzekerheid bestaat.**

*Waar is warmte-opslag mogelijk?*

In Gelderland zijn de Peize- en Waalre Formatie, de Maassluis Formatie en de Oosterhout Formatie het meest geschikt voor warmte-opslag systemen. Warmte-opslag mag volgens de huidige wetgeving tot 500 m diepte. Figuur 0-4 toont dat voor het grootste deel van de provincie er mogelijk beperkingen zijn voor warmte-opslag vanuit het oogpunt van de ondergrond. De voornaamste beperkingen zijn de afwezigheid van een geschikte afsluitende kleilaag, of een laag zoutgehalte van het formatiewater. In de Betuwe is de ondergrond gunstig voor warmte-opslag. Daarnaast zijn er verspreid door de provincie een aantal gunstige plekken te vinden: bijvoorbeeld rond Apeldoorn, Arnhem, Doetinchem. In het oosten van de provincie zijn de omstandigheden ongunstig voor warmte-opslag.




**Figuur 0-4: Mogelijkheden voor warmte-opslag in de provincie Gelderland (op basis van Dinkelman et al., 2020), zie Tabel 6-1 voor criteria. De geothermie-prospecten zijn aangegeven als zwarte gestippelde lijnen. De blauw omlijnde gebieden duiden kansrijke gebieden aan voor lage temperatuur geothermie, waar >0.5 MW mogelijk is (op basis van ThermoGIS, 2026).**

*Waar is lage temperatuur geothermie mogelijk?*

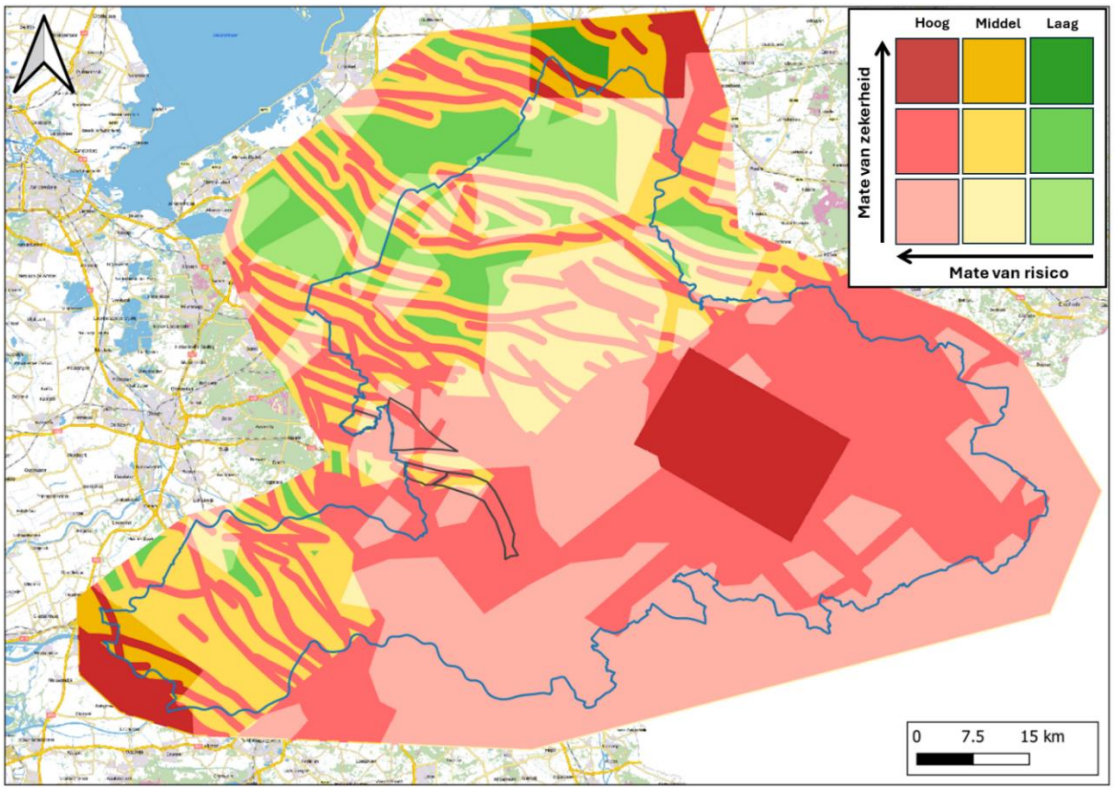
Lage temperatuur geothermie wordt gewonnen op diepten tussen 500-1500 m, met een temperatuurbereik van ongeveer 25-55 °C. De meest geschikte lagen zijn het Laagpakket van Orp, het Zand van Brussel Laagpakket en het Laagpakket van Berg. Sinds de studie van PanTerra & Witteveen+Bos in 2022 is er beperkt nieuwe data beschikbaar gekomen over ondiepe geothermie. Op basis van ThermoGIS is er potentie in het noorden van de provincie, rond Nijkerk, Putten, Ermelo, Nunspeet en rond Apeldoorn. Daarnaast is er potentie in het westen van de provincie rond Zaltbommel en Kerkdriel (Figuur 0-4). De vermogens zijn in het meest gunstige geval tot ~7 MW, maar doorgaans is rond 1-2 MW meer realistisch. Er is nog veel onbekend over de geschiktheid van de ondergrond voor lage temperatuur geothermie, zodat de onzekerheid over de potentie nog relatief groot is.

*Wat zijn de onzekerheden?*

Belangrijke risico's en onzekerheden voor de ondergrond zijn in kaart gebracht. Zo wordt duidelijk hoe groot de risico's zijn en waar aanvullende dataverzameling waardevol kan zijn. De drie belangrijkste risico's en onzekerheden zijn:

- Risico op een te geringe afstand tot breuken, door geologische complexiteit. Groen, laag risico: >1,5 km afstand van in kaart gebrachte breuken. Geel, matig risico: tussen 0,5 en 1,5 km afstand. Rood, hoog risico: binnen 0,5 km van breuken. Hoe dichter bij een breuk, hoe strenger de veiligheidseisen van Staatstoezicht op de Mijnen zijn.
- Risico op onvoldoende dikke reservoirs (Maatstaf: de bruto reservoirdikte*). Groen, laag risico op onvoldoende dikte: verwachte laag meer dan 70 m dik. Geel, matig risico: 40-70 m dik. Rood, hoog risico: minder dan 40 m reservoirdikte.
- Onzekerheid in de ondergrondse gegevens, aangegeven door de kleurentint. Donkere tint, hoge zekerheid: gebieden gedekt door 3D-seismiek. Matige tint, matige zekerheid: gebieden met alleen digitale 2D-seismische lijnen. Lichte tint, lage zekerheid: gebieden zonder digitale seismische dekking.

De kaart in Figuur 0-5biedt een regionaal overzicht van gebieden met een hoger risico zoals hierboven aangegeven en locaties waar aanvullende gegevens meer zekerheid geven. De kaart laat zien waar geothermisch potentieel verondersteld is en waar nog veel ondergrondse onzekerheden en risico's bestaan.




**Figuur 0-5: Totale risicokaart voor het Formatie van Slochteren-reservoir, gebaseerd op een combinatie van risico en onzekerheid. Kleuren geven het algemene ondergrondse risico voor het succesvol ontwikkelen van geothermie weer (groen: laag, geel: matig, rood: hoog). Tinten geven de zekerheid aan. Zwarte veelhoeken markeren de geïdentificeerde prospecten.**

*Bruto reservoirdikte = de gehele dikte van reservoirpakket, waar ook gesteenten in kunnen zitten die niet bijdragen aan stroming (bijvoorbeeld schalies).

*Wat zijn de voorgestelde vervolgstappen voor de provincie Gelderland?*
Op basis van de bevindingen beveelt PanTerra de volgende vervolgstappen aan:

**Aanvullende dataverzameling: seismiek en proefboring:** PanTerra stelt voor om 16 2D-seismische lijnen met een gezamenlijke lengte van ongeveer 123 km in de provincie Utrecht, Gelderland inclusief Regio Foodvalley uit te laten voeren. Zo zijn de risico's van de ondergrond in de prospecten verder in kaart te brengen. De voorgestelde locaties van de lijnen zijn indicatief en vragen tijdens de gedetailleerde planning aanpassing om rekening te houden met beperkingen aan de oppervlakte en met de vergunningseisen. Het voorstel voor seismiek en de locatie van de lijnen zijn mede gebaseerd op feedback van EBN. Ten tijde van de afronding van dit rapport (maart 2026) heeft EBN een plan gepresenteerd voor een seismische campagne in het noordoosten van de provincie Utrecht. Deze campagne biedt ook relevante informatie voor de provincie Gelderland. De seismische lijnen voorgesteld door PanTerra komen globaal overeen met de EBN campagne. Het doel van het seismisch onderzoek is hetzelfde. Seismiek campagnes van operators kunnen ook waardevolle inzichten bieden, maar deze seismiek is vaak 5 of 10 jaar vertrouwelijk. Daarnaast adviseert PanTerra om op twee locaties een proefboring te doen: 1) aan de westelijke grens van het Peel-Maasbommel complex nabij Tiel en 2) ten oosten van prospect 2, nabij Renkum. Deze locaties zijn gekozen uitgaande van de ondergrond. Het doel van deze proefboringen is om de onzekerheden over de reservoirkwaliteit te verminderen. Voordat een proefboring kan plaatsvinden is nader onderzoek vereist naar zowel de boven- als de ondergrond.

**Vergunningentraject geothermie:** mocht de provincie geïnteresseerd zijn geothermie verder te ontwikkelen, dan is het zinvol om een inschatting te maken van de financiële haalbaarheid van warmteproductie en -levering. In eerste instantie voldoet een globale financiële berekening van kosten en opbrengsten. Hierbij moet de warmtevraag worden meegenomen. Samen met dit geologische rapport vormt dit een basis voor de aanvraag van een Toewijzing Zoekgebied. Het ia aan de provincie of gemeentes om te bepalen of ze zelf een zoekvergunning aanvragen of dat ze dit aan de markt (een operator) overlaten. Het vergunningentraject voor geothermie loopt volgens het stappenplan zoals weergegeven in Figuur 0-6.




**Figuur 0-6: De vijf stappen die een aardwarmteproject doorloopt, inclusief de verschillende activiteiten die ondernomen worden per stap (geothermie.nl, ECW.nl).**

# Inhoudsopgave


Samenvatting en aanbevelingen ..... 3

Inhoudsopgave ..... 11

1 Inleiding ..... 14

1.1 Aanleiding studie ..... 14
1.2 Opbouw rapport ..... 14
1.3 Doelstellingen ..... 14
1.4 Studiegebied ..... 14

2 Introductie geothermie ..... 16

3 Werkwijze ..... 18

3.1 Seismische interpretatie ..... 18
3.2 Reservoirkwaliteit ..... 19
3.3 Geothermische vermogenskaarten ..... 19
3.4 Prospecten en doubletlocaties ..... 19
3.5 Warmte-opslag en ondiepe geothermie ..... 20

4 Mogelijke reservoirs ..... 21

4.1.1 Noordzee Groep (Kenozoïcum) ..... 23
4.1.2 Rijnland en Schieland Groepen (Krijt-Jura) ..... 23
4.1.3 Onder- en Boven Germaans Trias Groepen (Trias) ..... 23
4.1.4 Zechstein en Boven-Rotliegend Groepen (Perm) ..... 24
4.1.5 Limburg Groep (Carboon) ..... 24

5 Geothermische vermogenskaarten ..... 26

5.1 Van reservoirkwaliteit naar vermogen ..... 26
5.1.1 Begravingsgeschiedenis ..... 26
5.1.2 Structurele elementen in de ondergrond van Gelderland ..... 27
5.1.3 Onzekerheid van de reservoirkwaliteit ..... 28
5.2 Vermogenskaart Onder- en Boven Germaans Trias Groepen ..... 28
5.3 Vermogenskaarten Formatie van Slochteren (Rotliegend Groep) ..... 30
5.4 Prospecten en doubletlocaties ..... 32
5.4.1 Prospecten in de provincie Gelderland ..... 32
5.4.2 Mogelijke doubletlocaties ..... 35

6 Mogelijkheden voor warmte-opslag en lage temperatuur geothermie ..... 37

6.1 Geschikte aquifers voor warmte-opslag ..... 37
6.2 Warmte-opslag bij prospecten ..... 39
6.3 Ondiepe geothermie in de provincie Gelderland ..... 39

7 Onzekerheidskaarten en vervolgstappen ..... 41

7.1 Onzekerheidskaarten ..... 41
7.2 Aanvullend geologisch onderzoek ..... 43
7.2.1 Aanbevelingen voor acquisitie van aanvullende seismische data ..... 43
7.2.2 Aanvullende proefboring ..... 45
7.3 Vervolgstappen voor de provincie ..... 47

1 Inleiding geologische bijlage ..... 2
2 Seismische interpretatie ..... 2
2.1 Database ..... 2
2.2 Werkwijze seismische interpretatie ..... 3
2.3 Well-to-Seismic Tie (Koppeling seismiek en putten) ..... 4
2.4 Interpretatie horizonten ..... 4
2.4.1 Basis Boven-Noordzee Groep (Basis NU) ..... 6
2.4.2 Basis Onder-Noordzee Groep (Basis N, Basis Kenozoïcum) ..... 7
2.4.3 Basis Krijtkalk Groep (Base CK) ..... 8
2.4.4 Basis Rijnland Groep (Basis KN) ..... 8
2.4.5 Basis Schieland Groep (Base S) ..... 10
2.4.6 Basis Altena Groep (Basis AT) ..... 11
2.4.7 Basis Onder-Germaanse Trias Groep (Basis RB) ..... 12
2.4.8 Basis Zechstein (Basis ZE) ..... 12
2.5 Gridding Algoritme ..... 13
2.6 Tijd-diepte conversie ..... 14
2.6.1 Keuze velocity model ..... 14
2.7 Dieptekaart van het Top Boven-Germaanse Trias Groep en Top Formatie van Slochteren ..... 16
2.8 Top Formatie van Slochteren dieptekaarten onzekerheden ..... 17
3 Onderzoek reservoirkwaliteit ..... 18
3.1 Inleiding onderzoek reservoirkwaliteit ..... 18
3.2 Voorbereiding en kwaliteitscontrole (QC) op beschikbare data ..... 19
3.3 Evaluatie van putloggegevens ..... 19
3.3.1 Modellering van kleigehalte ..... 19
3.3.2 Porositeit & Water Saturatie ..... 20
3.3.3 Netto dikte van het Reservoir ..... 22
3.4 Modellering permeabiliteit ..... 23
3.4.1 Kernporositeit ..... 24
3.4.2 Permeabiliteit boorkern ..... 26
3.4.3 Permeabiliteit transformaties op basis van putdata ..... 27
3.4.4 Permeabiliteit geothermisch brijn ..... 32
3.5 Porositeit-dieptetrend ..... 34
3.5.1 Onzekerheid en rechtvaardiging van de porositeit-diepte trend ..... 38
3.6 Evaluatie puttest ..... 41
3.7 Resultaten en Evaluatie van de Data-analyse ..... 44
3.8 Beperkingen en onzekerheden methode ..... 51
3.9 Conclusies onderzoek reservoirkwaliteit ..... 51
4 Geothermische vermogenskaarten ..... 52
4.1 Doelstelling kaarten ondergrondse eigenschappen ..... 52
4.2 Inleiding verschillende ondergrondse eigenschappen ..... 52
4.3 Methode voor het in kaart brengen van eigenschappen ..... 53
4.3.1 Petrofysische trends en onzekerheden in ondergrondse eigenschappen ..... 55
4.3.2 Kaart met reservoirdiepte ..... 62
4.3.3 Brutodiktekaarten ..... 62
4.3.4 Dieptekaart middelpunt reservoir ..... 63
4.3.5 Temperatuur middelpunt reservoir ..... 63
4.3.6 ΔT-kaart ..... 63

4.3.7 Porositeitskaarten ..... 64
4.3.8 Permeabiliteitskaarten ..... 65
4.3.9 Kaarten netto-brutoverhouding (N/G) ..... 65
4.3.10 Netto zanddikte ..... 65
4.3.11 KH ..... 65
4.3.12 Saliniteit ..... 66
4.3.13 Druk ..... 66
4.3.14 Dichtheid ..... 66
4.3.15 Viscositeit ..... 66
4.3.16 Warmtecapaciteit ..... 67
4.3.17 Debiet ..... 67
4.3.18 Vermogen ..... 67
4.4 Aannames bij de vermogenskaarten ..... 68
4.5 Alternatieve ontwerpen voor meer vermogen ..... 69
4.5.1 Coproductie ZEZ1F ..... 69
4.5.2 Horizontaal boren ..... 69
4.5.3 Aanbeveling alternatieve ontwerpen geothermie ..... 70

5 Screening warmte-opslag en ondiepe aardwarmte ..... 71

5.1 Peize en Waalre Formatie ..... 72
5.2 Maassluis Formatie ..... 74
5.3 Oosterhout Formatie ..... 74
5.4 Conclusies screening warmte-opslag ..... 77

6 Geologische trends ..... 78

6.1 Zechstein 1 Randcarbonaat (ZEZ1F) ..... 78
6.1.1 Zechstein algemeen ..... 78
6.1.2 ZEZ1F reservoirkwaliteit ..... 78
6.2 Formatie van Slochteren trends ..... 80

7 Onzekerheidskaarten ..... 84

7.1 Geologische complexiteit / nabijheid van breuken ..... 84
7.2 Aanwezigheid van een voldoende dik reservoir ..... 85
7.3 Onzekerheid ondergrondse gegevens ..... 86
7.4 Totale risico- en onzekerheidskaart ..... 87

8 Technische vervolgstappen en -onderzoeken ..... 90

9 Bronnenlijst ..... 91

Appendices ..... 93

Lijst van Figuren ..... 93

Lijst van tabellen ..... 98

Formatie van Slochteren (ROSL) kaarten ter ondersteuning van de vermogenskaarten ..... 99
Onder Volpriehausen Laagpakket kaarten ter ondersteuning van de vermogenskaarten ..... 105
Röt Randzandsteen Laagpakket kaarten ter ondersteuning van de vermogenskaarten ..... 110
Appendices studie reservoirkwaliteit ..... 115

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding studie

De provincie Gelderland zet zich in om collectieve warmtelevering (mede) vanuit geothermie haalbaar te maken. Er is al geologische kennis over de inzetbaarheid van geothermie; de studie van PanTerra & Witteveen+Bos uit 2022 is de voornaamste bron hiervoor. De nieuwste relevante data rond Gelderland komen uit het EBN SCAN project. Dit betreft onder meer de uitvoering van proefboringen (bijvoorbeeld AMS-01, BLT-01, EDE-01) gericht op de exploratie van geothermie en het herverwerken van 2D seismische data. Hiervoor heeft de provincie PanTerra (PTG) benaderd om hier onderzoek naar te doen. Op basis van deze nieuwe data wil de provincie Gelderland een beter beeld krijgen van de potentie van de ondergrond voor diepe en ondiepe geothermie. Tijdens de gehele looptijd van de studie is feedback ontvangen van EBN en TNO, die het technische werk hebben beoordeeld.

Dit rapport beschrijft de belangrijkste bevindingen uit het geologische onderzoek.

## 1.2 Opbouw rapport

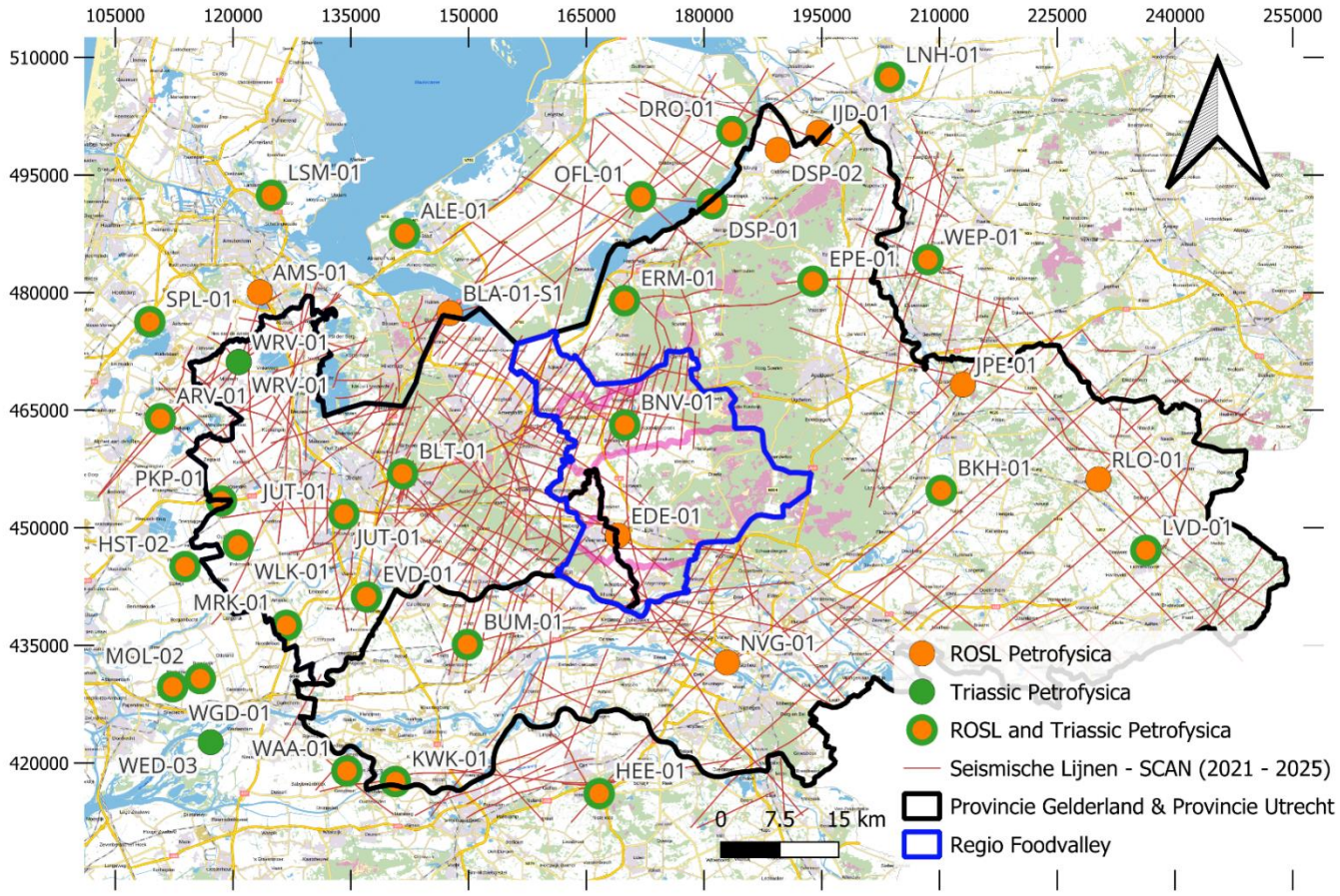
Dit rapport is opgebouwd uit twee onderdelen: het hoofdrapport en de geologische bijlage. Het hoofdrapport is voor een breed publiek geschreven en bevat alle belangrijke uitkomsten van de studie. Er wordt in het rapport aanvullende uitleg gegeven over geologische onderwerpen. Het hoofdrapport begint met een publieksvriendelijke samenvatting en aanbevelingen voor de provincie Gelderland. De geologische bijlage (zie bijlage hoofdstuk 1) bevat een uitgebreide omschrijving van de stappen en uitkomsten van het geologisch onderzoek, geschreven voor deskundigen of geïnteresseerden.

## 1.3 Doelstellingen

Het doel van dit onderzoek is om op basis van het onderzoek uit 2022 en de recent beschikbaar gekomen informatie een nieuwe inschatting te geven van het geothermische potentieel in de ondergrond. Zo kan de provincie Gelderland betere besluiten nemen over het benutten van geothermie als duurzame bron van warmte. De provincie heeft verzocht om de resultaten in een toegankelijk rapport op te schrijven, geschikt voor een breed publiek. Daarnaast wil de provincie een globaal beeld krijgen van de geschiktheid van de ondergrond voor warmteopslag.

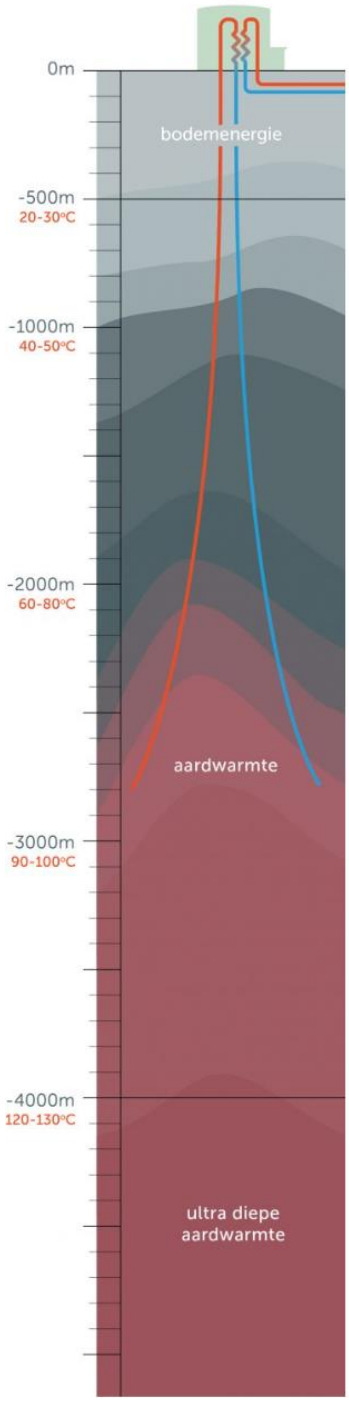
## 1.4 Studiegebied

Het onderzoek richt zich op het grondgebied van de provincie Gelderland. Voor de ondergrond is gekeken naar ondiepe (500-1500m) en diepe (1500-4000m) geothermie. De focus ligt voornamelijk op de Formatie van Slochteren (binnen de Rotliegend Groep), maar richt zich ook op andere kansrijke gesteentelagen. Deze studie is gelijktijdig uitgevoerd voor twee andere opdrachtgevers: Provincie Utrecht en Regio Foodvalley. Er wordt gewerkt vanuit één grote dataset, die de grondgebieden voor alle drie opdrachtgevers dekt (Figuur 1-1). Voor de Provincie Utrecht en Regio Foodvalley zijn aparte rapporten opgesteld.




**Figuur 1-1: Studiegebied rond de provincie Utrecht, provincie Gelderland en Regio Foodvalley, waarbij seismische lijnen en putten zijn weergegeven die meegenomen zijn in de analyse van dit onderzoek.**

# 2 Introductie geothermie




**Figuur 2-1: Overzicht van de dieptes waarop bodemenergie (0-500m), aardwarmte (500-4000m) en ultradiepte aardwarmte (>4000 m) worden gewonnen. De rode put is de productieput, die het warmte water oppompt. De blauwe put is de injector, die het afgekoelde water weer injecteert.**

Bij geothermie (= aardwarmte) wordt warm tot heet water uit de aarde onttrokken. Met behulp van een warmtewisselaar wordt de warmte uit het water gehaald (geproduceerd), waarna het afgekoelde water weer terug de ondergrond in wordt gepompt. Vaak worden hierbij twee putten geboord (een zogenaamd doublet) waarbij een put het warme, zeer zoute water (brijn) produceert en de andere put het afgekoelde water injecteert (Figuur 2-1) (Geothermie Nederland et al., 2018). Er zijn ook systemen waarbij gebruikt wordt gemaakt van één put of meer dan twee putten. Een voorbeeld van het laatste systeem is in Nederland te vinden in de Koekoekspolder, waar momenteel twee productieputten en één injectieput actief zijn (nlog.nl).

Aardwarmte wordt in Nederland typisch gewonnen uit lagen van 500-4000 meter diepte. Ondiepere warmtewinning wordt bodemenergie genoemd. Als er warmte wordt gewonnen uit lagen die dieper liggen dan 4000 meter, wordt het ultra-diepe aardwarmte genoemd (Figuur 2-1).

*Gebruik en hoeveelheid warmte*

De warmte die uit de diepe ondergrond wordt gewonnen, wordt gebruikt voor het verwarmen van kassen, huizen en gebouwen. Hoeveel warmte er kan worden gewonnen, hangt van veel verschillende factoren af. Hoe dieper je in de ondergrond komt, hoe warmer de brijn is en destemeer warmte gewonnen kan worden. Als de temperatuur van het gewonnen brijn hoog genoeg is, kan het ook worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. Een andere belangrijke factor is de doorlaatbaarheid van het gesteente waaruit brijn wordt geproduceerd. Deze doorlaatbaarheid wordt juist kleiner bij diepere reservoirs. Hoe groter de doorlaatbaarheid van het gesteente, hoe meer brijn er kan worden geproduceerd en hoe meer warmte er dus kan worden onttrokken (allesoveraardwarmte.nl, geothermie.nl).

Eind 2025 waren er in Nederland 23 aardwarmte-locaties. Deze locaties bespaarden in 2023 in totaal 365.000 ton $CO_2$ en 193 miljoen $m^3$ aardgas (geothermie.nl).

Al het water dat wordt opgepompt, wordt ook weer terug in de bodem geïnjecteerd. Het systeem blijft in balans. Hierdoor is er minimale verandering van de druk in de bodem, in tegenstelling tot de winning van aardgas. Aardbevingen of bodemdaling is hierdoor onwaarschijnlijk. Daarnaast worden de putten in Nederland op ruime afstand van breuken geboord om de kans op aardbevingen zo klein mogelijk te houden.

*Vervuiling voorkomen*

Bij het ontwerp van de put wordt ook rekening gehouden met het voorkomen van vervuiling in de ondergrond. Zo worden er robuuste materialen gebruikt die bestand zijn tegen corrosieve eigenschappen van de natuurlijk voorkomende zeer zoute brijn. Daarnaast worden de lagen waar doorheen wordt geboord goed afgedicht met cement. Samen met monitoring en onderhoud wordt zo voorkomen dat brijn van de

ene aardlaag in de andere aardlaag terecht komt en verontreiniging veroorzaakt. De regelgeving voor de winning van aardwarmte is streng om zo verontreiniging van het grondwater te voorkomen. In gebieden die zijn aangewezen voor huidige of toekomstige grondwaterwinning is boren voor aardwarmte momenteel verboden (*Aardwarmte*, 2022; allesoveraardwarmte.nl; geothermie.nl).

*Warmte*

De hoeveelheid thermische energie die uit de geothermische brijn wordt gewonnen, hangt af van drie factoren. Dit zijn: het debiet, het temperatuurverschil en de soortelijke warmte van de vloeistof. De soortelijke warmte van de vloeistof is een gegeven, de andere factoren kunnen wel veranderen, het zijn ontwerpkeuzes. Het temperatuurverschil is de temperatuurdaling van de vloeistof aan de oppervlakte-installatie. Als de geothermische brijn wordt geproduceerd op 80 °C en wordt geïnjecteerd op 35 °C, wordt er meer thermische energie gewonnen dan als deze met 50 °C wordt geïnjecteerd. De mate van afkoeling is een ontwerp-keuze. In geothermieprojecten wordt de vloeistof doorgaans afgekoeld tot circa 35 °C voor injectie, maar er kan ook kouder geïnjecteerd worden. Daarnaast bepaalt het debiet de hoeveelheid geothermische vloeistof die beschikbaar is om warmte uit te onttrekken en heeft dus direct invloed op het geothermische vermogen dat het systeem kan leveren. Het debiet is afhankelijk van de reservoirkwaliteit, het putontwerp en de doubletconfiguratie.

Samenvattend zijn er meerdere factoren die een rol spelen in het succes en uiteindelijk geothermische vermogen dat uit een systeem kan worden gehaald. Deze factoren zijn: de kwaliteit van het geologische reservoir (bv. doorlaatbaarheid, netto reservoirdikte,) en de operationele parameters van een doublet (bv. injectiedruk, temperatuurverschil). Het totale geothermische vermogen is de combinatie van deze factoren.

# 3 Werkwijze

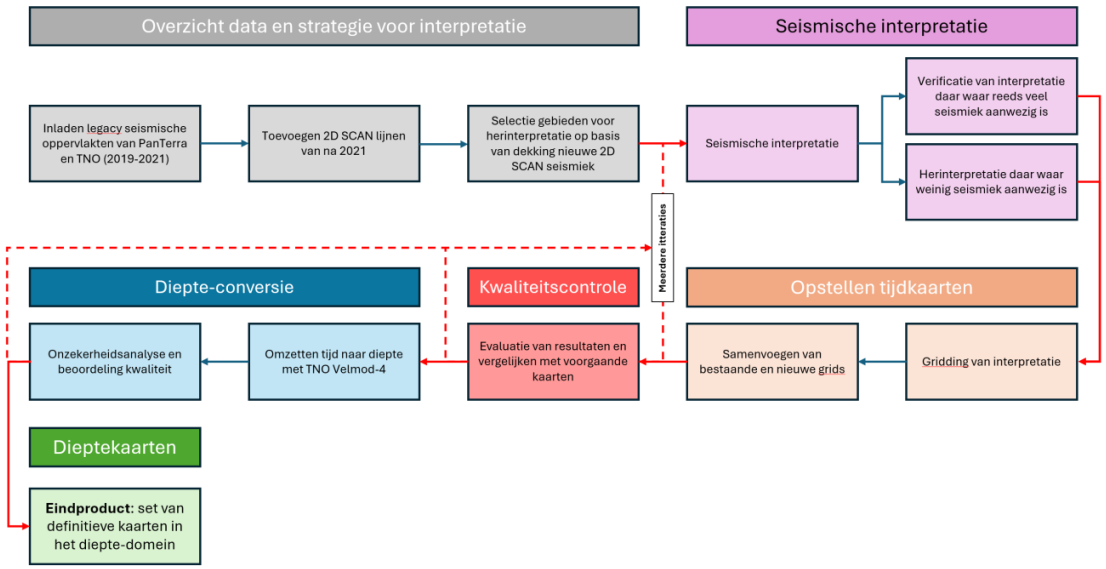
Deze studie is gericht op het geothermische potentieel van de ondergrond in de provincie Gelderland. Voor dit geologische onderzoek heeft PanTerra gebruik gemaakt van alle relevante openbare gegevens en interne expertise. De onderstaande belangrijke onderwerpen zijn onderzocht.

## 3.1 Seismische interpretatie

Seismische interpretatie is het analyseren van geluidsgolven die een 2D of 3D-beeld van de ondergrond geven. Zo worden aardlagen en belangrijke structuren zoals breuken in kaart gebracht. Seismische interpretatie helpt om beter te begrijpen wat er in de ondergrond aanwezig is. Daarmee kunnen we onder andere:

- Diepte en temperatuur bepalen: hoe dieper je gaat, hoe warmer het wordt. Als we de diepte niet goed inschatten, schatten we ook het geothermisch potentieel te hoog of te laag in.
- De dikte van het reservoir vaststellen: hoe beter het beeld van de ondergrond, hoe nauwkeuriger we kunnen bepalen hoe dik een reservoir is. Dit heeft direct invloed op hoeveel warmte er gewonnen kan worden.
- De omvang van het reservoir in kaart brengen: door een betere interpretatie zien we hoe ver deze lagen zich uitstrekken en of er binnenin barrières of onderbrekingen zitten.
- Belangrijke eigenschappen van het reservoir inschatten: we kijken hoe goed water kan worden opgeslagen en door het reservoir kan stromen. Deze eigenschappen hangen af van de diepte en bepalen hoe goed een geothermische bron kan presteren.

Kortom: door de seismische interpretatie te verbeteren, verkleinen we de onzekerheid over de ondergrond. Dit zorgt voor een veiligere en efficiëntere ontwikkeling van geothermie. In dit onderzoek is gekozen voor een update van de seismische interpretatie van de Utrecht studies uit 2021 en de Gelderland studies uit 2022. De nieuwe seismische data uit het EBN SCAN project zijn geïntegreerd, en daar waar nodig is de ondergrond opnieuw in kaart gebracht. De focus ligt daarbij vooral op gebieden die voorheen een beperkte dekking van seismische data hadden. Figuur 3-1 beschrijft de gehele werkwijze voor seismische interpretatie in dit onderzoek. De volledige beschrijving van de werkwijze is gegeven in de geologische bijlage, hoofdstuk 2.




**Figuur 3-1: Beschrijving van de werkwijze bij de actualisatie van de regionale seismische interpretatie.**

## 3.2 Reservoirkwaliteit

Naast seismische data brengt EBN SCAN ook waardevolle data over de ondergrondse eigenschappen. De SCAN putten AMS-01, BLT-01 en EDE-01 leveren inzicht in de geschiktheid van de ondergrond voor geothermie, daar waar voorheen weinig data was. Voor de provincie Gelderland zijn alle SCAN-putten relevant. Door middel van een petrofysische analyse heeft PanTerra de reservoirkwaliteit van de ondergrond onderzocht voor 44 putten in het gehele grondgebied van Utrecht en Gelderland. Daarbij is onderzocht hoe geschikt de ondergrond is voor het doorstromen van vloeistof, op basis van putgegevens. Bij geothermie is van groot belang dat water makkelijk door een gesteente kan stromen. Evenals bij de seismische interpretatie zijn de putten geboord na 2021, voor de petrofysische analyse geïntegreerd in de bestaande dataset van de 2021 Utrecht en de 2022 Gelderland studie. Een uitgebreide beschrijving van de petrofysische analyse is te vinden in hoofdstuk 3 van de geologische bijlage.

## 3.3 Geothermische vermogenskaarten

Op basis van de seismische interpretatie en reservoirkwaliteit kunnen we voorspellen waar de reservoirs binnen het studiegebied voorkomen en welke eigenschappen daarbij verwacht kunnen worden. De volgende stap is het opstellen van geothermische vermogenskaarten. Dit zijn kaarten die het verwachte vermogen laat zien voor een aardwarmte-installatie. Er is een eigenschappenkaart gemaakt voor de Formatie van Slochteren (Boven Rotliegend Groep) en van twee reservoirs binnen de Boven- en Onder-Germaanse Trias Groepen (Onder Volpriehausen Laagpakket & Röt Randzandsteen Laagpakket) om de reservoir-eigenschappen binnen de provincie Gelderland te evalueren. Andere reservoirs die geëvalueerd zijn in het Paleogeen, de Schieland Groep en de Zechstein Groep, bleken minder geschikt voor de conventionele winning van aardwarmte, maar mogelijk wel geschikt voor warmte-opslag of ondiepe (lage temperatuur) aardwarmte.

De vermogenskaarten gaan uit van een standaard doubletsysteem en berekent op basis van de ondergrondse eigenschappen welk geothermisch vermogen haalbaar is in de provincie. Er zijn vier scenario's getoetst om ondergrondse onzekerheden in acht te nemen, deze zijn uitgebreid beschreven in de geologische bijlage, hoofdstuk 4.3.1. Daarnaast zijn er twee injectietemperaturen getoetst: 35 °C en 15 °C. De in dit hoofdrapport gepresenteerde vermogenskaarten zijn voor 15 °C injectie. Hier is voor gekozen omdat de temperatuuropbrengst bij de kansrijke gebieden anders erg laag is bij 35 °C injectie, waardoor het resulterende vermogen ook laag is.

## 3.4 Prospecten en doubletlocaties

Op basis van de vermogenskaarten van de Formatie van Slochteren reservoir zijn kansrijke gebieden voor de ontwikkeling van geothermie aangewezen voor de provincie Gelderland. Deze kansrijke gebieden worden in dit onderzoek *prospecten* genoemd. Een prospect is dus een gebied waar – als het gaat om de ondergrond – mogelijk geothermie ontwikkeld kan worden. Grootschalige breuken in de ondergrond op het niveau van de Slochteren-reservoir bepalen de grenzen van prospecten. De reden hiervoor is dat doubletten in Nederland meestal zo ver mogelijk van breuken worden geplaatst. De in de seismische interpretatie opgemerkte breuken en de TNO regionale breuken zijn hiervoor gebruikt. Daarnaast is rekening gehouden met geografische grenzen, zodat prospecten alleen binnen het grondgebied van de provincie Gelderland vallen.

Voor de analyse van mogelijke doubletlocaties zijn vlakken ingetekend met een formaat van 3000 meter bij 1500 meter. Binnen zo'n vlak kan één doublet geplaatst worden, met een putafstand van 1500 meter. Het doublet heeft naar verwachting een levensduur van dertig jaar. Daarnaast is het vlak bij benadering

voldoende groot zodat het koudefront binnen het vlak blijft. Het koudefront ontstaat in de loop van jaren door injectie van afgekoeld water in het reservoir en is o.a. bepalend voor de levensduur en veiligheid van geothermie. Bij de analyse voor doubletlocaties is primair uitgegaan van de ondergrond.

## 3.5 Warmte-opslag en ondiepe geothermie

In dit onderzoek zijn aquifers op ondiepe (<500 meter) en middelmatige diepte (500-1500 meter) in kaart gebracht voor warmte-opslag en ondiepe aardwarmte, in de buurt van doubletlocaties waar aardwarmte mogelijk geproduceerd kan worden. Daartoe is een literatuurstudie uitgevoerd om vast te stellen welke aquifers er in de ondergrond van provincie Gelderland aanwezig zijn en wat daarvan de eigenschappen zijn. De studie Dinkelman et al. (2020) geeft een regionaal beeld voor zandlagen en hoe kansrijk deze zijn voor warmte-opslag in de ondiepe ondergrond. Voor de analyse van ondiepe aardwarmte is ThermoGIS gebruikt. ThermoGIS biedt een algemene inschatting van wat de ondergrondse eigenschappen zijn en welk vermogen daarbij verwacht kan worden, op basis van regionale modellen. De informatie kan echter verouderd zijn.

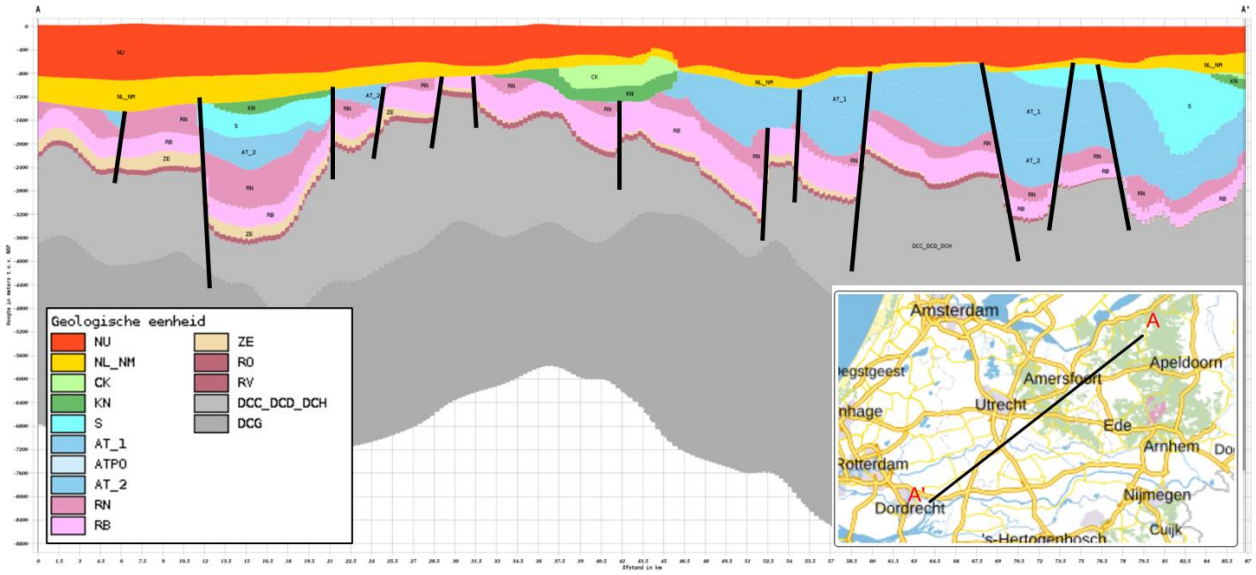
Tot slot is een onzekerheidsanalyse uitgevoerd (hoofdrapport sectie 7, geologische bijlage hoofdstuk 7) en is er advies gegeven over mogelijke vervolgstappen.

De volgende hoofdstukken beschrijven de belangrijkste bevindingen van de studie. Dit omvat de welke lagen het meest kansrijk zijn, de belangrijkste geothermische vermogenskaarten voor de Formatie van Slochteren en reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen, aangegeven kansrijke gebieden voor geothermie, mogelijke doubletlocaties, mogelijkheden voor warmte-opslag en/of ondiepe aardwarmte, een onzekerheidsanalyse en mogelijke vervolgstappen voor de provincie. De volledige set aan resultaten, evenals achterliggende analyses, zijn gegeven in de geologische bijlage.

# 4 Mogelijke reservoirs

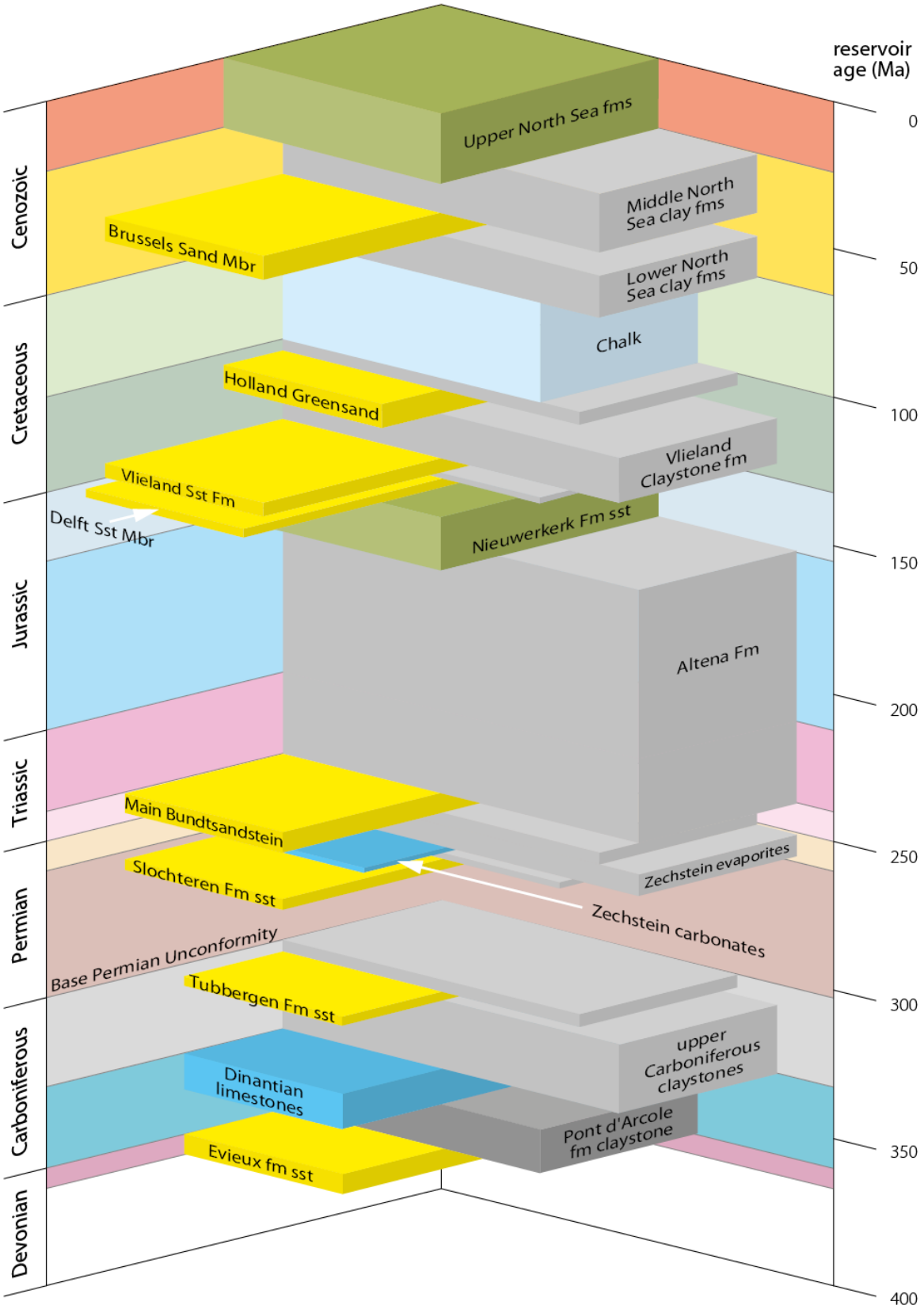
In het onderzoek is gekeken naar alle mogelijke reservoirs voor de ontwikkeling van geothermie. Het gaat dan om ondergrondse reservoirs op diepten van meer dan 300 meter. De focus van het onderzoek ligt op de Formatie van Slochteren gesteentelaag, maar er wordt ook gekeken naar andere kansrijke reservoirs, zoals in de Noordzee Groep, Schieland Groep, Onder- en Boven- Germaanse Trias Groepen, Zechstein Groep en Limburg Groep.

In de ondergrond van Nederland komen verschillende water-doorlatende (poreuze) reservoirs voor die geschikt kunnen zijn voor geothermie. Daarnaast zijn er ook niet-poreuze gesteenten afgezet die afsluitende lagen kunnen vormen. In totaal is het pakket afzettingen, ook wel sedimenten genoemd, in Nederland tot wel 10 kilometer dik. Door de geologische geschiedenis zijn deze gesteenten afgezet, geërodeerd, begraven, opgeheven en verbreukt (Figuur 4-1). Dit heeft een grote invloed op de reservoirkwaliteit en hoe kansrijk een reservoir is voor geothermie. De reservoirkwaliteit is dan ook niet hetzelfde in de gehele ondergrond. Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende gesteentepakketten in de ondergrond van de provincie Gelderland en hoe geschikt deze zijn voor de ontwikkeling van geothermie. In deze studie zijn alleen geschikte gesteentepakketten nader onderzocht.




**Figuur 4-1: Schematische dwarsdoorsnede door de ondergrond van provincie Utrecht en Gelderland en Regio Foodvalley (DINOloket), waar het verloop van verschillende aardlagen (kleuren) in de ondergrond zichtbaar is. Hierbij is te zien dat de reservoirs op verschillende diepten voorkomen, doorsneden zijn door breuken en verschillende dikten vertonen langs de dwarsdoorsnede. Zwarte lijnen = breuken, RO = Rotliegend Groep.**

Hoe kansrijk een reservoir voor geothermie is, hangt van verschillende factoren af: de reservoirkwaliteit (doorlaatbaarheid), de temperatuur in het reservoir, de vorm van het reservoir en de dikte van het reservoir. Doorgaans zijn poreuze zandgesteenten interessant voor geothermie omdat ze een goede reservoirkwaliteit hebben. In deze studie is ook gekeken naar poreuze kalkstenen in het Zechstein Laagpakket. Figuur 4-2 toont de opeenvolging van lagen (ook wel stratigrafie genoemd) in de Nederlandse ondergrond. Deze gesteentepakketten worden hieronder besproken, in volgorde van ondiep naar diep in de ondergrond. De gesteentepakketten zijn gesorteerd op hun geologische groepen. Tabel 5-1 geeft een samenvatting van de groepen en de acties die in dit onderzoek zijn ondernomen om de potentie voor geothermie te bepalen.




**Figuur 4-2: Stratigrafische kolom van geothermie reservoirs en afsluitende lagen in de Nederlandse ondergrond. Zandsteen reservoirs zijn geel, carbonaat reservoirs zijn blauw. Afsluitende lagen zijn grijs. De lengte van de balken geven de kwaliteit van het gesteente aan (Mijnlieff et al. in ten Veen et al., 2025). Ma = miljoen jaar geleden.**

### 4.1.1 Noordzee Groep (Kenozoïcum)

Het Kenozoïcum omvat sedimenten uit de Boven, Midden en Onder Noordzee Groep. Binnen de groep zijn er afwisselingen van zandpakketten en kleipakketten aanwezig. Een aantal van deze zandlagen zijn geschikt om water uit te winnen. Voorbeelden van geschikte reservoirs in deze groep zijn de Laagpakket van Berg, Zand van Brussel Laagpakket en Laagpakket van Orp. Over het algemeen liggen de sedimenten van het Kenozoïcum minder dan 1000 m diep in de provincie Gelderland. Hierdoor is de temperatuur laag (<50 °C). De sedimenten zijn nooit diep begraven geweest en zijn daardoor soms 'ongeconsolideerd' (nog niet versteend). De doorlaatbaarheid (transmissiviteit) van deze laag wisselt sterk in de provincie, van zeer laag tot goed (ThermoGIS, 2026). Deze lage transmissiviteit komt omdat het laagpakket soms niet dik genoeg is. Door de manieren waarop de gesteenten zijn afgezet, hebben de zanden een grote laterale verspreiding waardoor de zandlagen voorkomen in grote delen van de provincie. Dit kan gunstig zijn voor bijvoorbeeld bodem-energie (<500m diepte) of warmte-opslag. Dit is nader toegelicht in Hoofdstuk 6.

### 4.1.2 Rijnland en Schieland Groepen (Krijt-Jura)

Over het algemeen zijn er meerdere zandpakketten aanwezig in Nederland die zijn afgezet tijdens het Jura of het Krijg. Die zanden behoren tot de Rijnland Groep (bijvoorbeeld Vlieland Zandsteen Formatie), en de Schieland Groep.

#### 4.1.2.1 Rijnland Groep

Binnen de Rijnland Groep zijn er een aantal zandpakketten die mogelijk van goede kwaliteit kunnen zijn. Deze zijn onderdeel van de Vlieland Zandsteen Formatie (KNNS). De Rijnland groep komt in een band rond het Peel-Maasbommel Complex voor. De Vlieland Zandsteen is aangetroffen in de EDE-01 put, op de rand van het complex. Deze zijn poreus, maar de permeabiliteit is onvoldoende voor de winning van geothermie.

#### 4.1.2.2 Schieland Groep

In het Westland wordt er met succes geothermie ontwikkeld in de zandpakketten van de Schieland Groep. Buiten het Westland neemt de potentie af. Zandstenen van de Schieland Groep komen alleen aan de uiterste westkant van de provincie Gelderland voor, in de Betuwe. Zoals gesteld in de 2021 studie is het onduidelijk of reservoirkwaliteit in de Betuwe goed is, omdat er te weinig putdata is. Sinds die studie is er geen nieuwe data beschikbaar gekomen, het beeld is daardoor onveranderd. Bovendien tonen de gegevens van de putten die in de provincie Gelderland zijn geboord een slechte reservoirkwaliteit aan in vergelijking met die in het West Nederland Bekken, ten westen van de provinciegrens. De Schieland Groep is dus niet interessant voor de provincie Gelderland. Daarom is voor de Schieland Groep geen vermogenskaart gemaakt. Zie de petrofysische analyse, geologische bijlage hoofdstuk 3, voor aanvullende informatie.

### 4.1.3 Onder- en Boven Germaans Trias Groepen (Trias)

In het Trias zijn de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen afgezet. Voorbeelden van zandstenen binnen deze groepen zijn de Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF), Formatie van Hardegsen (RBMH), het Onder- en Boven Volpriehausen Laagpakket (RBMVL, RBMVU), en het Boven- en Onder Dethfurth Laagpakket (RBMDL, RBMDU). Zandstenen binnen de Onder en Boven Germaans Trias Groepen zijn relevant voor de provincie Gelderland, maar kennen voor- en nadelen. De reservoirkwaliteit van het zanden afgezet in het Trias is doorgaans onvoldoende. Toch kan aan de flanken van het Peel-Maasbommel Complex de reservoirkwaliteit beter zijn, omdat de begravingsgeschiedenis van het Trias

hier anders is. Daarentegen is de dikte van de reservoirs (<40 meter dik) een sterk beperkende factor. Voor de Onder Volpriehausen en Röt Randzandsteen laagpakketen zijn vermogenskaarten opgesteld, maar omdat deze zeer weinig potentie laten zien (<1 MW) zijn er geen kaarten opgesteld voor de Hardegsen Formatie of het Detfurth Laagpakket. Hier wordt niet meer vermogen verwacht, waardoor het opstellen van aparte kaarten onnodig is geacht.

### 4.1.4 Zechstein en Boven-Rotliegend Groepen (Perm)

In het Perm zijn er twee belangrijke groepen van sedimenten afgezet. De jongste sedimenten uit het Perm behoren tot de Zechstein Groep. Oudere sedimenten uit het Perm behoren tot de Boven- en Onder-Rotliegend Groep.

#### 4.1.4.1 Zechstein Groep

De Zechstein Groep (ZE) bevat over het algemeen zeer geschikte afsluitende lagen; voornamelijk zoutpakketten. Maar de groep bevat ook kalkstenen. In de put EDE-01, is porositeit en stroming van water gezien in het zogenaamde Z1 Randcarbonaat Laagpakket (ZEZ1F). Dit is echter alleen in deze put waargenomen, waardoor er onvoldoende data beschikbaar is om een vermogenskaart op te stellen voor de Zechstein Groep. Er is echter wel gekeken naar geologische trends in het Zechstein, om te bepalen of er elders in de provincie Geldeland potentie voor geothermie verwacht kan worden (geologische bijlage, hoofdstuk 6.1). Uit de analyse blijkt dat dit beperkt is tot rond het Peel-Maasbommel Complex, waar het Zechstein bijvoorbeeld een aanvulling kan zijn op geothermie door coproductie met de Formatie van Slochteren reservoir. Op basis van een DoubletCalc1D simulatie (geologische bijlage hoofdstuk 4.5.1) kan het Zechstein carbonaat 1.24 MW toevoegen in het P50 geval, op basis van de productietest in EDE-01.

#### 4.1.4.2 Boven-Rotliegend Groep

Het belangrijke reservoir binnen de Boven Rotliegend Groep is de Formatie van Slochteren (afgekort naar ROSL). De Formatie van Slochteren is het meest relevant voor de provincie Gelderland. De Formatie van Slochteren komt in een groot deel van de provincie voor, maar niet overal. Door erosie kan het reservoir lokaal afwezig zijn, bijvoorbeeld op het Peel-Maasbommel Complex. De Formatie van Slochteren kan van zeer goede kwaliteit zijn en heeft doorgaans ook voldoende dikte (>40 meter). De begravingsgeschiedenis is sterk van invloed op de kwaliteit van het reservoir. Op plaatsen waar de Formatie van Slochteren op meer dan 2500 meter diepte ligt, neemt de doorlaatbaarheid sterk af. Aan de randen van het Peel-Maasbommel complex is de Formatie van Slochteren in de loop van de tijd minder diep begraven geweest. In deze studie heeft deze zone daarom de primaire interesse. Omdat het reservoir dieper ligt, is de temperatuur hoger. Dat is gunstig voor geothermie.

### 4.1.5 Limburg Groep (Carboon)

Het Carboon bevat de diepst voorkomende gesteentelagen. Gesteenten afgezet tijdens het Carboon hebben doorgaans een zeer slechte reservoirkwaliteit door diepe begraving. Een voorbeeld van een zandsteen dat voorkomt in Gelderland is de Formatie van Tubbergen (DCDT). Er is relatief weinig bekend over het Carboon. Er zijn er geen geothermie-doubletten in Nederland die momenteel uit het Carboon produceren. In deze studie is het Carboon daarom niet als relevant gezien.

**Tabel 4-1: Samenvatting stratigrafische groepen (geologische eenheden) die voorkomen in de Nederlandse ondergrond, met de acties die worden genomen in dit onderzoek per groep, waar dat op is gebaseerd en de bijbehorende conclusie. Groen vlak = er wordt in dit rapport een actie ondernomen. Grijs vlak = geen, n.v.t. of geen actie.**

| Groep (ouderdom) | Belangrijke formaties voor geothermie | Kansrijkheid voor geothermie in Gelderland | Beeld eerdere studies (2021 en 2022) | Actie dit rapport | Op basis van | Verandering conclusie/beeld potentie geothermie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Noordzee Groep** (Kenozoïcum) | Laagpakket van Berg<br>Laagpakket van Orp<br>Zand van Brussel Laagpakket | Kansrijk voor bodem-energie, warmte-opslag of ondiepe geothermie | Kansrijk voor warmte-opslag of ondiepe geothermie | Onderzoeken warmte-opslag en ondiepe geothermie | ThermoGIS | Gebieden met potentie veranderd |
| **Rijnland Groep** (Krijt) | Vlieland Formatie | Niet kansrijk | Mogelijk van goede kwaliteit | Geen vermogenskaart gemaakt, te weing data | SCAN put BLT-01 en EDE-01 | Permeabiliteit onvoldoende |
| **Schieland Groep** (Jura-Krijt) | Laagpakket van Alblasserdam | Onbekend | Mogelijk kansrijk in de Betuwe | Overnemen beeld 2022 studie | Geen nieuwe putdata | |
| **Boven- en Onder Germaans Trias Groep** (Trias) | Röt Randzandsteen Laagpakket<br>Formatie van Hardegsen<br>Boven- en Onder Volpriehausen Laagpakket<br>Boven- en Onder Dethfurth Laagpakket | Kan kansrijk zijn | Reservoirkwaliteit kan lokaal goed zijn, maar reservoirdikte is een beperking | Opstellen vermogenskaart | SCAN putten | Weinig (<1 MW) vermogen |
| **Zechstein Groep** (Perm) | Z1 Randcarbonaat Laagpakket | Kan kansrijk zijn | | Onderzoeken geologische trend en co-productie | EDE-01 | Rond Peel-Maasbommel Complex doorlatend, kan een toevoeging zijn aan het Rotliegend (co-productie) |
| **Boven-Rotliegend Groep** (Perm) | Formatie van Slochteren | Kansrijk | Lokaal kansrijk, sterk afhankelijk van reservoirkwaliteit | Opstellen vermogenskaart, in kaart brengen prospecten en mogelijke doubletlocaties | SCAN putten | Lokaal kansrijk, vooral aan de flanken van het Peel-Maasbommel Complex |
| **Limburg Groep** (Carboon) | Formatie van Tubbergen | Niet kansrijk | Reservoirkwaliteit vaak onvoldoende | Overnemen beeld 2022 studie | Geen nieuwe putdata | |

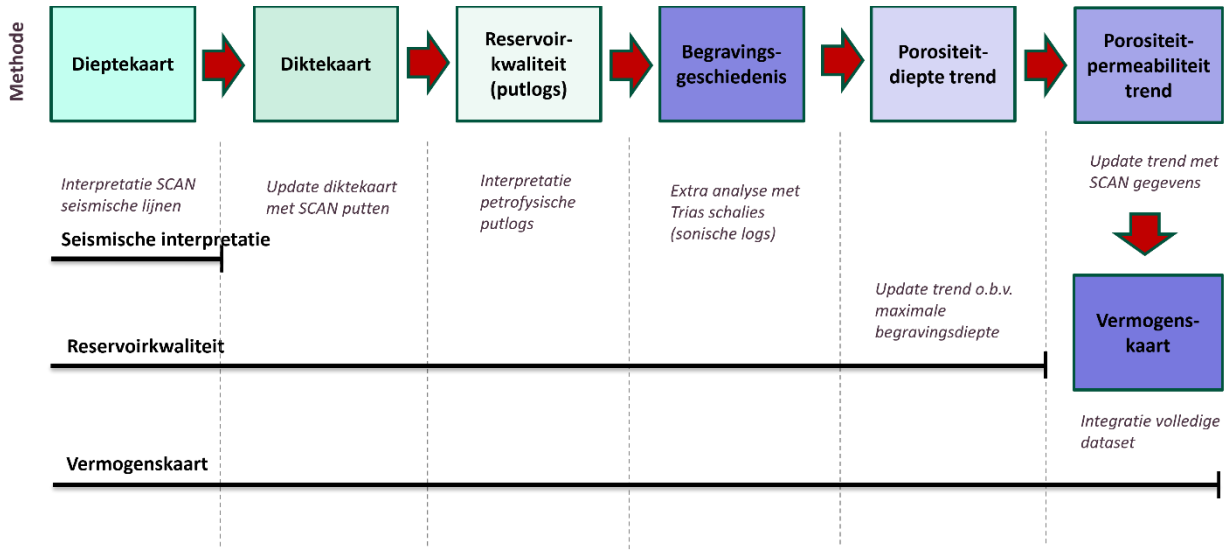
# 5 Geothermische vermogenskaarten

In hoofdstuk 4 van het hoofdrapport is beschreven dat er twee kansrijke reservoirs aanwezig zijn in de provincie Gelderland voor geothermie, waar nieuwe data over beschikbaar is gekomen uit SCAN: de Formatie van Slochteren en de gestapelde reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen. Voor deze twee reservoirs is het zinvol geacht om vermogenskaarten op te stellen, om het nieuwe beeld ten opzichte van 2022 duidelijk te maken. Uit de vermogenskaarten blijkt dat de Formatie van Slochteren een mogelijkheid geeft voor de winning van geothermie, maar dat de reservoirs vermogen in de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen te laag is om geothermie te winnen.

## 5.1 Van reservoirkwaliteit naar vermogen

De vermogenskaarten combineren alle belangrijke aspecten die het succes van geothermie bepalen: de reservoirdiepte (en dus de temperatuur), de dikte van het reservoir en de reservoirkwaliteit (ofwel de doorlaatbaarheid die aangeeft hoe makkelijk water door het reservoir kan stromen). De doorlatendheid van een gesteente hangt af van de porositeit: de hoeveelheid volume van poriën tussen de korrels, in die porie-ruimte kan bijvoorbeeld water in zitten en doorheen stromen. De reservoirkwaliteit is naast het sediment type o.a. afhankelijk van de begravingsgeschiedenis.

Voor een gekozen doubletontwerp, toegelicht in de geologische bijlage hoofdstuk 4.4, wordt een geothermisch vermogen berekend op basis van alle invoergegevens van het reservoir. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 5-1.




**Figuur 5-1: Stappen die gezet worden in dit onderzoek om tot een geothermische vermogenskaart te komen. Daarbij wordt gewerkt met data uit seismische interpretatie en putdata.**

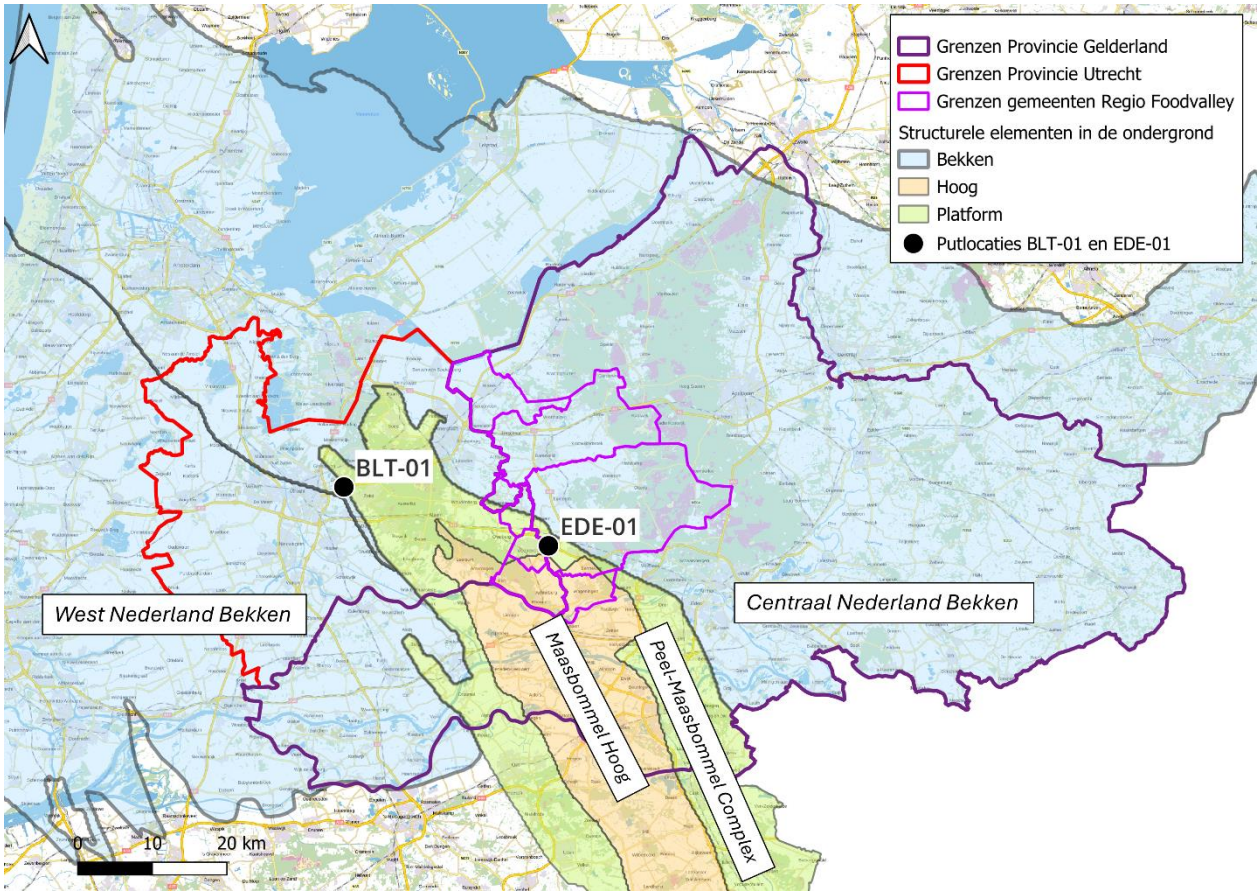
### 5.1.1 Begravingsgeschiedenis

De begravingsgeschiedenis van het reservoir is een belangrijke factor die de reservoirkwaliteit bepaalt. Met diepte neemt de temperatuur toe, maar de reservoirkwaliteit (doorlaatbaarheid) neemt af. Het effect van begraving is dat een reservoirgesteente inklinkt (poriën worden ingedrukt en nemen in volume af), door het grote gewicht van de bovenliggende gesteentelagen. Het effect is dat de porositeit van een gesteente en haar doorlaatbaarheid permanent afneemt. Na begraving kan het gesteente weer opgeheven worden, en dus minder diep komen te liggen. De porositeit en doorlaatbaarheid herstellen

echter niet. De maximale begraving van een gesteente is daarom een belangrijke graadmeter voor reservoirkwaliteit.

### 5.1.2 Structurele elementen in de ondergrond van Gelderland

Binnen de provincie Gelderland zijn er drie structurele elementen in de ondergrond aanwezig die alle drie een andere begravingsgeschiedenis kennen (Figuur 5-2). Aan de westzijde van Gelderland komt het West Nederland Bekken voor. Een bekken is een gebied waar de sedimenten diep begraven zijn door daling van de aardkorst. Vaak komt er een dik pakket aan verschillende lagen voor omdat er veel ruimte is ontstaan door de daling. Een 'complex' geeft een gebied aan waar meerdere Hogen en Bekkens aanwezig zijn. Er heeft minder daling plaatsgevonden, of juist enkel opheffing. Daardoor zijn gesteenten daar vaak minder diep begraven en is er doorgaans een dunner pakket sedimenten bewaard gebleven. Bij het Peel-Maasbommel Complex zijn de reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen en de Formatie van Slochteren deels verdwenen door erosie, enkel aan de randen is het bewaard gebleven. Direct ten oosten van het West Nederland Bekken vinden we het Peel-Maasbommel Complex, wat minder diep begraven is geweest. Daardoor is de reservoirkwaliteit van de Formatie van Slochteren rond het Peel-Maasbommel Complex beter dan elders in de provincie. Ten oosten het Peel-Maasbommel Complex, in het grootste gedeelte van de provincie Gelderland, vinden we het Centraal Nederland Bekken, waar evenals in het West Nederland Bekken veel begraving heeft plaatsgevonden. De begravingsgeschiedenis van de verschillende structurele elementen heeft een invloed op de reservoirkwaliteit, en daarmee op de mogelijkheden voor geothermie.




**Figuur 5-2: Overzicht van de belangrijke structurele elementen die voorkomen in het studiegebied. Structurele elementen op basis van Kombrink et al., 2012.**

### 5.1.3 Onzekerheid van de reservoirkwaliteit

De ondergrond van de Provincie Gelderland kent altijd onzekerheden, omdat er niet overal voldoende data is. Vooral putdata, gebruikt om de reservoirkwaliteit te bepalen, is ongelijk verdeeld in de provincie. De data van verschillende putten zijn gebruikt om op een regionale schaal vermogenskaarten te maken. Daar waar geen putdata aanwezig zijn, is gebruik gemaakt van interpolaties*. Om de onzekerheden hierbij in acht te nemen, zijn er verschillende scenario's getest: het referentie middel scenario, een hoog scenario en een laag scenario. Het middel scenario weerspiegeld het gemiddelde van alle 44 putten die zijn onderzocht in de studie. Deze 44 putten geven een wolk aan datapunten van de porositeit die is gemeten in putten. Het hoog scenario gaat uit van een positiever beeld, aan de bovengrens van de datawolk, in het geval van een betere reservoirkwaliteit. Het laag scenario gaat uit van een conservatiever beeld, aan de ondergrens van de datawolk, in het geval dat de ondergrond een mindere reservoirkwaliteit heeft. Daarnaast is er alleen op basis van de productietesten van de EBN SCAN putten een geothermisch brijn* scenario opgesteld, dat realistisch is ter plaatse van de SCAN putten, maar slechts drie datapunten heeft over het gehele studiegebied. Het geothermische brijn scenario is alleen voor de Formatie van Slochteren opgesteld. Voor de vermogenskaarten van het Slochteren gepresenteerd in dit hoofdrapport is een variant van het middel scenario gebruikt, waarbij de put WHY-01 in overleg met EBN niet zijn meegenomen in de bruto-diktekaart. Deze put is als anomalieën gezien. Het verschil met het en zonder put WHY-01 is echter <1 MW. Alle andere kaarten van het middel scenario nemen wel alle putten mee in de analyse. Daarnaast is er onzekerheid over de reservoirkwaliteit van het Slochteren rond het Peel-Maasbommel Complex. Hier is een zone van 2 km aangewezen waar we geologisch een goede reservoirkwaliteit verwachten. Deze 2 km is in overeenstemming met eerdere studies en is conservatief. Er is een grote onzekerheid hoe groot deze zone werkelijk is. Een volledige beschrijving van de scenario's is gegeven in de geologische bijlage (hoofdstuk 4.4).

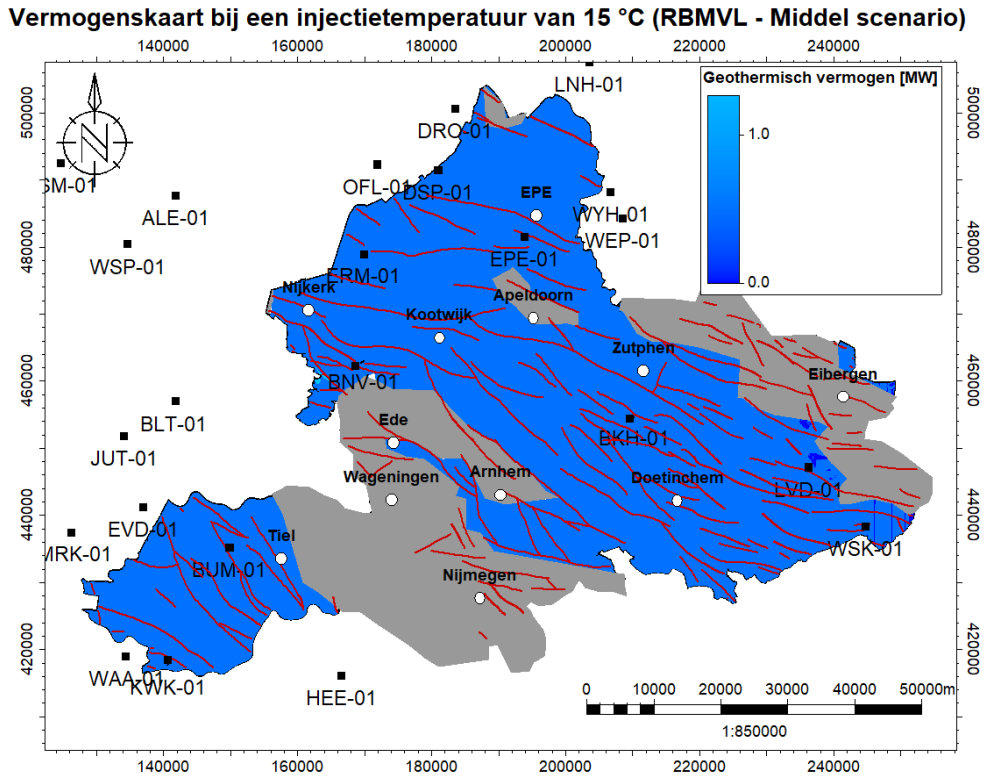
## 5.2 Vermogenskaart Onder- en Boven Germaans Trias Groepen

Er zijn vier mogelijke reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen, waarbij voor de twee meest kansrijke een vermogenskaart is opgesteld: voor het Onder Volpriehausen Laagpakket en het Röt Randzandsteen Laagpakket. Figuur 5-3 laat zien dat het Onder Volpriehausen Laagpakket zeer weinig tot geen vermogen kent in de gehele provincie. Lokaal is er een vermogen tot 1.5 MW mogelijk, maar dat zit rond breuken en is niet voldoende voor geothermie. In het hoog scenario (gepresenteerd in de appendix) is er lokaal tot 2 MW mogelijk, met verdere uitschieters tot 5 MW rond breuken, waar de realisatie van geothermie te risicovol is. Figuur 5-4 toont dat het Röt Randzandsteen Laagpakket dat slechts in het uiterste zuidwesten van de provincie voorkomt. De vermogenskaart toont dat er ook voor het Röt Randzandsteen Laagpakket geen potentie aanwezig is, met tot 0.5 MW vermogen. In het hoog scenario is er tot 0.8 MW mogelijk rond enkele putten in de provincie, onvoldoende voor de ontwikkeling van geothermie.

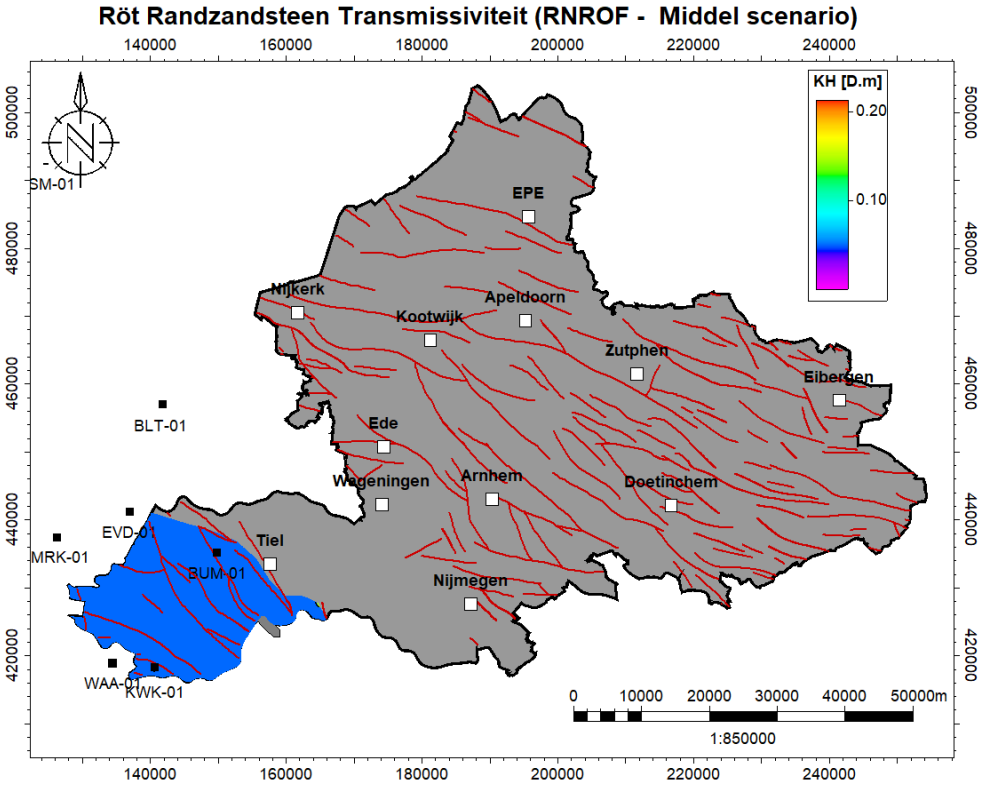
*Interpolatie wordt toegepast om eigenschappen te voorspellen tussen datapunten. Dit geeft een continue kaartbeeld van het studiegebied. De voorspelling gaat volgens een algoritme en weerspiegelt dus niet per se de werkelijkheid.

*Geothermisch brijn scenario gebruikt de permeabiliteit voor vloeistof, zoals gemeten in de SCAN putten. Deze werkwijze is echter niet standaard en is voor geen enkele andere put in het studiegebied beschikbaar. Het scenario is realistisch voor geothermie, omdat het daar ook draait om het vloeien van

vloeistoffen, maar is vanwege de lage data dichtheid minder passend voor een regionale studie. De waarden voor brijn-permeabiliteit worden ook niet gebruikt bij subsidieaanvragen.




**Figuur 5-3: Onder Volpriehausen Laagpakket (RBMVL) vermogenskaart in het middel scenario. Ook in het hoge scenario is er nauwelijks vermogen. Rode lijnen = breuken. Grijze vlakken = Trias niet aanwezig, op basis van ThermogGIS.**

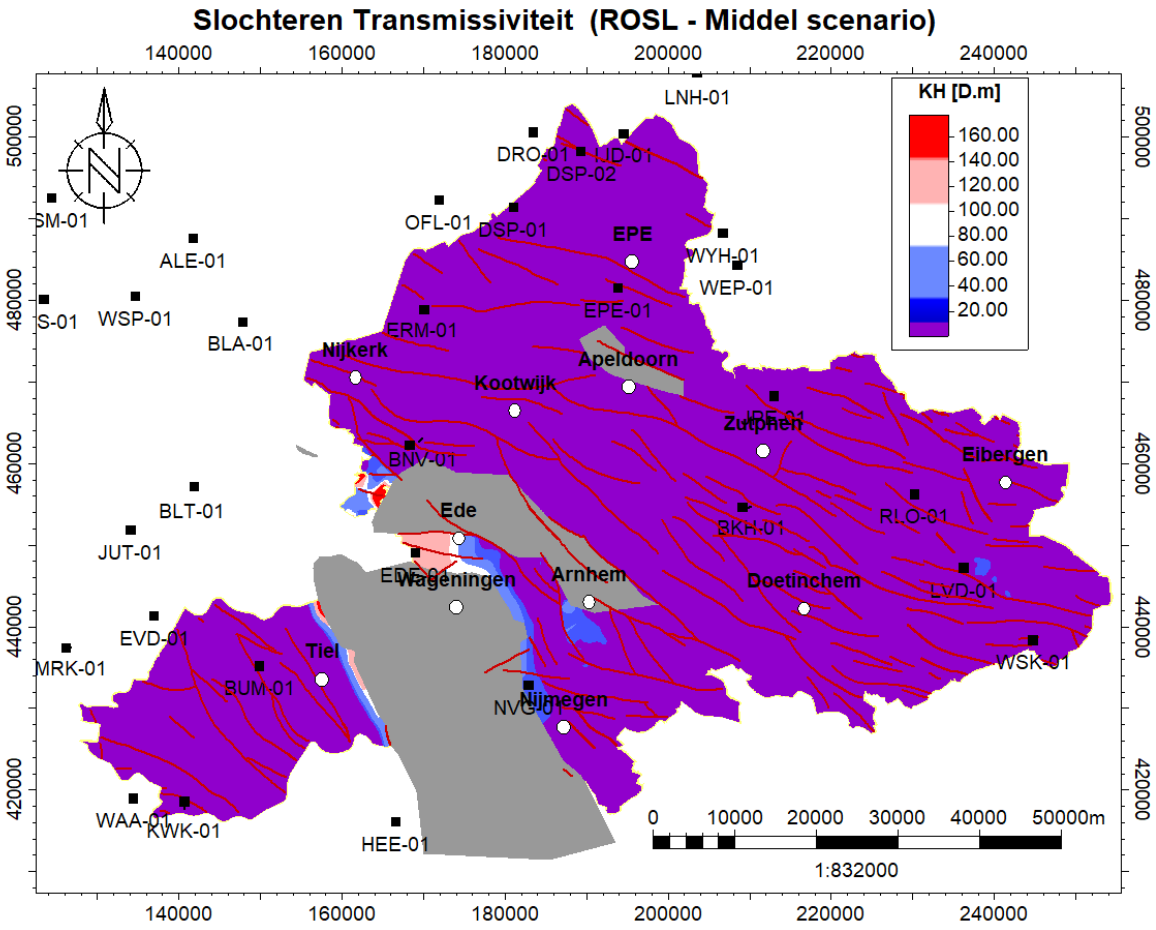



**Figuur 5-4: Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF) vermogenskaart. Ook in het hoge scenario (gepresenteerd in de appendix) is er nauwelijks vermogen. Rode lijnen = breuken. Grijze vlakken = Trias niet aanwezig, op basis van ThermogGIS.**

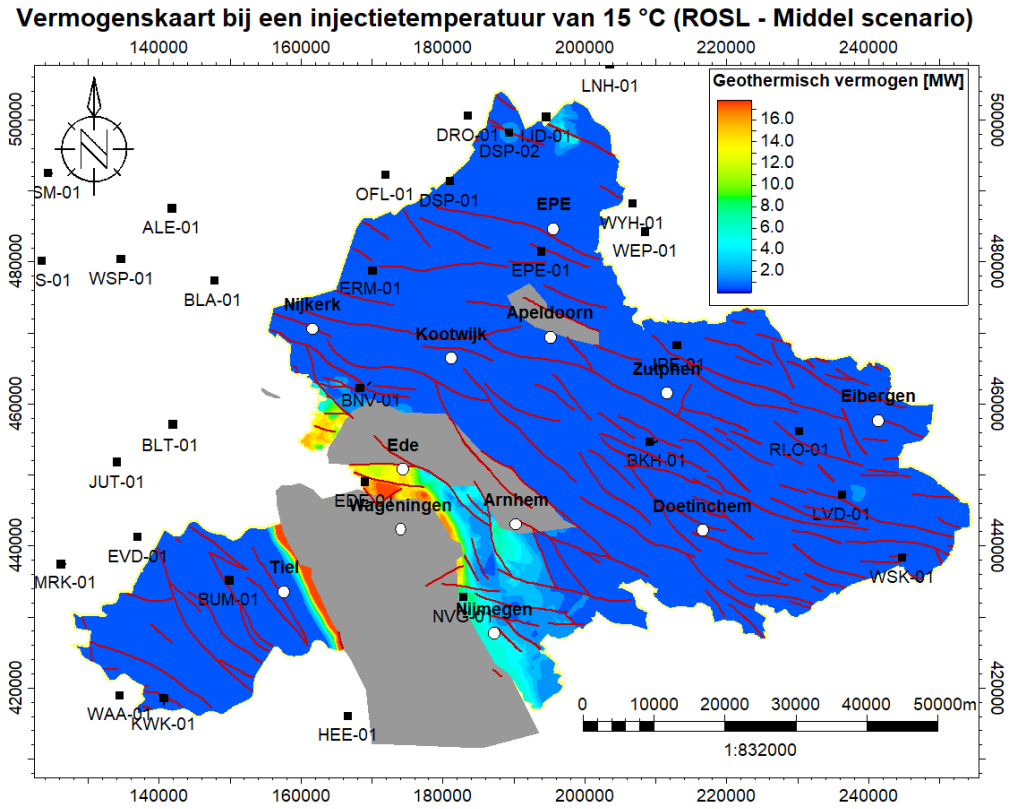
## 5.3 Vermogenskaarten Formatie van Slochteren (Rotliegend Groep)

In tegenstelling tot de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen laat de Formatie van Slochteren een grotere potentie voor geothermie in de provincie zien. Figuur 5-6 toont de vermogenskaart voor de Formatie van Slochteren in het middel scenario. Daarop is te zien het geothermische vermogen vooral aan de randen van het Peel-Maasbommel Complex wordt verwacht. Dat komt door de geringere begravingsdiepte, ten opzichte van de bekkens aan weerzijde van het complex. Daardoor is de reservoirkwaliteit lokaal zeer goed, zoals bevestigd door de EDE-01 put. De zone met een goed vermogen loopt in dit scenario verder door naar het noordwesten, tot rond het zuiden van Amersfoort. Overige delen in de provincie laten geen vermogen zien (aangegeven in blauw) en zijn dus niet kansrijk voor geothermie.

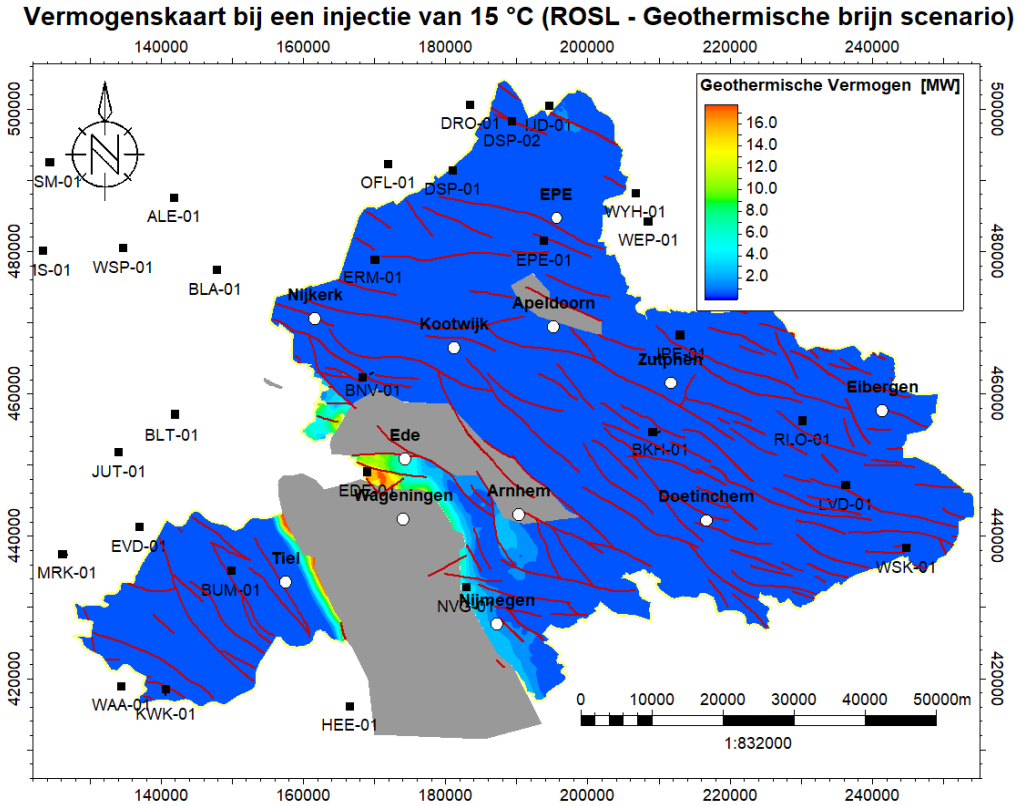
Het geothermische brijn scenario past beter bij BLT-01 en EDE-01. Dat scenario is getoond in Figuur 5-7. In vergelijking met het middel scenario is er te zien dat de trends zeer vergelijkbaar zijn: de locaties met geothermisch vermogen zijn vrijwel identiek. Alleen wordt er in het geothermische brijn scenario minder vermogen verwacht, ten opzichte van het middel scenario.




**Figuur 5-5: Transmissiviteitkaart (= reservoirdikte * permeabiliteit) voor het Slochteren in het middel scenario. Rode lijnen geven breuken weer; grijze vlakken markeren gebieden waar de Formatie van Slochteren ontbreekt (op basis van seismische lijnen).**




**Figuur 5-6: De Formatie van Slochteren (ROSL) vermogenskaart in een variant van het middel scenario, waar put WHY-01 niet is meegenomen in de berekening van de bruto-reservoirdikte. Rode lijnen geven breuken weer; grijze vlakken markeren gebieden waar de Formatie van Slochteren reservoir ontbreekt (op basis van seismische lijnen).**



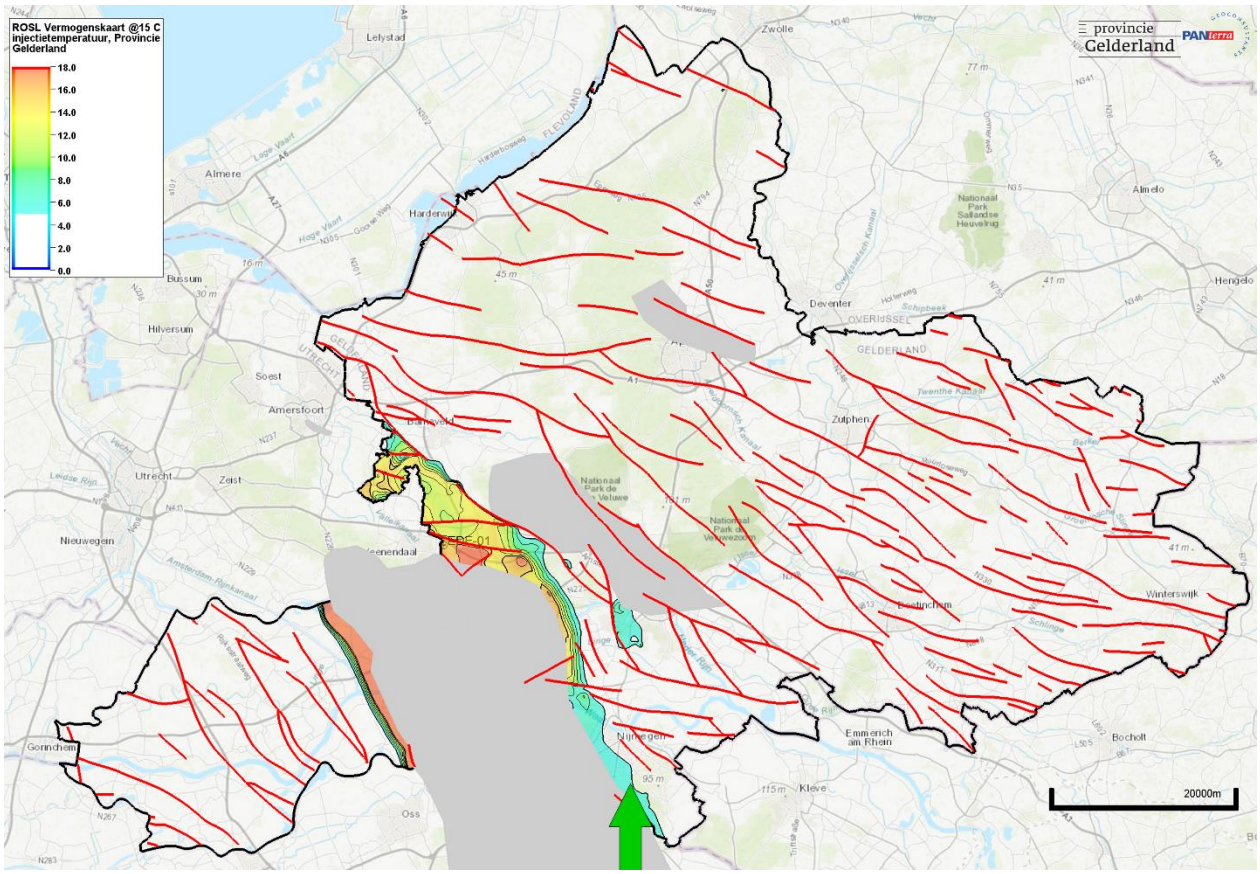

**Figuur 5-7: Geothermische brijn scenario voor de Formatie van Slochteren (ROSL), opgesteld op basis van de AMS-01, BLT-01 en EDE-01 productietests. Rode lijnen geven breuken weer; grijze vlakken markeren gebieden waar de Formatie van Slochteren reservoir ontbreekt (op basis van seismische lijnen).**

## 5.4 Prospecten en doubletlocaties

Voor de provincie Gelderland zijn kansrijke gebieden vastgesteld waar mogelijk geothermie kan worden ontwikkeld. Dit is gebeurd op basis van de middel scenario vermogenskaart van de Formatie van Slochteren reservoir. Grootschalige breuken in de ondergrond op het niveau van het Slochteren-reservoir bepalen de grenzen van prospecten, zie Sectie 3.4. De reden hiervoor is dat doubletten in Nederland meestal zo ver mogelijk van breuken worden geplaatst. De in de seismische interpretatie aangemerkte breuken en de TNO regionale breuken zijn hiervoor gebruikt. Daarnaast is rekening gehouden met geografische grenzen , zodat prospecten alleen binnen het grondgebied van de provincie vallen.

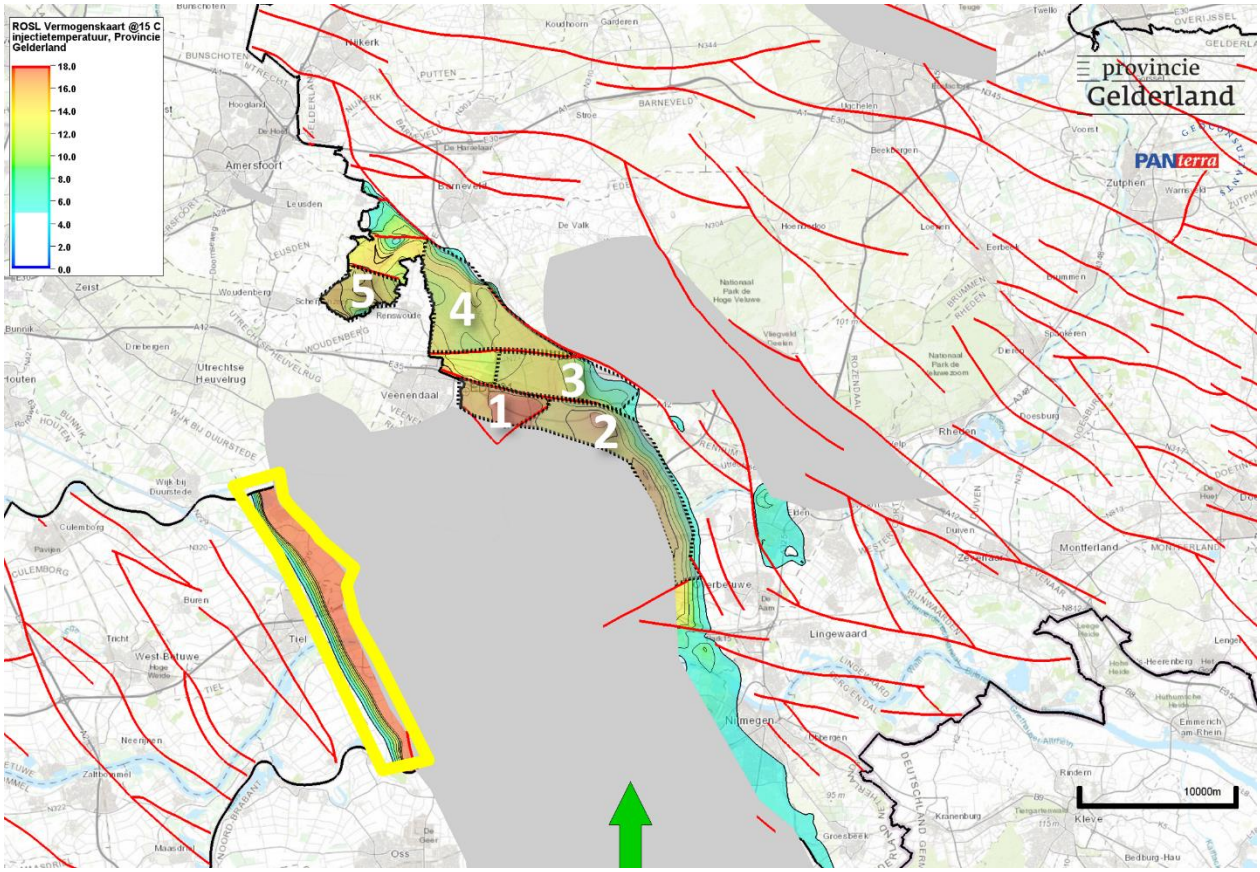
### 5.4.1 Prospecten in de provincie Gelderland

Op basis van de opgestelde vermogenskaart, besproken in Hoofdstuk 5.3 zijn er gebieden naar voren gekomen die geothermisch vermogen in de ondergrond laten zien. Deze zijn vooral aanwezig in het midden en het oosten van de provincie. De onderstaande kaart toont de gebieden in de provincie waar meer dan 5 MW vermogen wordt verwacht.




**Figuur 5-8: Vermogenskaart Formatie van Slochteren (ROSL) voor de provincie Gelderland, bij een injectietemperatuur van 15 °C, waar enkel vermogens >5 MW zichtbaar zijn.**

Op basis van de bovenstaande beschrijving zijn binnen breuk begrensde blokken in de provincie Gelderland de volgende 5 prospecten aangegeven:




**Figuur 5-9: De kaart toont een deel van de provincie Gelderland met vijf geïdentificeerde prospecten op basis van het Formatie van Slochteren vermogen groter dan 5 MW. Breuken zijn weergegeven als rode lijnen, de provinciegrens als een zwarte lijn en gebieden waar de Formatie van Slochteren door erosie afwezig is als grijze vlakken. Het geel-gearceerde gebied vormt geen prospect, hier is de ondergrondse onzekerheid te groot.**

Ten westen van het Peel-Maasbommel Complex is er een geel omlijnde zone aangegeven (Figuur 5-9). Daar is geen prospect gekozen ondanks dat er op basis van de lokale geologie een goed vermogen verwacht wordt. De reden hiervoor is dat er tijdens het opstellen van dit rapport geen putten in de omgeving zijn geboord die deze verwachting kunnen bevestigen. Aan de oostkant van het Peel-Maasbommel Complex is de verwachting van de reservoirkwaliteit bevestigd door de EDE-01 put, daarom zijn daar wel prospecten in de omgeving gedefinieerd.

In overleg met de opdrachtgever zijn prospecten 3, 4 en 5 uitgesloten voor verder onderzoek. De klant heeft daar onvoldoende warmtevraag gezien om nadere analyse te verantwoorden.

**Tabel 5-1: Samenvatting van enkele belangrijke ondergrondse eigenschappen per prospect.**

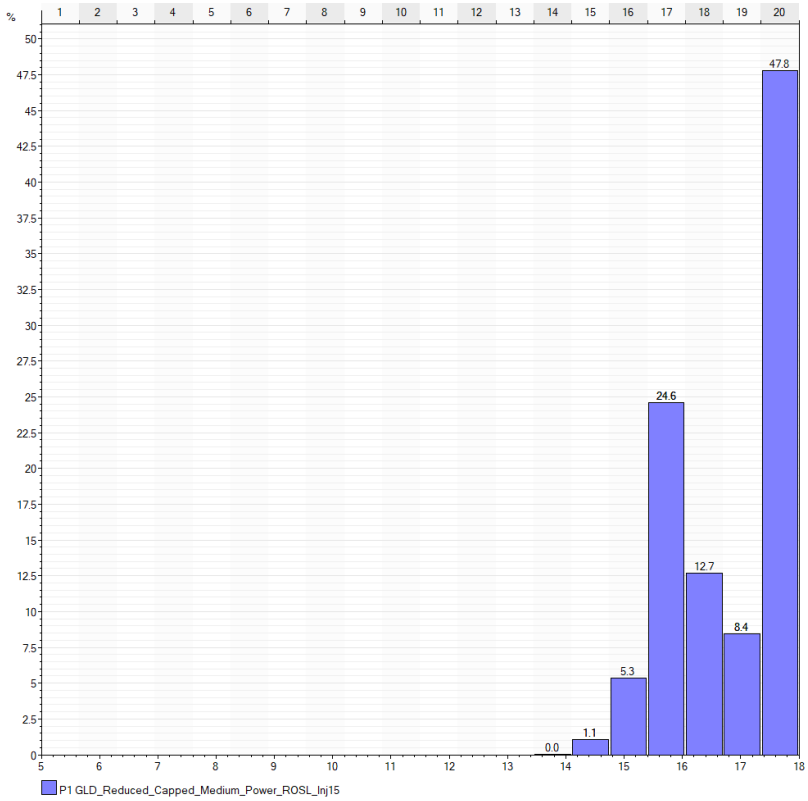
| Prospect # | Typisch vermogen (MW) | Temperatuur reservoir (°C) | Dikte reservoir (m) | Transmissiviteit (Dm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14-18 | 45-60 | 60-80 | 15-125 |
| 2 | 5-18 | 45-55 | 30-55 | 20-100 |

#### 5.4.1.1 Prospect 1

Prospect 1 ligt bij de stad Ede. In dit prospect wordt een hoog geothermisch vermogen verwacht, het ligt namelijk aan de rand van het Peel-Maasbommel complex, waar de reservoirkwaliteit zeer goed is. De put EDE-01 valt binnen prospect 1, waardoor de onzekerheid over de reservoirkwaliteit in het breukblok relatief klein is.

Het prospect kent verder geen oppervlakterestricties zoals Natura-2000 gebieden of waterwingebieden. Het prospect is ten tijdens van het opstellen van dit rapport al gedekt door meerdere zoekvergunningen: Veenendaal-Scherpenzeel, Ede, Ede-1 en Renkum. De vergunning Renkum is minder relevant voor provincie Gelderland, omdat deze zoekvergunning enkel de zeer diepe ondergrond dekt: van de basis van het Boven Carboon tot dieper. De Formatie van Slochteren reservoir is enkel gedekt door de vergunningen Veenendaal-Scherpenzeel, Ede en Ede-1.

Samenvattend heeft prospect 1 een hoog geothermisch vermogen en een lagere onzekerheid over de reservoirkwaliteit, omdat de put EDE-01 in het prospect valt. De omvang van het prospect is echter beperkt en het is reeds gedekt door meerdere zoekvergunningen.



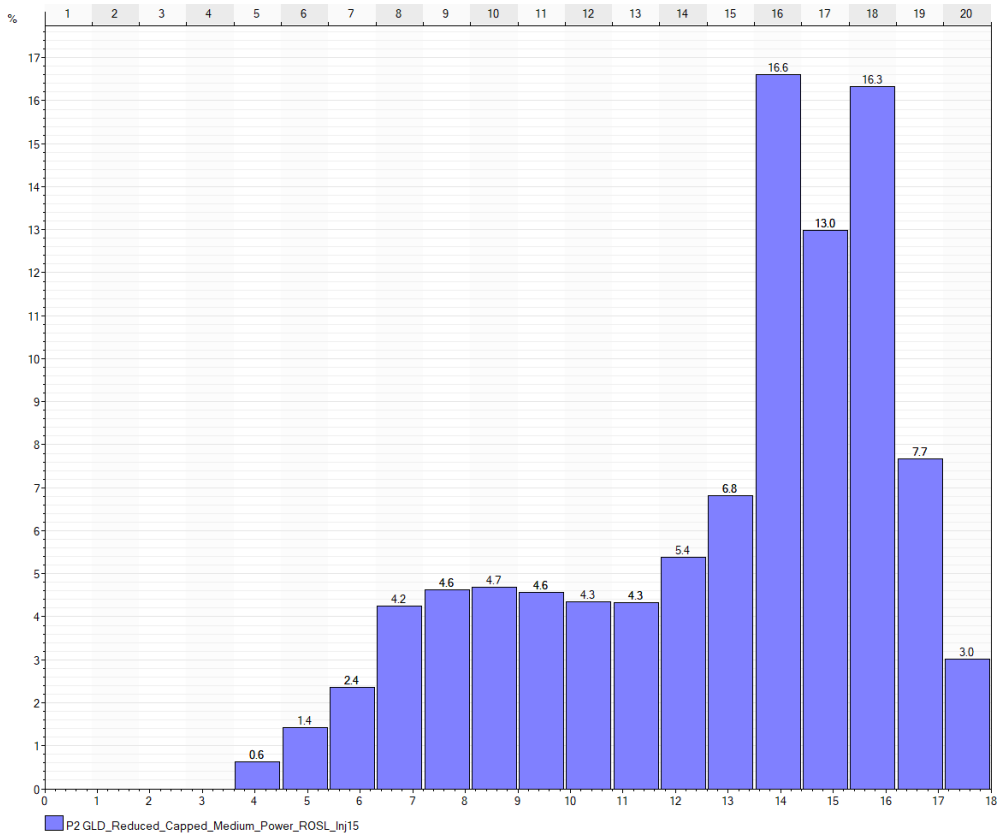

**Figuur 5-10: Verdeling van geothermische vermogens dat mogelijk is in prospect 1.**

#### 5.4.1.2 Prospect 2

Prospect 2 is gelegen ten oosten van prospect 1. Het prospect bestrijkt een deel van Wageningen, Renkum en loopt verder door naar het zuiden. Er zijn relatief weinig woonkernen in het prospect. Het prospect bevindt zich aan de oostkant van het Peel-Maasbommel complex. Het geschatte vermogen is lager dan prospecten 1 (Figuur 5-11), maar nog steeds goed. Het vermogen neemt snel af richting het oosten. Ter plaatse van prospect 2 zijn er meerdere oppervlaktebeperkingen: Natura-2000 gebieden en een boringvrijezone. Met deze oppervlaktebeperkingen dient rekening gehouden te worden voordat er

een doublet gerealiseerd kan worden. Het prospect is evenals prospect 1 ten tijden van het opstellen van dit rapport gedekt door de zoekvergunningen Veenendaal-Scherpenzeel, Ede, Ede-1 en Renkum.

Over het algemeen ziet prospect 2 er vanuit het oogpunt van de ondergrond gunstig uit: het geschatte vermogen voor de Formatie van Slochteren is goed. Omdat er weinig gebouwde omgeving in het prospect ligt is er mogelijk minder warmtevraag. Er zijn beperkingen aan het oppervlak en het prospect is gedekt door meerdere zoekvergunningen.

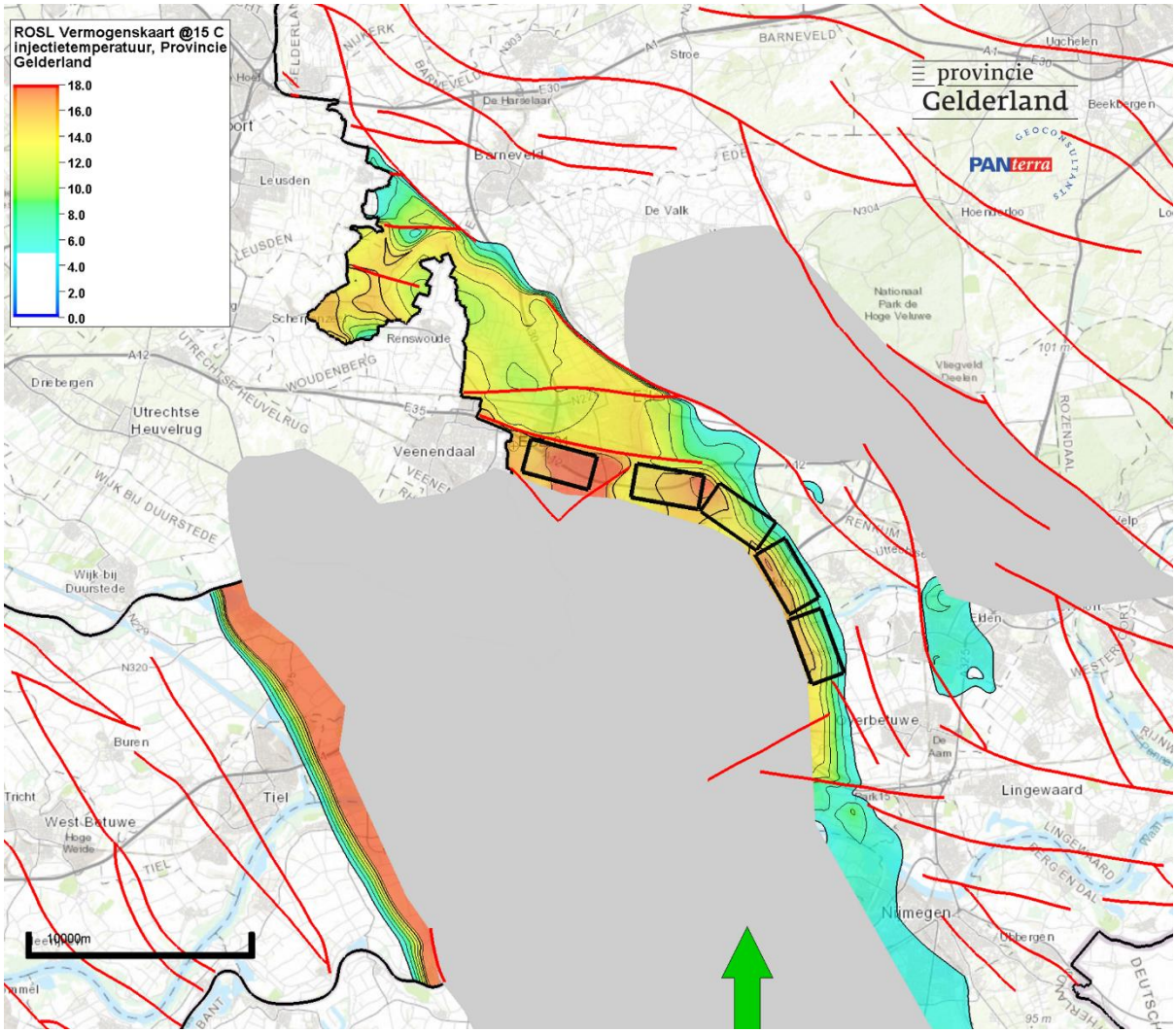



**Figuur 5-11: Verdeling van geothermische vermogens dat mogelijk is in prospect 2.**

### 5.4.2 Mogelijke doubletlocaties

Voor de prospecten die hierboven zijn toegelicht, is gekeken hoeveel ruimte er is voor het realiseren van doubletten. Voor deze analyse zijn vlakken ingetekend met een formaat van 3000 meter bij 1500 meter. Binnen zo'n vlak kan één doublet geplaatst worden, met een putafstand van 1500 meter. Dit geeft ongeveer een levensduur van dertig jaar voor het doublet. Daarnaast is het vlak waarschijnlijk groot genoeg zodat het koudefront* binnen het vlak blijft. De analyse voor doubletlocaties is primair uitgegaan van de ondergrond. In nadere onderzoeken moet worden vastgesteld of er daadwerkelijk doubletten gerealiseerd kunnen worden. Bij het plannen van een doubletlocatie moet altijd worden bekeken of er oppervlaktebeperkingen aan de bovengrond zijn. In overleg met de opdrachtgever is echter in deze studie ervoor gekozen om de focus te leggen op de potentie van de ondergrond ook al zijn er oppervlaktebeperkingen aanwezig. Deze beperkingen kunnen in de toekomst mogelijk veranderen. Figuur 5-12 toont de geïdentificeerde doubletlocaties binnen de door de opdrachtgever gekozen prospecten.

*Koudefront is het front van afkoeling dat met verloop van tijd ontstaat in het reservoir, doordat afgekoeld water wordt geïnjecteerd. Dit bepaald mede de levensduur van een doublet en is van belang voor de veiligheid van geothermie. Het koudefront kan namelijk breuken beïnvloeden bij onvoldoende afstand.




**Figuur 5-12: Kaart met mogelijke doubletlocaties, weergegeven als zwart omlijnde vlakken van 3000 × 1500 m op de vermogenskaart. Alleen gebieden met een vermogen groter dan 5 MW in het middel scenario zijn weergegeven.**

Er zijn 5 doubletlocaties aangewezen voor Gelderland. De locaties zijn dusdanig gekozen dat deze binnen de breukblokken vallen op de locaties waar het geothermisch vermogen aanwezig is. De doubletten in prospect 1 kennen het hoogste vermogen, zoals beschreven in hoofdstuk 5.4.1.1. Daarnaast is er voldoende afstand tot de grootschalige breuken. Er passen vier doubletten parallel aan de breuken in prospect 2, hoewel de zone met hoge vermogens in dit prospect smaller is. Het geschatte vermogen is lager dan in prospect 1, zoals beschreven in hoofdstuk 5.4.1.2.

Samenvattend: er zijn vijf doubletlocaties aangewezen voor de provincie Gelderland. De locaties zijn dusdanig gekozen dat deze binnen de breukblokken vallen op de locaties waar het geothermisch vermogen aanwezig is. Het doublet in prospect 1 kent het hoogste vermogen, zoals beschreven in hoofdstuk 5.4.1.1. Bovendien is er voldoende afstand tot de grootschalige breuken. Er passen vier doubletten in prospect 2. Het geschatte vermogen is lager dan in prospect 1, zoals beschreven in hoofdstuk 5.4.1.2.

# 6 Mogelijkheden voor warmte-opslag en lage temperatuur geothermie

Naast geothermie kan warmte-opslag een interessante duurzame optie bieden door warmte op te slaan in perioden waar de warmtevraag lager is en deze te produceren als de vraag hoger is. Er zijn verschillende systemen van warmte-opslag. In dit onderzoek is er gekeken naar '*aquifer thermal energy storage*' (ATES). Wereldwijd zijn er circa 2500 warmte-opslag systemen actief in ATES systemen (Juez-Larré et al., in ten Veen et al., 2025).

Warmte-opslag is anders dan geothermie. Er zijn drie classificaties in temperatuur voor geothermie: (1) lage temperatuur geothermie (25-55 °C), of circa 500-1500m diepte, (2) middelhoge temperatuur geothermie (55-90 °C) en (3) hoge temperatuur geothermie (>90 °C) (Peters et al., 2025). Daarnaast zijn er ook classificaties voor warmte-opslag, deze hebben ander temperaturen dan die van geothermie. Lage temperatuur opslag (LT-ATES) gaat tot 25-30 °C. De temperatuurgrens verschilt in de literatuur. Middelhoge temperatuur opslag verwijst naar de opslag van water met een temperatuur van 25/30-60 °C. Bij hoge temperatuur opslag is het temperatuurbereik 60-90 °C. Andere belangrijke verschillen zijn, bijvoorbeeld:

- Bij geothermie wordt het van nature warme water geproduceerd, op diepten van meer dan 500 meter. Door het dieptebereik valt boren naar geothermie onder de Mijnbouwwet. Volgens de wetgeving zijn kostbare technieken voor boren vereist.

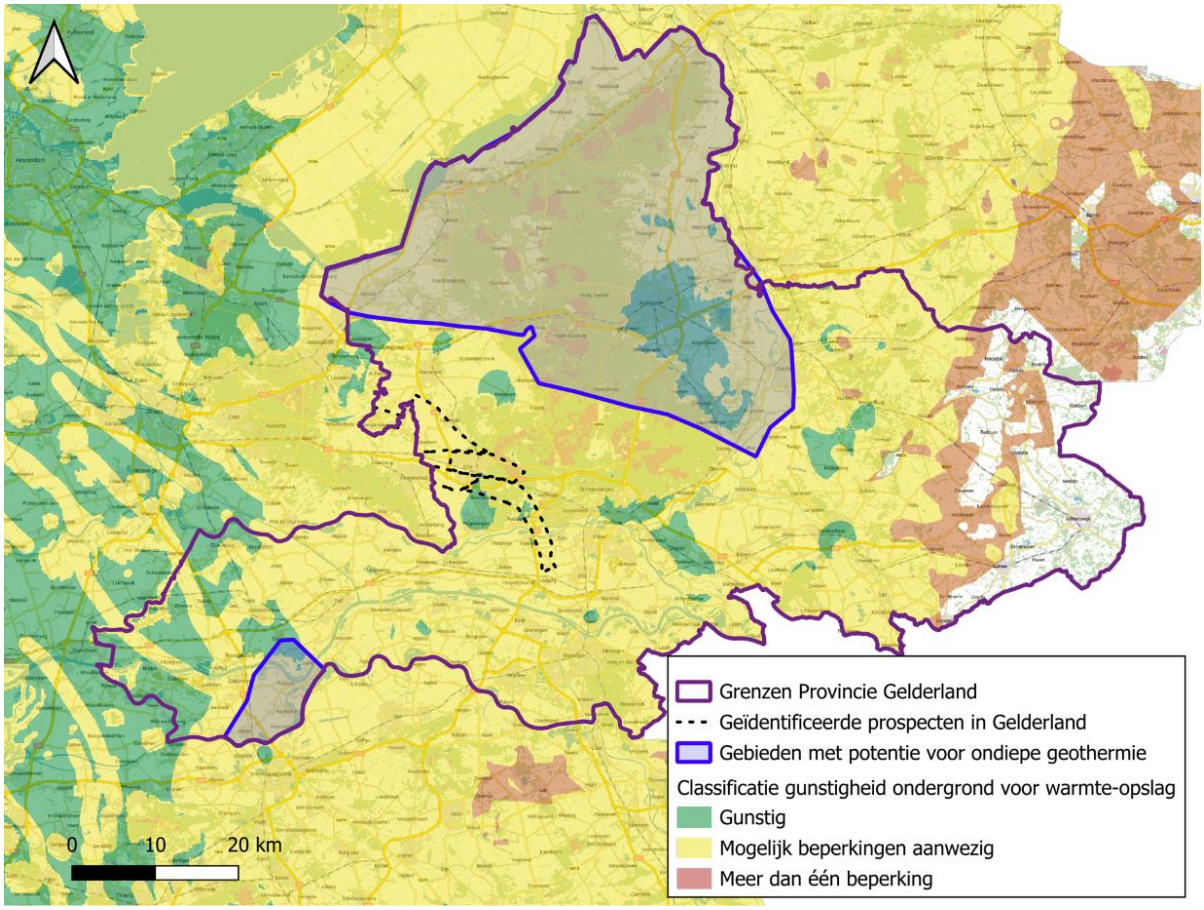
- Bij warmte-opslag wordt er uit lagen ondieper dan 500 meter water geproduceerd en geïnjecteerd. De temperatuur op die diepte is lager. Er kan actief warmte worden toegevoegd door de injectie van warmer water. Warmte-opslag valt onder de grondwaterwet, waardoor de maximaal injectietemperatuur 25 °C is. Voor injectie van warmer water moet een uitzondering gevraagd worden (Juez-Larré et al., in ten Veen et al., 2025). Omdat het boren niet onder de Mijnbouwwet valt, kunnen eenvoudigere technieken gebruikt worden. De investeringskosten zijn daardoor lager dan bij geothermie.

In dit onderzoek zijn aquifers op ondiepe (<500 meter) diepten in kaart gebracht voor warmte-opslag en middelmatige diepten (500-1500 meter) voor ondiepe aardwarmte. Middels een literatuurstudie is vastgesteld welke aquifers er in de ondergrond van provincie Gelderland aanwezig zijn en wat daarvan de eigenschappen zijn. Een meer uitgebreide analyse van de literatuurstudie is gegeven in de geologische bijlage (Hoofdstuk 5).

## 6.1 Geschikte aquifers voor warmte-opslag

Vanwege het dieptebereik van warmte-opslag (tot 500 m diep), zijn de sedimenten van de Noordzee Groep vaak de doellagen voor opslag. Om economisch rendabel te zijn vereist warmte-opslag doorlatende zanden, die een hoge permeabiliteit (>30 Darcy) hebben en zijn gedekt door één of meerdere afsluitende kleilaag. Voor opslag bij hogere temperaturen is de diepte meer van belang, vanwege te hogere temperatuur op die diepte, hoewel de permeabiliteit afneemt met diepte. Aquifers op een diepte van 200-500 meter zijn daarom meer interessant voor HT-ATES (Juez-Larré et al., in ten Veen et al., 2025). Voor de Provincie Gelderland zijn de Peize en Waalre Formatie, de Maassluis Formatie en de Oosterhout Formatie het meest interessant voor warmte-opslag. Figuur 6-1 geeft een

samenvatting van waar geschikte geologische lagen voorkomen voor warmte-opslag, en wat daarbij de geschiktheid is op basis van de eigenschappen van de ondergrond, op basis van de analyse van Dinkelman et al., 2020. Tabel 6-1 geeft de bijbehorende classificatie aan voor geschiktheid. Daarop is te zien dat het grootste deel van de provincie er mogelijk beperkingen zijn voor warmte-opslag, vanuit het oogpunt van de ondergrond. In het westen van de provincie in de Betuwe zijn er gebieden gunstig voor warmte-opslag. Daarnaast zijn er verspreid door de provincie een aantal gunstige plekken te vinden: bijvoorbeeld rond Apeldoorn, Arnhem, Doetinchem. In het oosten van de provincie zijn de omstandigheden ongunstig voor warmte-opslag.




**Figuur 6-1: Mogelijkheden voor warmte-opslag in de provincie Gelderland (op basis van Dinkelman et al., 2020), zie Tabel 6-1 voor criteria. De geothermie prospecten zijn aangegeven als zwarte gestippelde lijnen. De blauw omlijnde gebieden duiden kansrijke gebieden aan voor lage temperatuur geothermie, waar >0.5 MW mogelijk is (op basis van ThermoGIS, 2026).**

**Tabel 6-1: Criteria voor de gunstigheid van de ondergrond voor warmte-opslag, uit Dinkelman et al., 2020.**

| Parameter | Barrier | Possible barrier | Favourable |
|---|---|---|---|
| Lithology | Silt-clay | Limey sand, glauconite | Sand |
| Depth | | <50, >500 mbgs* | 50-500 mbgs* |
| Thickness sand layer | < 10m | 10-15 m | > 15 m |
| Horizontal hydraulic conductivity – kh value | < 5 m/d | | ≥ 5 m/d |
| Presence of confining cap layer (clay) | | Risk absence cap layer | Certainty about presence |
| Faults | | < 1 km | > 1 km |
| Groundwater flow velocity | | > 20-30 m/y | < 20-30 m/y |
| Chloride concentration | | Fresh and brackish water (saline/fresh water interface) | Saline water |

* meter below ground surface

## 6.2 Warmte-opslag bij prospecten

Geothermie en HT-ATES kunnen samen ingezet worden om een zo efficiënt mogelijk systeem te maken. Geothermie kan veelal ingezet worden om de basislast aan warmte te voorzien. Een geothermie doublet produceert gedurende het gehele jaar ongeveer hetzelfde hoeveelheid warmte. Hoge temperatuur opslag kan een buffer vormen om seizoensgebonden variaties in de warmtevraag op te vangen. Zo kan in de zomer niet gebruikte warmte uit een geothermie installatie opgeslagen worden in de ondiepe ondergrond. Deze warmte kan vervolgens in de winter geproduceerd worden, als de vraag hoger is. Doorgaans is een vermogen van 5-10 MW met een warmte-opslagcapaciteit voor 2500 vollasturen nodig om een HT-ATES systeem economisch rendabel te maken (Juez-Larré et al., in ten Veen et al., 2025). Een voorbeeld van een gekoppeld geothermie en HT-ATES systeem is ECW Middenmeer, waar water met een temperatuur van 85 °C wordt opgeslagen op circa 350 meter diepte in de Maassluis en Oosterhout Formaties.

Ter plaatse van de prospecten voor aardwarmte zijn er mogelijke beperkingen in de ondergrond voor warmte-opslag. Zoals nader beschreven in Hoofdstuk 5 in de Geologische Bijlage, zijn de belangrijkste beperkingen onzekerheid over het voorkomen van een afsluitende kleilaag en het zoutgehalte van het formatiewater. De afsluitende kleilaag is van belang om het warme water op zijn plaats te houden in het doelreservoir, zodat er minder warmteverlies optreedt. Daarnaast is een hoger zoutgehalte gunstiger voor warmte-opslag. Niettemin zijn de kansrijke reservoirs voor warmte-opslag wel aanwezig ter plaatse van de prospecten en kan er in een nader onderzoek in meer detail gekeken worden naar de mogelijkheden, bijvoorbeeld in combinatie met geothermie uit het Slochteren reservoir.

## 6.3 Ondiepe geothermie in de provincie Gelderland

Er is sprake van ondiepe geothermie als er warm water wordt gewonnen op een diepte van 500-1500 meter. Zoals hierboven besproken is het temperatuurbereik op die diepte ongeveer 25-55 °C. Het gaat dus om een lage temperatuur, waardoor ondiepe geothermie ook wel lage temperatuur geothermie wordt genoemd. Ondiepe geothermie kan interessant zijn voor bijvoorbeeld nieuwbouw of glastuinbouw, waar de temperatuurvereiste voor verwarmen lager is. Merk op dat voor het Slochteren reservoir in de kansrijke gebieden, het reservoir daar relatief ondiep gelegen is en binnen de classificatie van lage temperatuur geothermie valt. De onderstaande analyse kijkt naar lagen binnen de Noordzee groep, die elders in de provincie op diepten tot 1500 meter voorkomen.

De mogelijkheden voor lage temperatuur geothermie in de Noordzee Groep sedimenten zijn onderzocht in de studie van PanTerra & Witteveen+Bos in 2022. De belangrijkste conclusies uit dat onderzoek zijn:

- de Formatie van Heers (dat sinds die tijd hernoemd is naar het Laagpakket van Orp) kan mogelijk als lage temperatuur bron of als HTO worden ingezet in Voorst, Epe, Apeldoorn, Brummen en Zutphen
- de Formatie van Brussel (Zand van Brussel Laagpakket) kan mogelijk als lage temperatuur bron of als HTO worden ingezet in Zutphen, Brummen, en Voorst, en in mindere mate in Apeldoorn, Barneveld en de gemeentes ten noorden hiervan
- de Formatie van Vessem (dat sinds die tijd hernoemd is naar het Laagpakket van Berg) kan als lage temperatuur bron worden ingezet in Lochem, Berkelland, Bronckhorst, Doetinchem, Zutphen, Harderwijk, Nunspeet, Ermelo, Putten en Nijkerk. Omdat hier de diepte aanzienlijk is (meer dan 1.000 m) kan ook een gedeelte van de midden temperatuur vraag worden opgevangen

- ook in de Betuwe liggen er kansen voor geothermie uit het diepere Paleogeen. De High Case vermogenskaarten van ThermoGIS geven hier vermogens aan van 2-8 MW gecombineerd met temperaturen van 40 tot 50 °C. Dit kan interessant zijn voor de gemeentes Tiel, Culemborg, Geldermalsen, Waardenburg en Zaltbommel.

Sinds die tijd is er nieuwe SCAN data beschikbaar gekomen, maar deze data is vooral gericht op de diepere reservoirs, bijvoorbeeld van de Schieland, Trias en Rotliegend Groepen. Op basis van ThermoGIS is het beeld ten tijde van het opstellen van dit rapport per formatie:

- De conclusie voor het Laagpakket van Orp is weinig veranderd ten opzichte van 2022. Ter plaatse van Twello is er een vermogen van 1.6 MW mogelijk. Er is tot 7.4 MW mogelijk in het meest gunstige scenario voor de ondergrond. Er is ook potentie te zien rond Zaltbommel en Kerkdriel (ThermoGIS, 2026).
- Voor het Zand van Brussel Laagpakket is de potentie rond Zutphen, Brummen en Voorst laag, met tot 1 MW vermogen in het meest gunstige scenario voor de ondergrond. Ten zuiden en westen van Apeldoorn is er tot 3 MW mogelijk in het meest gunstige scenario. Het mogelijk winbare vermogen is het grootst rond Nunspeet, met tot 3.5 MW vermogen bij een gunstige ondergrond, of 1 MW in het basis scenario (ThermoGIS, 2026).
- Het Laagpakket van Berg kent enkel potentie in het noordwesten van de provincie Gelderland, rond Nijkerk, Putten en Ermelo, waar vermogens van 0.3 MW tot ~5 MW mogelijk kunnen zijn voor respectievelijk het basis scenario en het gunstige scenario (ThermoGIS, 2026).
- Andere lagen die eventueel interessant kunnen zijn, zijn niet aanwezig in de provincie Gelderland en zijn dus niet nader onderzocht.

ThermoGIS biedt een algemene inschatting van wat de ondergrondse eigenschappen zijn en welk vermogen daarbij verwacht kan worden, op basis van regionale modellen. Er is nog veel onbekend over de ondiepe lagen en de mogelijkheden voor ondiepe geothermie. Daarbij helpen initiatieven die nu worden opgezet, zoals het versnellingsprogramma Lage Temperatuur Aardwarmte en het vervolg van EBN SCAN, mogelijk om meer kennis van de ondergrond te krijgen. Een meer gedetailleerde studie kan daardoor een ander beeld geven over de potentie voor ondiepe geothermie dan wat er nu op basis van ThermoGIS is geschetst.

# 7 Onzekerheidskaarten en vervolgstappen

## 7.1 Onzekerheidskaarten

In deze studie is een gestructureerde aanpak gevolgd om de risico's en onzekerheden van de ondergrond in het onderzoeksgebied te beoordelen. Er is rekening gehouden met drie belangrijke aspecten die invloed hebben op de succesvolle ontwikkeling van geothermie: geologische complexiteit, de waarschijnlijkheid van de aanwezigheid van reservoirs en de beschikbaarheid en kwaliteit van ondergrondse gegevens. Elk aspect is afzonderlijk geëvalueerd en vervolgens gecombineerd in één totale risico- en onzekerheidskaart met behulp van een risico-versus-zekerheid-matrix. Alle kartering en ruimtelijke analyses zijn uitgevoerd met behulp van QGIS software. De volledige uitwerking van de onzekerheidskaarten is gegeven in hoofdstuk 7 van de geologische bijlage.

- **Risico van geologische complexiteit**. Gebieden die meer dan 1,5 km verwijderd zijn van in kaart gebrachte breuken worden geclassificeerd als laag risico, gebieden tussen 0,5 en 1,5 km als matig risico, vanwege mogelijke structurele invloed en onzekerheid, en gebieden binnen 0,5 km van breuken als hoog risico.

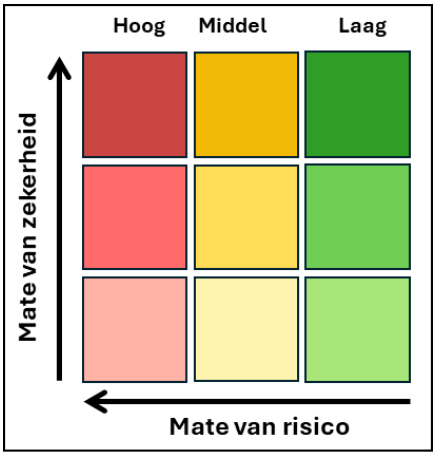
- **Risico van de aanwezigheid van geschikte reservoirs met voldoende dikte**. De aanwezigheid van reservoirs wordt beoordeeld aan de hand van de geïnterpreteerde bruto dikte, waarbij gebieden van meer dan 70 m worden geclassificeerd als laag risico, 40-70 m als matig risico en minder dan 40 m als hoog risico voor geothermische ontwikkeling.

- **Onzekerheid over gegevens.** De (on)zekerheid die we hebben over de ondergrond gerelateerd aan de hoeveelheid en kwaliteit van data dat beschikbaar is. De betrouwbaarheid van gegevens is het hoogst in gebieden die worden gedekt door 3D-seismiek, matig in gebieden waar alleen digitale 2D-seismische lijnen beschikbaar zijn en het laagst in gebieden zonder digitale seismische dekking.

De onzekerheidsanalyse is uitgevoerd voor de Formatie van Slochteren (Figuur 7-2) en voor het Onder Volpriehausen Laagpakket, van de Onder Germaans Trias Groep (Figuur 7-3).

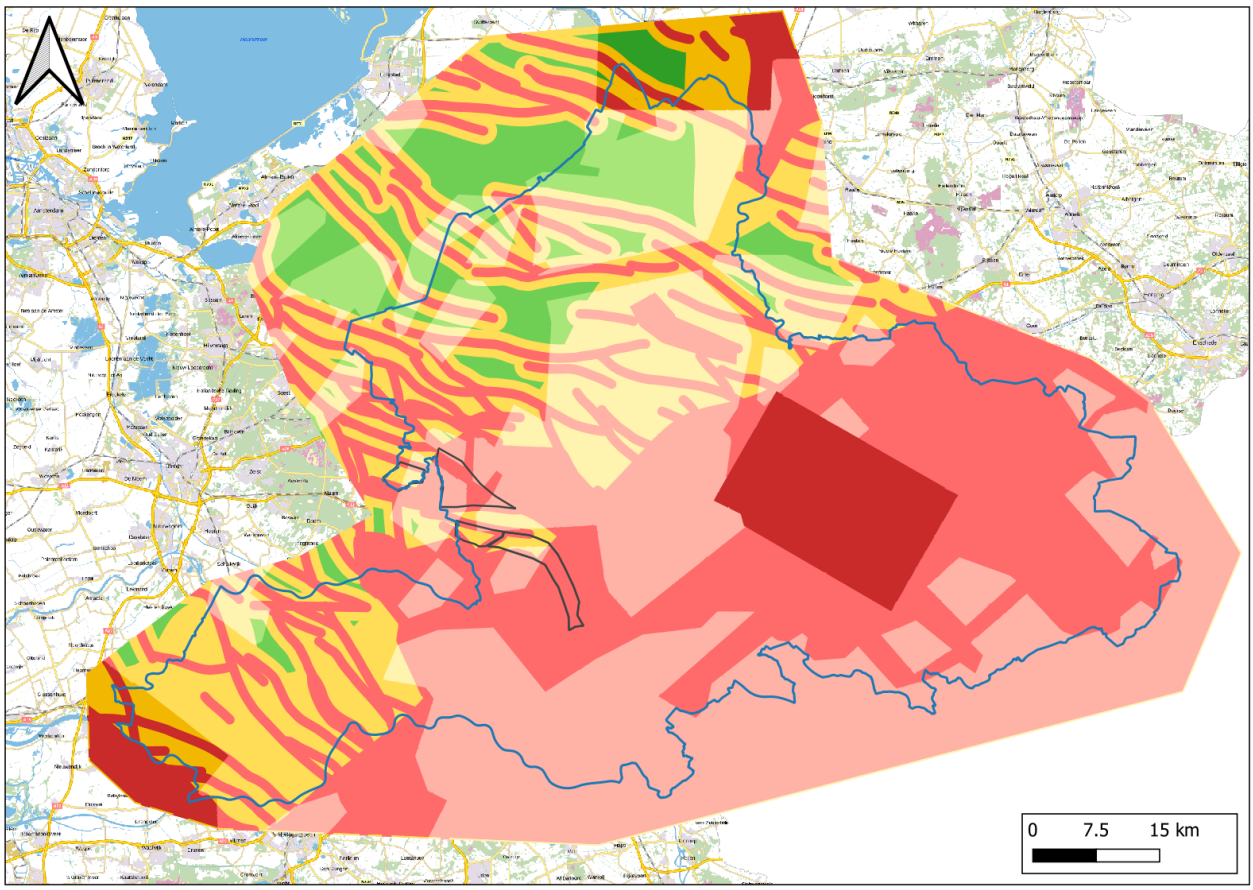
Op de gecombineerde kaart bepalen de geologische complexiteit en de aanwezigheid van reservoirs het algemene risiconiveau, weergegeven met een groen-geel-rood kleurenschaal. De zekerheid van deze beoordeling wordt aangegeven door de tint: donkere tinten geven gebieden aan waar interpretaties worden ondersteund door robuuste ondergrondse data, terwijl lichtere tinten locaties aangeven waar interpretaties zijn gebaseerd op beperkte informatie of interpolatie (daar is dus minder zekerheid).

De risico-versus-zekerheid-matrix (Figuur 7-1) maakt het mogelijk om risico's en zekerheden samen te bekijken. Hierdoor kan onderscheid worden gemaakt tussen gebieden met een vergelijkbaar risiconiveau, maar die verschillen in de mate van zekerheid waarmee dat risico kan worden beoordeeld. Denk bijvoorbeeld aan gebieden met een hoog risico waarover veel gegevens beschikbaar zijn, versus gebieden met een hoog risico maar die onzekerder zijn vanwege beperkte gegevens.

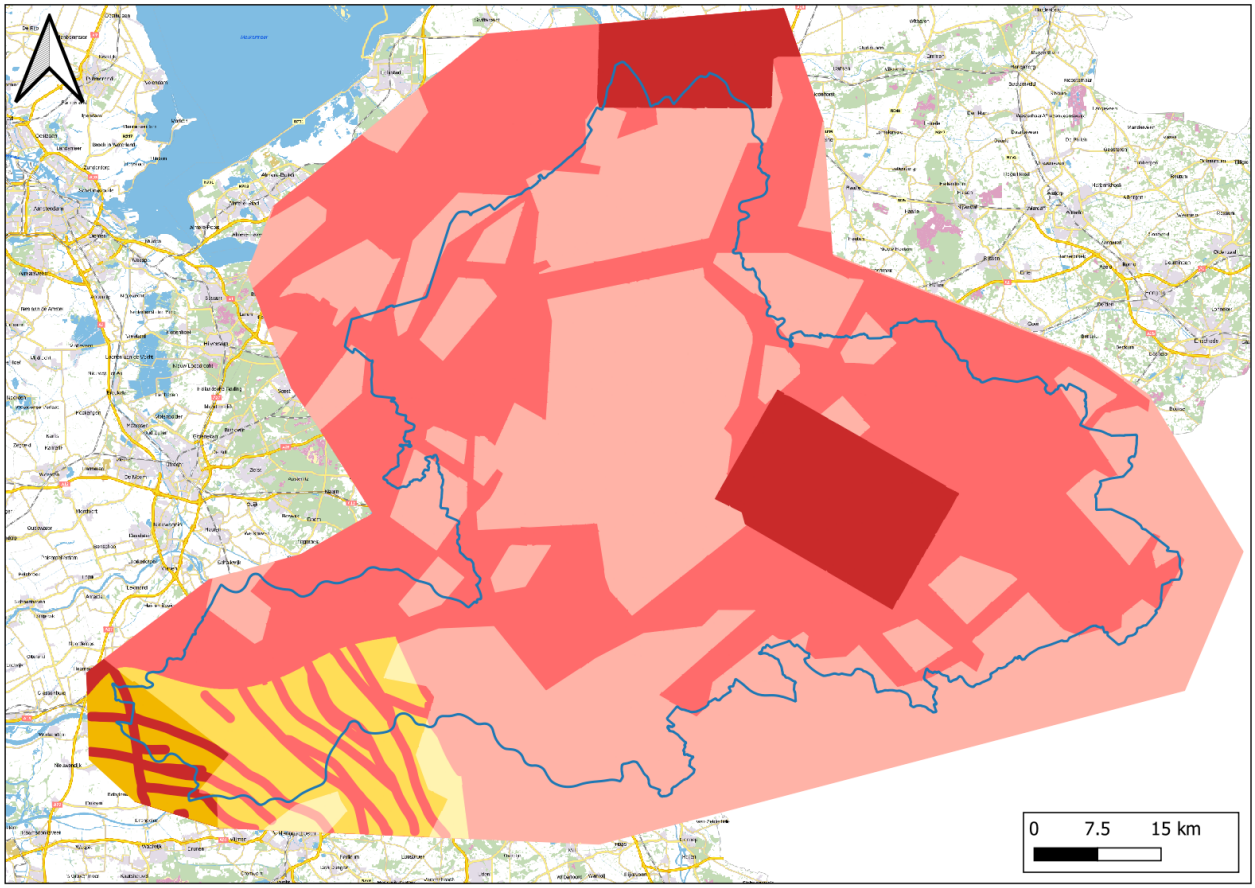



**Figuur 7-1: Risico-versus-zekerheid-matrix die risico en zekerheid combineert in één classificatie. Risico neemt toe van rechts naar links; zekerheid neemt toe van onder naar boven. Kleuren tonen zowel het risiconiveau (laag, gemiddeld, hoog) als het bijbehorende zekerheidsniveau (laag, gemiddeld, hoog).**

Door deze elementen samen te brengen in één kaart, kan regionale screening voor geothermische mogelijkheden in een vroeg stadium plaatsvinden. De kaart laat zien waar de ondergrondse omstandigheden gunstiger of uitdagender lijken. Ook geeft het aan waar het vertrouwen verbeterd kan worden door het verkrijgen van aanvullende data.




**Figuur 7-2: Totale risicokaart voor het Formatie van Slochteren-reservoir, gebaseerd op een combinatie van risico en onzekerheid. Kleuren geven het algemene ondergrondse risico weer (groen: laag, geel: matig, rood: hoog). Tinten geven de zekerheid aan. Zwarte veelhoeken markeren de geïdentificeerde prospecten.**



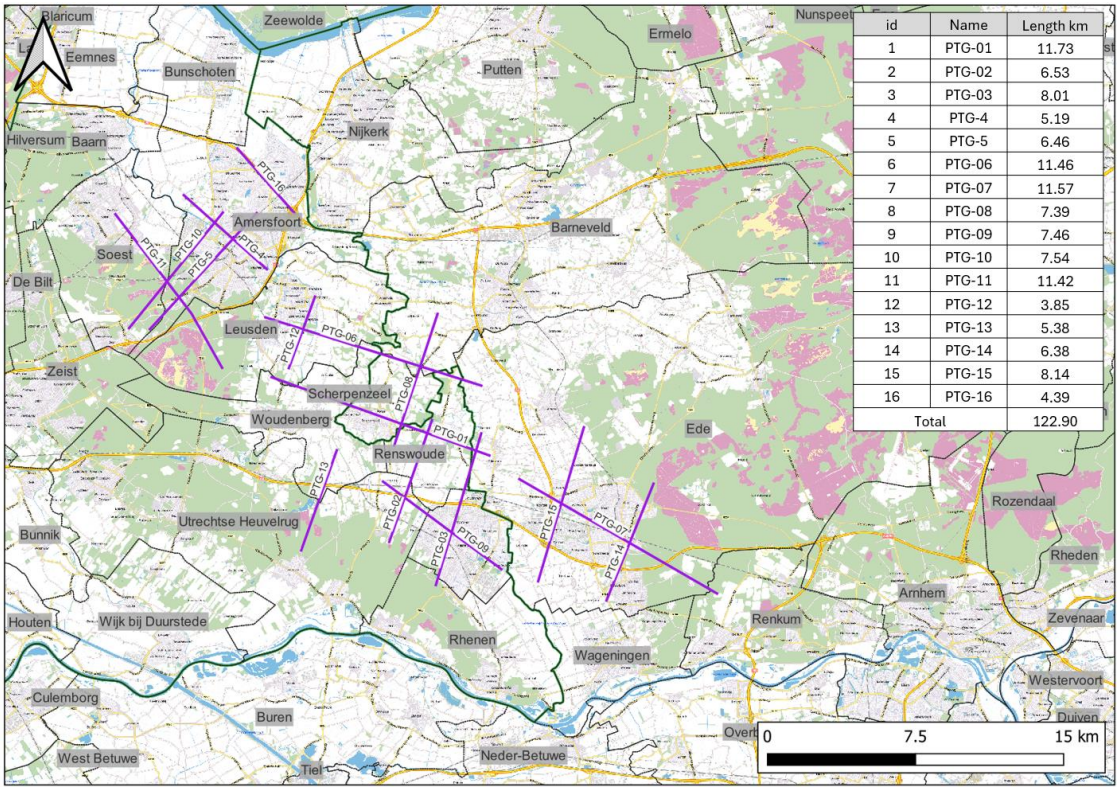

**Figuur 7-3: Totale risicokaart voor het Onder Volpriehausen reservoir (Onder-Germaans Trias Groep), gebaseerd op een combinatie van risico en onzekerheid. Kleuren geven het algemene ondergrondse risico weer (groen: laag, geel: matig, rood: hoog). Tinten geven de zekerheid aan.**

## 7.2 Aanvullend geologisch onderzoek

### 7.2.1 Aanbevelingen voor acquisitie van aanvullende seismische data

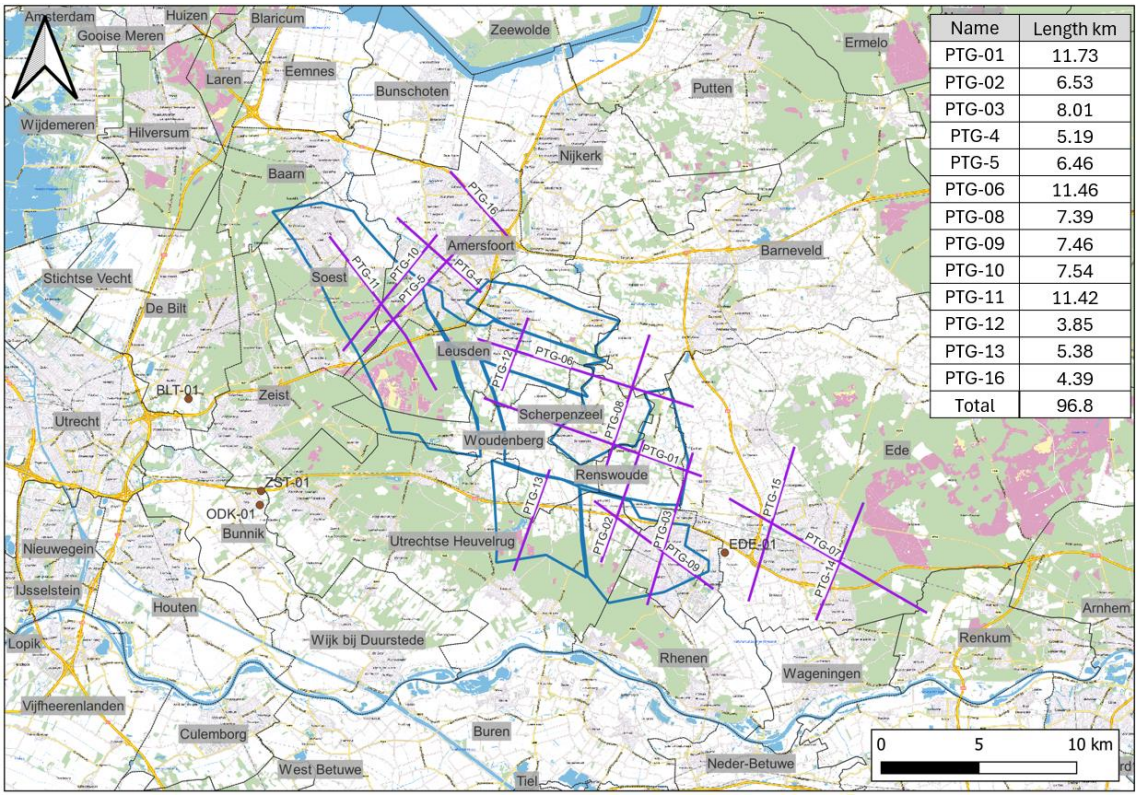
PanTerra adviseert om meer gegevens te verzamelen over de aangemerkte prospecten binnen de provincie Utrecht, Gelderland en Regio Foodvalley (Figuur 7-4). Deze gebieden zijn gezamenlijk beoordeeld, omdat meerdere prospecten vergelijkbare geologische onzekerheden delen en daarom profiteren van gecoördineerde acquisitie van aanvullende seismische data.

PanTerra stelt voor om 2D-seismiek uit te voeren. Het primaire doel van de 2D-seismische lijnen is om de minimale gegevensdekking te bereiken die nodig is om de risico's van belangrijke geologische elementen van de prospecten te verminderen. Hierdoor wordt het onderzoek het mogelijk om een meer betrouwbare kartering van regionale structurele trends te maken. Ook kan door 2D-seismiek het inzicht in de zijdelingse positie en continuïteit van belangrijke breukzones worden vergroot. De oriëntatie van de lijnen is zodanig gekozen dat deze een beter beeld geven in de prospecten. Daarnaast zijn de seismische lijnen bedoeld om de aanwezigheid en continuïteit van de beoogde reservoirs te bevestigen, bijvoorbeeld door te kijken of deze niet zijn geërodeerd en zich wel op de juiste plaats bevinden. De seismische resolutie wordt ook voldoende geacht om belangrijke stratigrafische eenheden goed te kunnen identificeren, waardoor we beter kunnen zien waar de reservoirs precies voorkomen.




| id | Name | Length km |
|---|---|---|
| 1 | PTG-01 | 11.73 |
| 2 | PTG-02 | 6.53 |
| 3 | PTG-03 | 8.01 |
| 4 | PTG-4 | 5.19 |
| 5 | PTG-5 | 6.46 |
| 6 | PTG-06 | 11.46 |
| 7 | PTG-07 | 11.57 |
| 8 | PTG-08 | 7.39 |
| 9 | PTG-09 | 7.46 |
| 10 | PTG-10 | 7.54 |
| 11 | PTG-11 | 11.42 |
| 12 | PTG-12 | 3.85 |
| 13 | PTG-13 | 5.38 |
| 14 | PTG-14 | 6.38 |
| 15 | PTG-15 | 8.14 |
| 16 | PTG-16 | 4.39 |
| Total | | 122.90 |

**Figuur 7-4: Deze kaart toont de voorgestelde locaties van 2D-seismische lijnen (paars) in de provincies Utrecht en Gelderland, met als doel de ondergrond verder te de-risken. De tabel in de rechterbovenhoek geeft elk van de 16 seismische lijnen weer met de bijbehorende lengte.**




| Name | Length km |
|---|---|
| PTG-01 | 11.73 |
| PTG-02 | 6.53 |
| PTG-03 | 8.01 |
| PTG-4 | 5.19 |
| PTG-5 | 6.46 |
| PTG-06 | 11.46 |
| PTG-08 | 7.39 |
| PTG-09 | 7.46 |
| PTG-10 | 7.54 |
| PTG-11 | 11.42 |
| PTG-12 | 3.85 |
| PTG-13 | 5.38 |
| PTG-16 | 4.39 |
| Total | 96.8 |

**Figuur 7-5: Kaart met de voorgestelde locaties van de 2D-seismische lijnen (paars) in de provincie Utrecht en hun relatie tot de geselecteerde prospectieve gebieden (blauw). De tabel in de rechterbovenhoek geeft een overzicht van de 6 seismische lijnen die geheel of gedeeltelijk binnen de provinciegrenzen liggen.**

Op basis van deze beoordeling stelt PanTerra voor om 16 2D-seismische lijnen met een gezamenlijke lengte van ongeveer 123 km in de provincie Utrecht, Gelderland, en Regio Foodvalley uit te laten voeren. Zo kunnen de risico's van de ondergrond van de prospecten verder in kaart worden gebracht.

De voorgestelde locaties van de lijnen zijn indicatief en kunnen tijdens de gedetailleerde planning worden aangepast om rekening te houden met beperkingen aan de oppervlakte en vergunningseisen. Het voorstel voor seismiek en de locatie van de lijnen zijn gebaseerd op feedback van EBN.

Zes van de zestien 2D-lijnen liggen geheel of gedeeltelijk in de provincie Gelderland. Een overzicht van de voorgestelde 2D-seismische lijnen ten opzichte van de prospecten is weergegeven in Figuur 7-5.

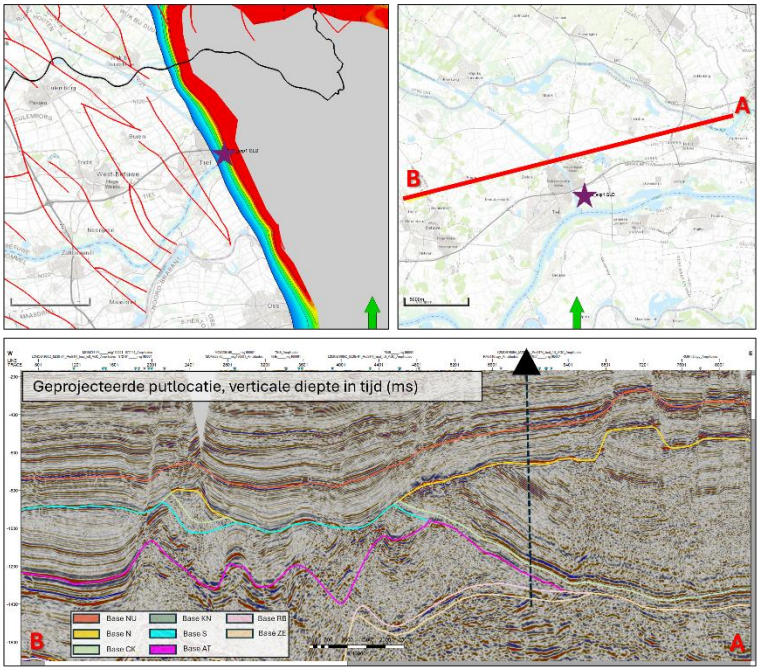
Ten tijden van de afronding van dit rapport heeft EBN bekend gemaakt dat er een seismische campagne gaat plaatsvinden in het noorden en oosten van de provincie Utrecht (zie nieuwsbericht Seismisch onderzoek in het noordoosten van de provincie Utrecht - SCAN aardwarmte). Deze plannen zijn ook relevant voor de Provincie Gelderland. Er kunnen verschillen zijn in de locatie van de lijnen tussen de twee plannen. Het doel beide plannen is zeer vergelijkbaar: meer kennis bieden over de reservoirs en structuren in de ondergrond. De EBN plannen voor de seismische campagne zijn verder gevorderd dan de in deze studie voorgestelde lijnen. Daarnaast kunnen seismische datasets van operators waardevolle inzichten bieden over de ondergrond. Standaard wordt 2D- en 3D-seismiek na 5 jaar openbaar gemaakt op NLOG.nl. Als er meerdere partijen of klanten betrokken zijn bij het seismische onderzoek, kan de geheimhouding tot 10 jaar zijn.

### 7.2.2 Aanvullende proefboring

Naast aanvullende seismische lijnen voor het in kaart brengen van de ondergrondse structuren en kansrijke doelreservoirs moet er ook worden gekeken te worden naar de reservoirkwaliteit. In de provincie Gelderland zijn slechts een beperkt aantal putten geboord, voornamelijk omdat het gebied niet als zeer veelbelovend voor olie en gas werd beschouwd. Hierdoor is er beperkte kennis over de ondergrond in de regio. Een proefboring kan een completer beeld geven van de ondergrond. Een proefboring is een put die als doel heeft om data te verzamelen, bijvoorbeeld over de aanwezigheid, eigenschappen en diepte van een reservoir of afsluitende laag. Afhankelijk van het aantal pakket metingen kan er meer worden gezegd over de eigenschappen van de aangeboorde gesteenten. Dit levert dus waardevolle inzichten op. Een bijkomend voordeel is dat een proefboring zo ontworpen kan worden dat deze in de toekomst als productieput kan worden gebruikt, afhankelijk van de resultaten en de behoeften van het geothermieproject.

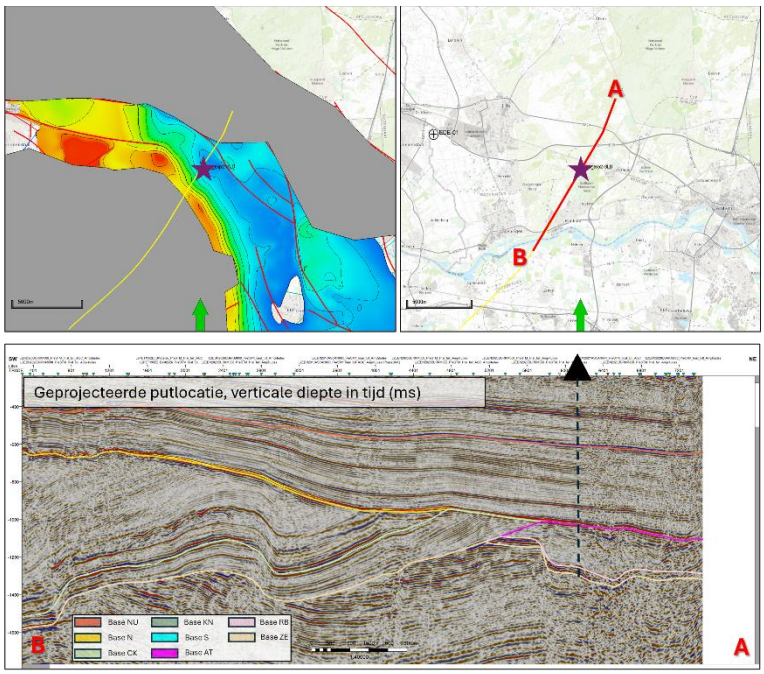
Op basis van de vermogenskaarten van de Formatie van Slochteren en de onzekerheidskaarten zoals gepresenteerd in hoofdstukken 5.3 en 7 vindt PanTerra het zinvol om één proefboring te plaatsen in prospect 3, nabij Renkum en één ten westen van het Peel-Maasbommel complex, dichtbij Tiel. In Figuur 7-6 en Figuur 7-7 zijn kaarten met indicatieve locaties voor de proefboringen gegeven. De locaties zijn vanuit het perspectief van de ondergrond bepaald. Later moet de realisatie van de proefboring in meer detail worden onderzocht. Daarbij moet bijvoorbeeld gekeken worden naar de bovengrondse condities. De vraag aan de provincie/gemeenten is of het wel zinvol is om de geologische onzekerheden te verminderen, gezien de te verwachten geologische condities, het warmteprogramma, de hoeveelheid warmtevraag en bovengrondse beperkingen. Exploratieput 2 is voor Gelderland en Regio Foodvalley op dezelfde locatie gekozen, de locatie is voor beide gebieden relevant voor het de-risken van de ondergrond.

| Exploratieput 1 Gelderland | | |
|---|---|---|
| Doelreservoir | Rotliegend | |
| Reservoirdiepte | ~1750 meter | |
| Reservoirtemperatuur | 65 °C | |
| Reservoirdikte | 60 meter | |
| Transmissiviteit | 40 Dm | |
| Secundaire doellagen | Boven- Onder Germaans Trias Groep | |
| **Scenario** | **Middel scenario** | **Brijn scenario** |
| Vermogen | 15 MW | 5 MW |
| **Doel: ondergronds risico te verminderen** | | |
| Te onderzoeken: aanwezigheid reservoir, reservoirkwaliteit | | |




**Figuur 7-6: Voorgestelde locatie exploratieput 1 in de provincie Gelderland, om geothermie vanuit het oogpunt van de ondergrond verder te de-risken. Daarbij is de locatie, verwachte eigenschappen van de ondergrond en schematisch een boortraject weergegeven. Doelreservoir: Formatie van Slochteren van de Rotliegend Groep.**

| Exploratieput 2 Gelderland | | |
|---|---|---|
| Doelreservoir | Rotliegend | |
| Reservoirdiepte | ~1450 meter | |
| Reservoirtemperatuur | 55 °C | |
| Reservoirdikte | 40 meter | |
| Transmissiviteit | 10 Dm | |
| Secundaire doellagen | Boven- Onder Germaans Trias Groep, Zechstein Z1 randcarbonaat | |
| **Scenario** | **Middel scenario** | **Brijn scenario** |
| Vermogen | 3.5 MW | 1 MW |
| **Doel: ondergronds risico te verminderen** | | |
| Te onderzoeken: aanwezigheid reservoir, reservoirkwaliteit | | |




**Figuur 7-7: Voorgestelde locatie exploratieput 2 in de provincie Gelderland. Doelreservoir: Formatie van Slochteren van de Rotliegend Groep.**

Voor proefboring 1 geldt dat er een grote onzekerheid is over de reservoirkwaliteit ten westen van het Peel-Maasbommel complex, zoals beschreven in sectie 5.1.3. Met de proefboring kan er bevestigd worden of de verwachte goede reservoirkwaliteit van de Slochteren Formatie ook echt aanwezig is. Momenteel is er te weinig data om die verwachting nader te onderbouwen, waardoor er geen prospect is gedefinieerd ondanks het goede verwachte vermogen.

Proefboring 2 wordt geadviseerd ten oosten van het Peel-Maasbommel Complex. Hier is al meer data, bijvoorbeeld van de EDE-01 en NVG-01 put. Echter is er onzekerheid over hoe ver de band met de goede reservoirkwaliteit zich uitstrekt naar het oosten. Daarom is de proefboring net ten oosten geplaatst, in de zone waar het geothermisch vermogen snel afloopt. Mocht de reservoirkwaliteit hier ook nog goed blijken, dan kan er mogelijk een nieuw prospect gedefinieerd worden.

## 7.3 Vervolgstappen voor de provincie

Deze sectie geeft een overzicht van de vervolgstappen om het risico van het realiseren van geothermie te verkleinen. Dit betreft allereerst het onderzoek dat het ondergrondse risico moet verkleinen, geïdentificeerd in Secties 7.2.1 en 7.2.2.

Het is verder aan te bevelen dat de gemeente of provincie een inschatting maakt van de financiële haalbaarheid van warmteproductie en -levering. In eerste instantie voldoet een globale financiële berekening van kosten en opbrengsten. Hierbij moet de warmtevraag meegenomen worden: de mogelijke woningen en industrie die warmte afnemen en betalen. Voor de verwarming van nieuwbouwwoningen is in het algemeen lage temperatuur aardwarmte goed mogelijk. De categorieën voor aardwarmte zijn:

- lage temperatuur (30-55$^0$C)
- midden temperatuur (55-90$^0$C)
- hoge temperatuur (90-120$^0$C)

In de provincie Gelderland is de Formatie van Slochteren de belangrijkste aardlaag die in dit gebied relatief ondiep ligt en daardoor lage-temperatuur aardwarmte kan leveren. De vervolgstap bij het bepalen van de warmtevraag is het identificeren van de (geplande) nieuwbouwwijken in de buurt van de warmtepotentie uit deze studie.

Een ander belangrijk element is het warmtetransport door middel van een warmtenetwerk. De provincie en gemeentes moeten een keuze maken hoe een warmtenetwerk gerealiseerd kan worden, bijvoorbeeld door het oprichten van een warmtebedrijf. Met de Wet collectieve Warmte (WcW) moet de overheid een meerderheidsbelang in elk warmtenetwerk hebben. Als gevolg van deze wet zullen marktpartijen zelfstandig geen warmtenetwerken (kunnen) realiseren.

De bovenstaande aspecten: financiële haalbaarheid, warmtevraag en warmtetransport, samen met dit geologische rapport vormen de basis voor de aanvraag van een vergunning toewijzing zoekgebied. Voor de aanvraag zoekvergunning is het voldoende dat men de drie bovenstaande aspecten van financiële haalbaarheid, warmtevraag en warmtetransport zeer globaal heeft uitgewerkt. Tijdens de geldigheid van de zoekvergunning moeten deze in meer detail worden doorgerekend. Een meer volledig overzicht wordt geboden in de handreiking aardwarmte van NPLW (zie website NPLW).

De keuze is aan de gemeentes, provincie, of regio's om zelf een zoekvergunning aan te vragen of dit aan de markt (een operator) over te laten. Als overheden ervoor kiezen om zelf een zoekvergunning aan te vragen, dan geeft dat meer controle op de voortgang van het realiseren van aardwarmte. Aan het einde van de looptijd van een zoekvergunning zal men een operator moeten vinden voor de startvergunning. Als de overheid de ontwikkeling van aardwarmte aan de markt overlaat, zal men ook bij die keuze een warmtenetwerk moeten (laten) realiseren – wellicht gedeeltelijk samen met marktpartijen. Een compleet

aardwarmteproject doorloopt vijf stappen (Figuur 7-8) (geothermie.nl). Deze stappen worden hieronder beschreven.




**Figuur 7-8: De vijf stappen die een aardwarmteproject doorloopt, inclusief de verschillende activiteiten die ondernomen worden per stap (geothermie.nl, ECW.nl).**

**Stap 1: Initiatief nemen**

Tijdens deze stap neemt een partij (bijvoorbeeld gemeente, aardwarmte-ontwikkelaar, of energiebedrijf) het initiatief om een aardwarmteproject te ontwikkelen. Tijdens deze fase wordt de warmtevraag en het warmteaanbod in kaart gebracht. Daarnaast wordt er gekeken naar geschikte oppervlaktelocaties, financiering, en of er plannen zijn om een warmtenet aan te leggen. In deze studie is voldaan aan het identificeren van het warmte-aanbod. Vandaar ook het advies om als vervolgstap de warmtevraag, de financiën en het warmtetransport verder in kaart te brengen.

Aan het eind van deze stap wordt een vergunning **zoekgebied** aangevraagd. Hiermee krijgt de eigenaar van de vergunning het alleenrecht om binnen die vergunning op zoek te gaan naar de aanwezigheid van (voldoende) aardwarmte en daarna een startvergunning aan te vragen.

**Stap 2: Verkennen (exploratie)**

Als het zoekgebied is toegewezen, kan er nader geologisch en geofysisch onderzoek worden gedaan. Hierbij wordt ook een uitvoerder en een boorlocatie gekozen. Ook wordt er aangetoond dat er technische capaciteit is en financiële capaciteit is. Tijdens deze fase kan ook een Subsidie Duurzame Energie (SDE++) worden aangevraagd. Na deze stap kan een **startvergunning** worden aangevraagd. Hiermee kunnen de activiteiten die onder stap 3 worden beschreven van start gaan. Naast een startvergunning heeft de vergunninghouder ook andere vergunningen nodig zoals een omgevingsvergunning.

**Stap 3: Aanleggen**

Als de startvergunning toegekend is, kan de aanleg van de aardwarmte-installatie beginnen. De putten worden geboord en getest en de productie kan starten. Daarnaast worden de bovengrondse faciliteiten aangelegd en worden de putten aangesloten op het warmtenet. Vervolgens wordt het winningsplan, inclusief de omvang van het winningsgebied, opgesteld en ingediend. Hiermee wordt de **vervolgvergunning** aangevraagd (Figuur 7-8).

**Stap 4: Winnen**

Zodra de vervolgvergunning is toegewezen, kan de winning van aardwarmte en de levering aan het warmtenet echt beginnen. Tijdens deze fase is monitoring en onderhoud van de aardwarmte-installatie belangrijk. Hiervoor zijn eisen opgesteld door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM).

**Stap 5: Einde**

Een aardwarmtebron kan niet oneindig warmte leveren. Wanneer de bron niet meer voldoende warmte levert, kan productie worden beëindigd. Een aardwarmte-doublet gaat ongeveer dertig jaar mee, maar er zijn ook installaties in het Bekken van Parijs die al sinds 1969 produceren. Wanneer productie wordt beëindigd, moet de installatie worden ontmanteld en opgeruimd.

Tijdens de periode van de zoekvergunning is verder nodig: een seismisch risico- analyse en het onderzoeken voor de SDE-aanvraag. De stappen en doorlooptijden gerelateerd aan technisch geologisch en geomechanisch werk is gegeven in de volgende tabel:

| item | tijd indicatie |
|---|---|
| **Aanvraag vergunning zoekgebied** | doorlooptijd: 2-3 maanden |
| **Seismisch risico-analyse (Seismic Hazard Analysis) op geïnduceerde* seismiciteit** | doorlooptijd 2 maanden |
| **SDE-aanvraag – geologisch werk, put traject, vermogen (DoubletCalc)** | doorlooptijd variërend met complexiteit enkele weken tot enkele maanden |

*geïnduceerde seismiciteit is een aardbeving die wordt veroorzaakt door menselijke activiteit in de ondergrond, bijvoorbeeld door drukveranderingen. Dit is een belangrijk thema voor veiligheid. In Nederland is tot nu toe geen significante geïnduceerde seismiciteit waargenomen bij conventionele geothermische doubletten.

# Geologische bijlage

# De mogelijkheden voor ondiep en diepe geothermie in Gelderland

Project: 2500125

# 1 Inleiding geologische bijlage

Zoals genoemd in de inleiding van het hoofdrapport (zie hoofdstuk 1.2) is dit rapport opgebouwd uit twee onderdelen: het hoofdrapport en de geologische bijlage. Het hoofdrapport is voor een breed publiek geschreven en bevat alle belangrijke uitkomsten van de studie, maar beschrijft niet de geologische achtergrond van de werkwijze in dit onderzoek. Deze geologische bijlage bevat een uitgebreidere omschrijving van de stappen en uitkomsten van het geologisch onderzoek, geschreven voor deskundigen of geïnteresseerden.

# 2 Seismische interpretatie

Seismische interpretatie speelt een cruciale rol bij het krijgen van het inzicht in de ondergrond dat nodig is voor de beoordeling en ontwikkeling van geothermie. Een nauwkeurige interpretatie heeft een directe invloed op verschillende belangrijke geologische en reservoirparameters. Dit is hieronder nader toegelicht:

**Diepte en temperatuur:** De temperatuur neemt over het algemeen toe met de diepte; daarom kunnen afwijkingen in de structurele interpretatie of diepteconversie leiden tot een aanzienlijke overschatting of onderschatting van het geothermisch potentieel. Betrouwbare seismische interpretatie is essentieel om de diepte en daarmee temperatuur te voorspellen.

**Laterale-uitbreiding en continuïteit:** Interpretatie over een groter gebied stelt ons in staat de laterale uitbreiding van reservoirs in kaart te brengen en hun continuïteit te beoordelen. Ook kunnen we interne barrières, breukverzet en reservoir-compartimenten zien, die van invloed kunnen zijn op de vloeistofstroming en de prestaties van het reservoir.

**Belangrijkste reservoireigenschappen:** Reservoireigenschappen zoals porositeit en permeabiliteit zijn sterk afhankelijk van de diepte en worden beïnvloed door de structurele en stratigrafische architectuur. Een verbeterde seismische interpretatie biedt een robuuster kader voor het evalueren van deze kenmerken en hun ruimtelijke variabiliteit, die van cruciaal belang zijn voor het beoordelen van de kwaliteit en productiviteit van reservoirs op een regionaal schaalniveau.

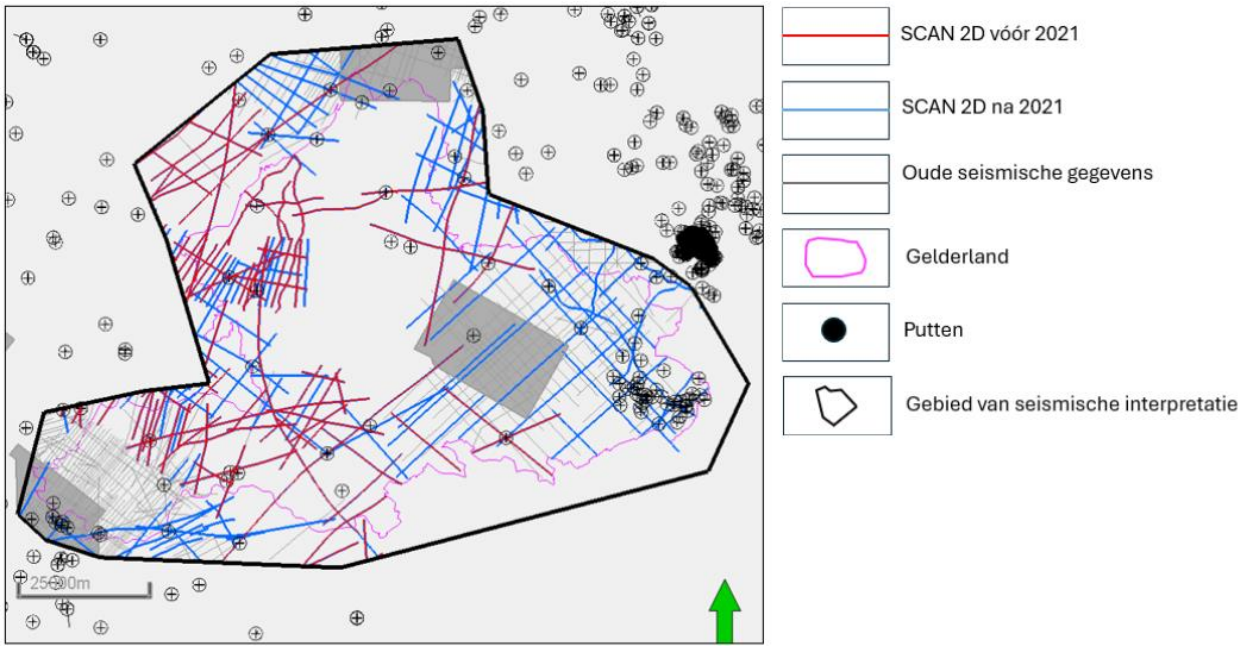
Over het algemeen vermindert seismische interpretaties de onzekerheid over de ondergrond, verbetert het nauwkeurigere voorspellingen van temperatuur en ondergrondse eigenschappen en verbetert het de identificatie van breuken. Dit draagt niet alleen bij aan geoptimaliseerde strategieën voor geothermische ontwikkeling, maar ook aan veiligere plaatsing van boorputten en risicobeperking.

## 2.1 Database

Het huidige project bouwt voort op de resultaten van een seismisch interpretatieonderzoek dat PanTerra Geoconsultants B.V. (PTG) in 2020-2021 heeft uitgevoerd. Dat eerdere onderzoek omvatte een regionale update van de structurele interpretatie met behulp van een combinatie van oudere ‘legacy’ 2D-seismische lijnen en SCAN-seismische gegevens die op dat moment beschikbaar waren. Hoewel dit eerdere onderzoek de onzekerheid over de ondergrond verminderde, bleven er onzekerheden vanwege de wisselende kwaliteit van de gegevens en onvolledige gegevensdekking.

Het doel van het huidige project is om het structurele model verder te verfijnen door aanvullende SCAN-seismische lijnen te integreren die sinds 2021 beschikbaar zijn gekomen. Deze nieuw verkregen gegevens bieden een betere dekking en kwaliteit, waardoor een robuustere en consistentere interpretatie van ondergrondse structuren mogelijk is.

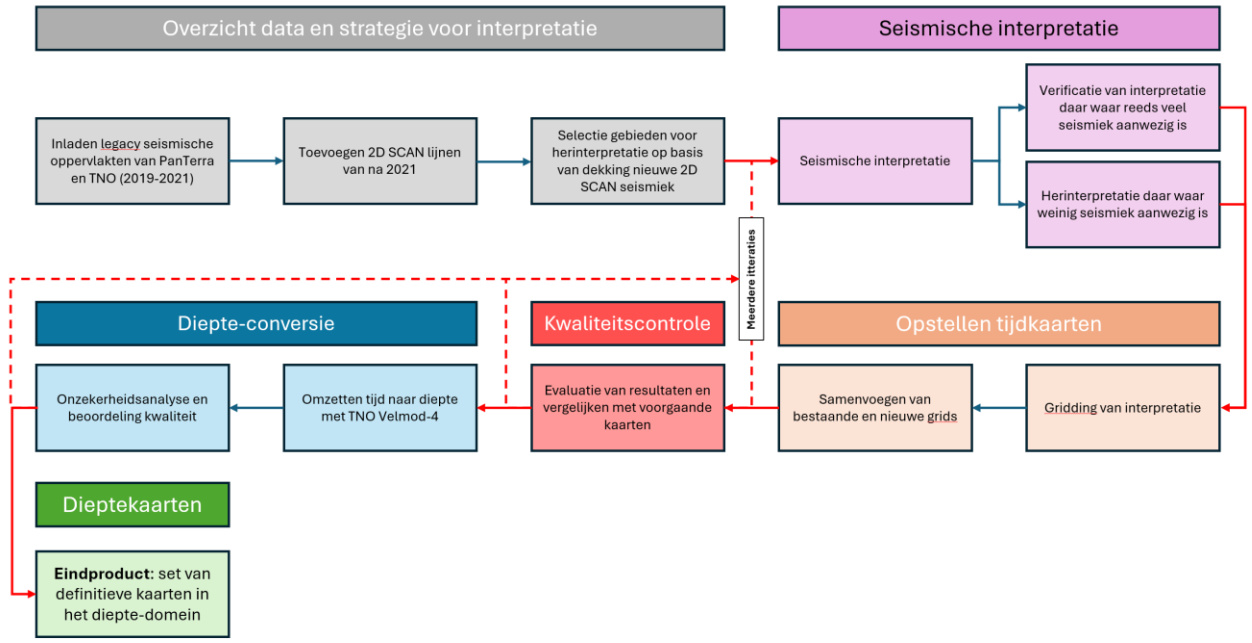
Figuur 2-1 illustreert de seismische gegevensdekking in het studiegebied. Grijze lijnen geven legacy 2D-seismische lijnen weer, die over het algemeen van mindere kwaliteit zijn en daardoor beperkt bruikbaar zijn. In rood zijn SCAN-seismische lijnen aangegeven die in de interpretatie van 2020-2021 al zijn opgenomen, terwijl in blauw nieuw beschikbare SCAN-lijnen zijn aangeven die als onderdeel van het huidige project zijn geïntegreerd.




**Figuur 2-1: De kaart toont de seismische gegevensdekking in het onderzoeksgebied. Grijze lijnen geven legacy 2D-seismische gegevens van over het algemeen mindere kwaliteit aan, rode lijnen staan voor SCAN-lijnen die zijn gebruikt in de interpretatie van 2020-2021 en blauwe lijnen geven nieuw beschikbare SCAN-gegevens weer die zijn opgenomen in deze studie.**

## 2.2 Werkwijze seismische interpretatie

De werkwijze die voor dit project is gekozen, volgt een gestructureerde en iteratieve aanpak voor regionale seismische interpretatie en tijd-diepteconversie (Figuur 2-2). Vorige (legacy) seismische interpretaties werden als basis genomen en gecombineerd met nieuw beschikbare SCAN 2D-lijnen. Dit vormt de leidraad voor het aanwijzen van gebieden die opnieuw geïnterpreteerd moeten worden. De interpretatie-inspanningen waren gericht op het bijwerken van gebieden met schaarse of mindere kwaliteit legacy data, terwijl gebieden met een dichte datadekking voornamelijk werden gebruikt voor validatie en controle op consistentie. Van de nieuwe interpretatie werd een grid gemaakt om vervolgens tijdkaarten te genereren, die werden samengevoegd met bestaande legacy grids. De diepteconversie werd uitgevoerd met behulp van het Velmod-4-snelheidsmodel van TNO, vergezeld van een onzekerheidsevaluatie en kwaliteitsbeoordeling. Kwaliteitscontrole werd gedurende het hele proces toegepast, met meerdere iteraties tussen interpretatie, tijdskaarten en diepteconversie, voor robuuste en consistente resultaten. Het proces levert een reeks definitieve dieptekaarten en bijbehorende onzekerheidsbeoordelingen op die geschikt zijn voor regionale studies.




**Figuur 2-2: Schema van de iteratieve werkwijze voor de actualisatie van de regionale seismische interpretatie, waarbij seismische data via meerdere stappen en kwaliteitscontroles worden verwerkt tot dieptekaarten in het dieptedomein.**

## 2.3 Well-to-Seismic Tie (Koppeling seismiek en putten)

Het huidige project is een update en voortzetting van het onderzoek dat PanTerra in 2021-2022 heeft uitgevoerd. Daardoor waren er geen extra koppelingen tussen putten en seismiek (well-ties) nodig voor de bijgewerkte seismische interpretatie. Op het moment van interpretatie waren er geen putloggegevens beschikbaar voor SCAN-putten binnen het onderzoeksgebied, waardoor het genereren van nieuwe well-ties niet mogelijk was. Omdat formation tops wel beschikbaar waren, konden de SCAN putten wel gebruikt worden voor de diepteconversie.

## 2.4 Interpretatie horizonten

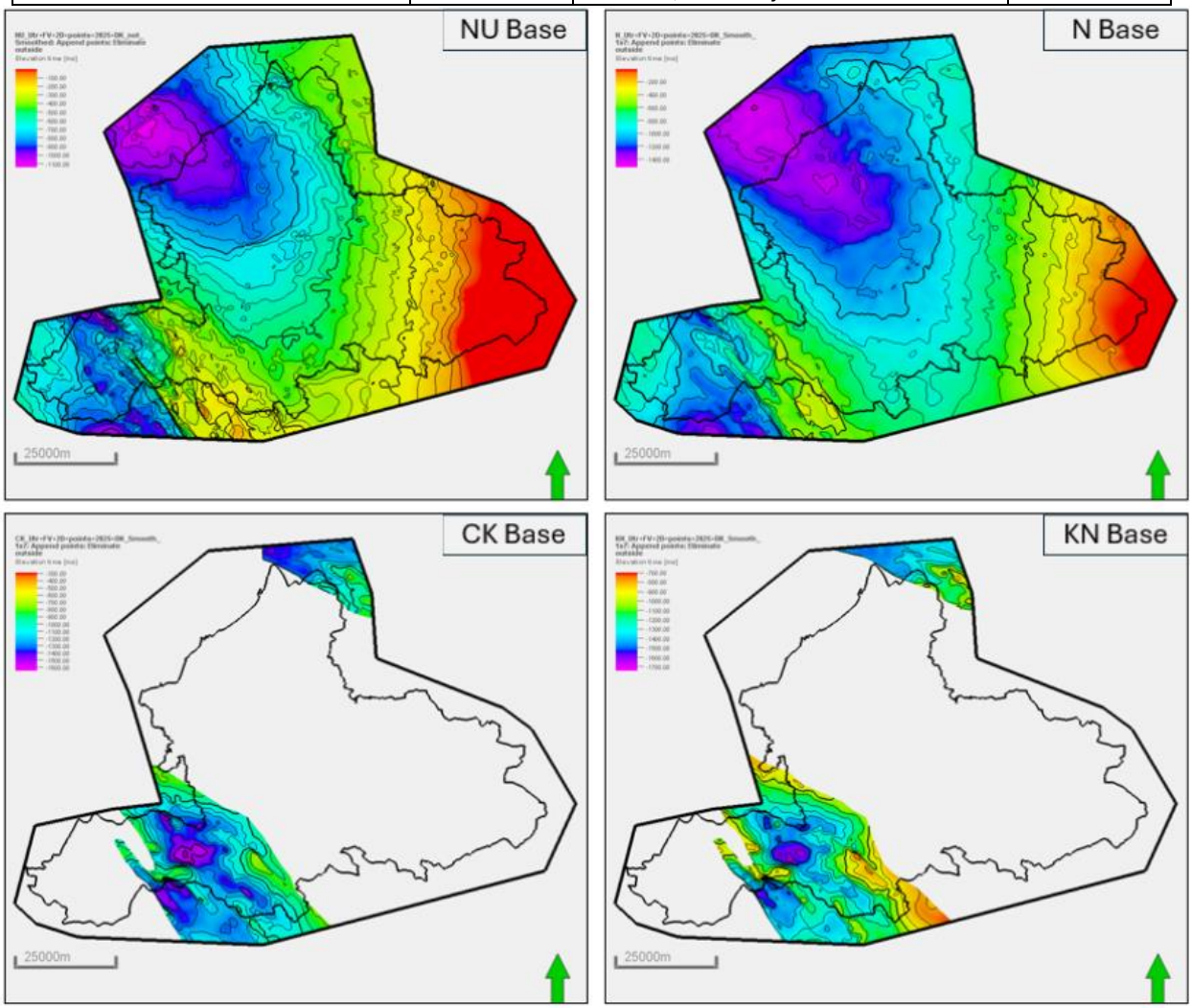
Zoals eerder genoemd, werd de seismische interpretatie bijgewerkt aan de hand van nieuw beschikbare SCAN 2D-seismische gegevens en geïntegreerd in het bestaande regionale structurele model. Over het algemeen is de kwaliteit van de seismische gegevens goed, waardoor een betrouwbare en consistente interpretatie van horizonten mogelijk is in het hele studiegebied.

De seismische gegevens volgen de Europese SEG-polariteitsconventie, waarbij een negatieve seismische excursie (dal, harde kick, rood op seismische secties) overeenkomt met een positieve reflectiecoëfficiënt, wat wijst op een toename van de acoustic impedance, als gevolg van een hogere snelheid en/of dichtheid. Deze conventie werd consequent toegepast tijdens de interpretatie om interne coherentie en compatibiliteit met oudere datasets te waarborgen.

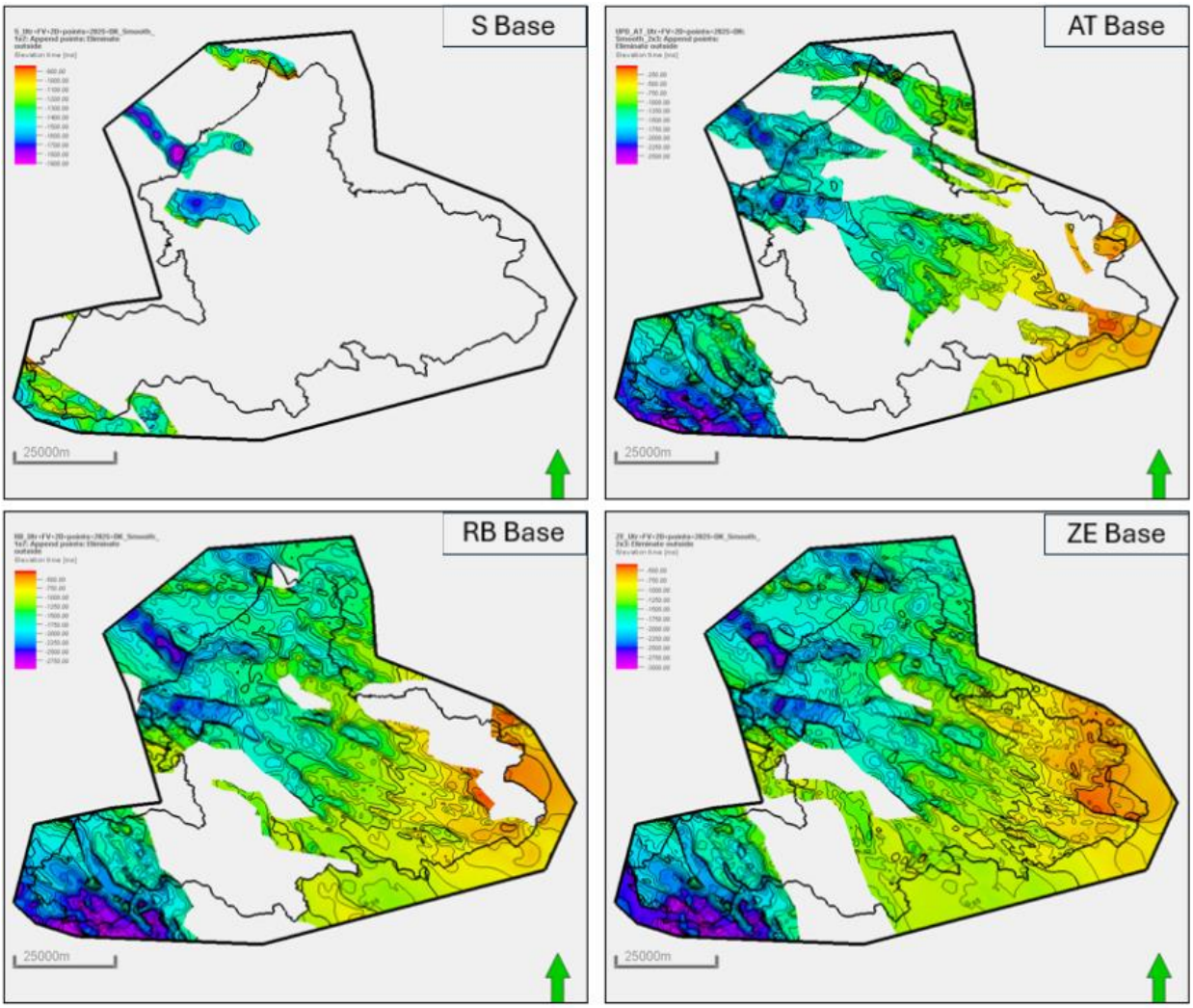
In totaal werden acht regionale horizonten geïnterpreteerd (Tabel 2-1). Twee van deze horizonten, de Trias- en Rotliegend-intervallen, de focus van deze interpretatie, omdat deze centraal staan in dit onderzoek. De overige horizonten vormen belangrijke stratigrafische grenzen en snelheidscontrasten die werden opgenomen ter ondersteuning van diepteconversie en kalibratie van het snelheidsmodel (Figuur 2-3, Figuur 2-4).

**Tabel 2-1: Lijst van acht seismische horizonten met bijbehorende lithostratigrafische code, seismisch karakter en totale interpretatievertrouwen.**

| Horizon | Index | Seismic character | Confidence |
|---|---|---|---|
| Basis Boven-Noordzee Groep | Basis NU | Weak soft kick, difficult to follow | Moderate |
| Basis Noordzee Supergroep | Basis N | Strong hard kick (erosional surface) | Good |
| Basis Krijtkalk Groep | Basis CK | Very unclear reflector, difficult to follow | Poor |
| Basis Rijnland Groep | Basis KN | In most places erosional surface | Moderate |
| Basis Schieland Groep | Basis S | In most places erosional surface | Moderate |
| Basis Altena Groep | Basis AT | Strong hard kick | Good |
| Basis Onder-Germaanse Trias Groep | Basis RB | Hard kick, generally strong | Moderate |
| Basis Zechstein Groep | Basis ZE | Soft kick, not always clear | Moderate |




**Figuur 2-3: Resulterende grids in het tijdsdomein (ms) voor Basis Boven-Noordzee Groep (NU), Basis Noordzee Groep (N), Basis Krijtkalk (CK) en Basis Rijnland Groep (KN).**

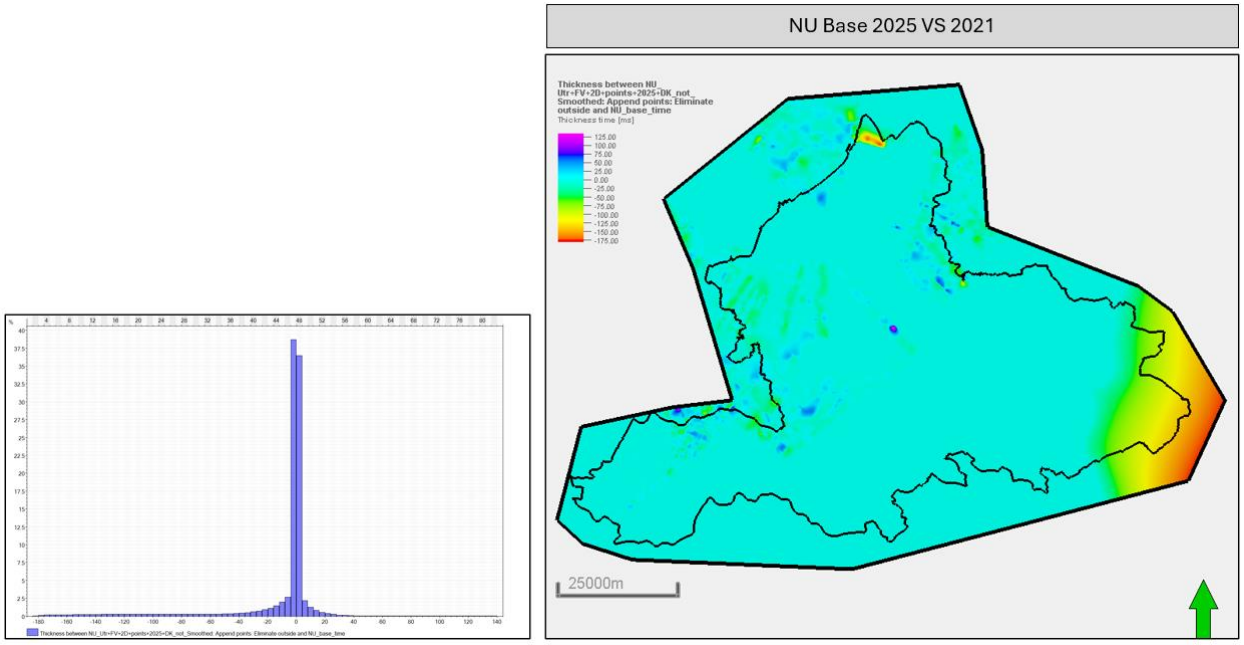



**Figuur 2-4: Resulterende grids in het tijdsdomein (ms) voor Schieland (S), Basis Altena Groep (AT), Basis Trias (RB) en Basis Zechstein (ZE).**

### 2.4.1 Basis Boven-Noordzee Groep (Basis NU)

De Basis van de Boven-Noordzee Groep wordt gekenmerkt door een negatief acoustic impedance contrast, dat doorgaans gepaard gaat met een matig tot zwak trogrespons. Dit horizont kan moeilijk te traceren zijn vanwege het relatief subtiele seismische karakter. De over het algemeen lage structurele complexiteit van het interval maakt toch een redelijk betrouwbare en consistente interpretatie mogelijk.

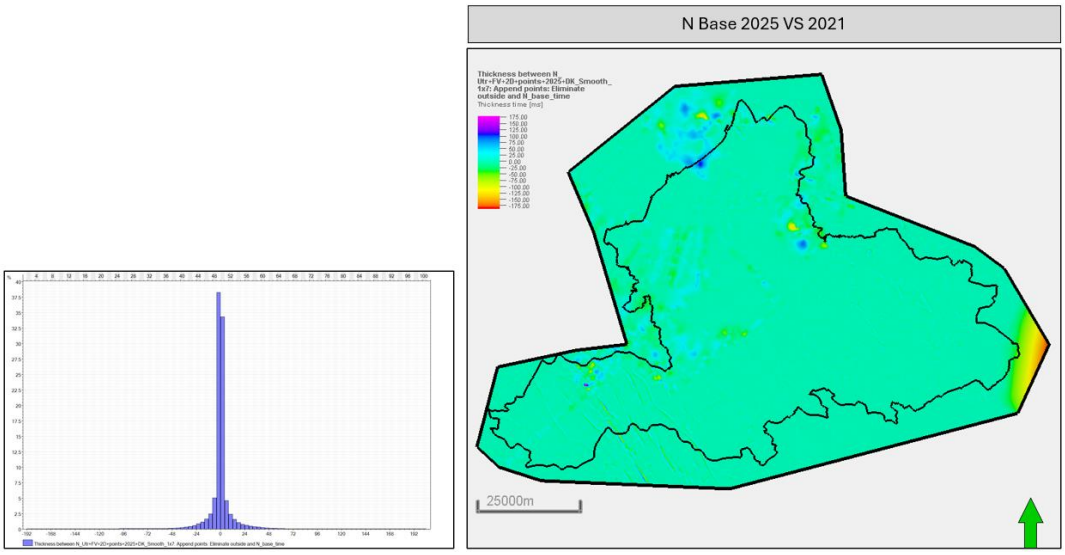
De verschillen tussen de bijgewerkte interpretatie en eerdere studies variëren van ongeveer 180 ms dieper (warme kleuren) tot 130 ms ondieper (koude kleuren) (Figuur 2-5). Ondanks dit bereik vallen de meeste waarden rond de nul, wat aangeeft dat de veranderingen over het algemeen klein zijn. De resterende variaties worden voornamelijk toegeschreven aan de toegenomen seismische gegevensdichtheid door de nieuw beschikbare SCAN-lijnen, die de horizontcontinuïteit en structurele trends verfijnen.




**Figuur 2-5: Basis Boven-Noordzee Groep (NU). Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

### 2.4.2 Basis Onder-Noordzee Groep (Basis N, Basis Kenozoïcum)

De Basis Onder-Noordzee Groep vertegenwoordigt een positieve acoustic impedance break (harde kick); de bijbehorende trog is echter doorgaans zwak en discontinu. De bovenliggende piek is daarentegen sterk en lateraal continu. De Basis Kenozoïcum vormt een belangrijke discordantie. Deze werd daarom bij de interpretatie bij voorkeur gevolgd. De horizont vormt een uitgesproken hoekdiscordantie, waarbij seismische amplitudevariaties verschillen in de onderliggende geologie weerspiegelen. Het breukpatroon dat op dit niveau wordt waargenomen, lijkt sterk op dat van de Boven Noordzee Groep.

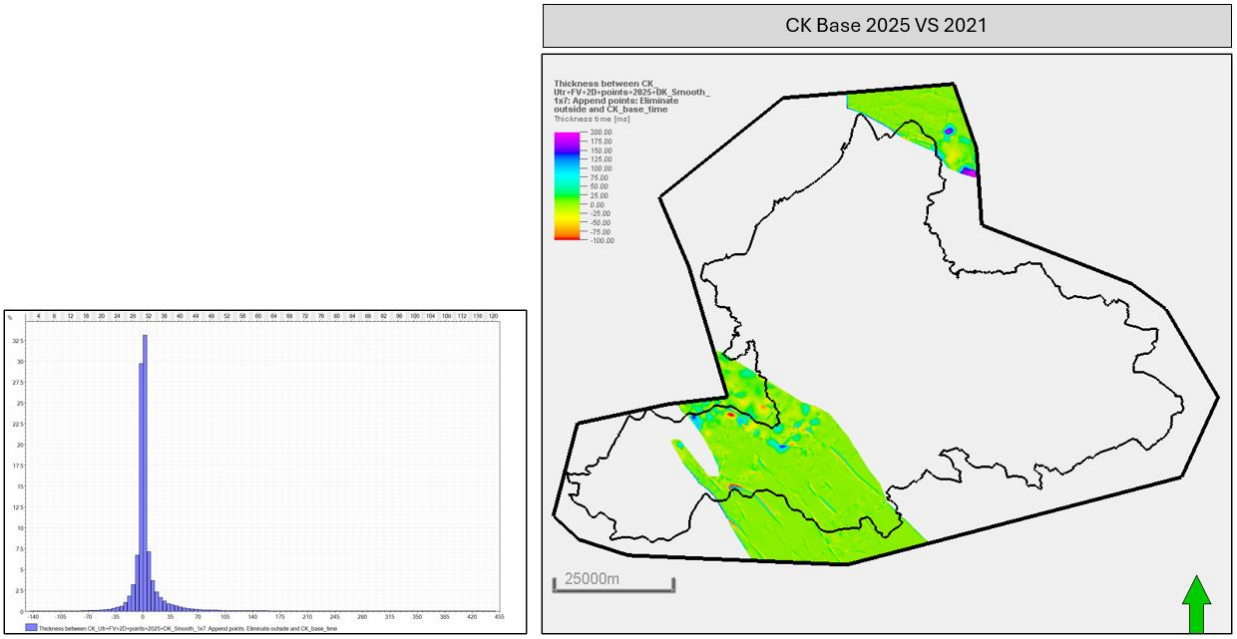



**Figuur 2-6: Basis Noordzee Supergroep (N). Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

In vergelijking met legacy interpretatie zijn er verschillen ongeveer 180 ms dieper tot 200 ms ondieper (Figuur 2-6). De meeste waarden vallen binnen een interval van ±10 ms, wat aangeeft dat de veranderingen over het algemeen klein zijn in het grootste deel van het onderzoeksgebied. Net als bij de Basis NU komt dit grotendeels door de verbeterde resolutie en dekking van de bijgewerkte seismische dataset.

### 2.4.3 Basis Krijtkalk Groep (Base CK)

De basis Krijtkalk Groep wordt gekenmerkt door een negatief acoustic impedance contrast, dat zich uit in een matige tot zwakke piekrespons. Deze groep komt alleen voor in het centrale deel van de provincie Gelderland, waar het niet is aangetast door erosie aan de basis van de Kenozoïcum discordantie en in het uiterste noorden van de provincie (Figuur 2-8).

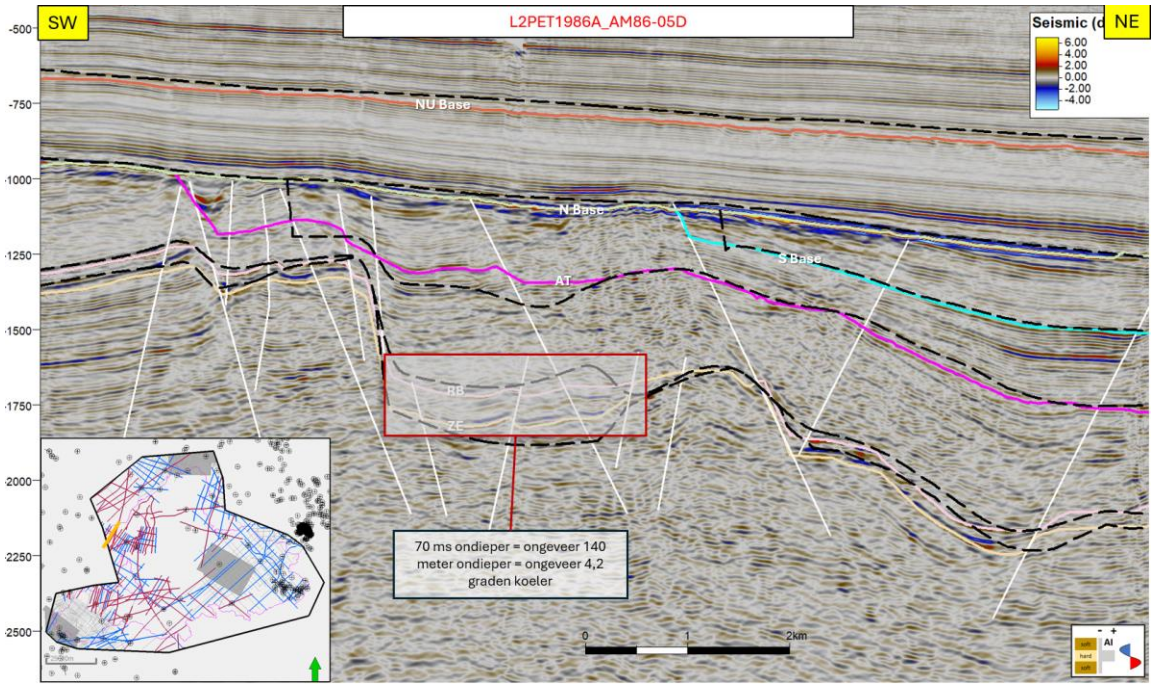



**Figuur 2-7: Basis Krijtkalk Groep (CK). Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

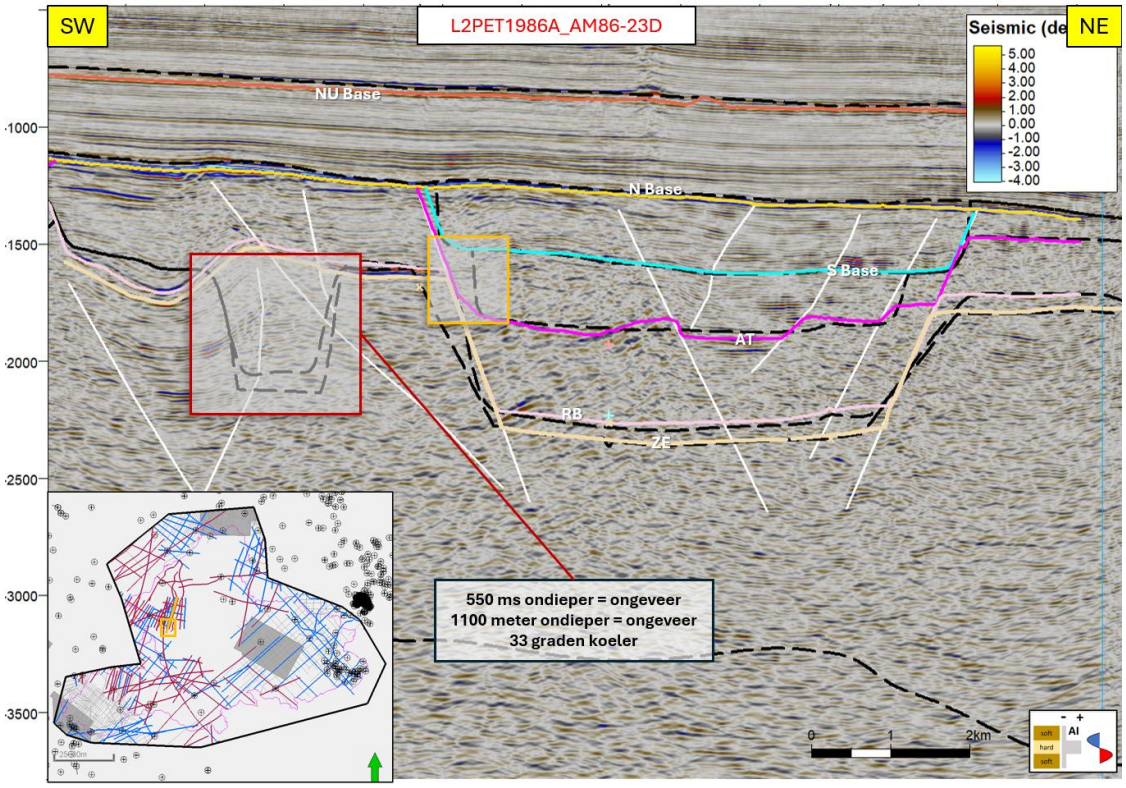
De verschillen tussen de legacy interpretatie en de huidige studie variëren van ongeveer 140 ms dieper tot 450 ms ondieper (Figuur 2-7). Ondanks dit bereik liggen de meeste waarden rond nul, wat wijst op een goede consistentie tussen de twee interpretaties. Grotere afwijkingen blijven voornamelijk beperkt tot het noordelijke deel van de provincie, gerelateerd aan verbeterde beeldvorming van het erosieoppervlak en verfijning van lokale stratigrafische relaties.

### 2.4.4 Basis Rijnland Groep (Basis KN)

De Basis Rijnland Groep is gekenmerkt door een uitgesproken hoekdiscordantie met een positieve acoustic impedance break van variabele omvang, afhankelijk van welke formatie onder het erosieoppervlak ligt. Net als bij de Basis Krijtkalk Groep is het voorkomen van de KN Groep beperkt tot het centrale deel van de provincie als gevolg van erosie aan de basis van de Kenozoïcum discordantie (Figuur 2-9). De intensiteit van de breuken is matig en vergelijkbaar voor beide horizonten.

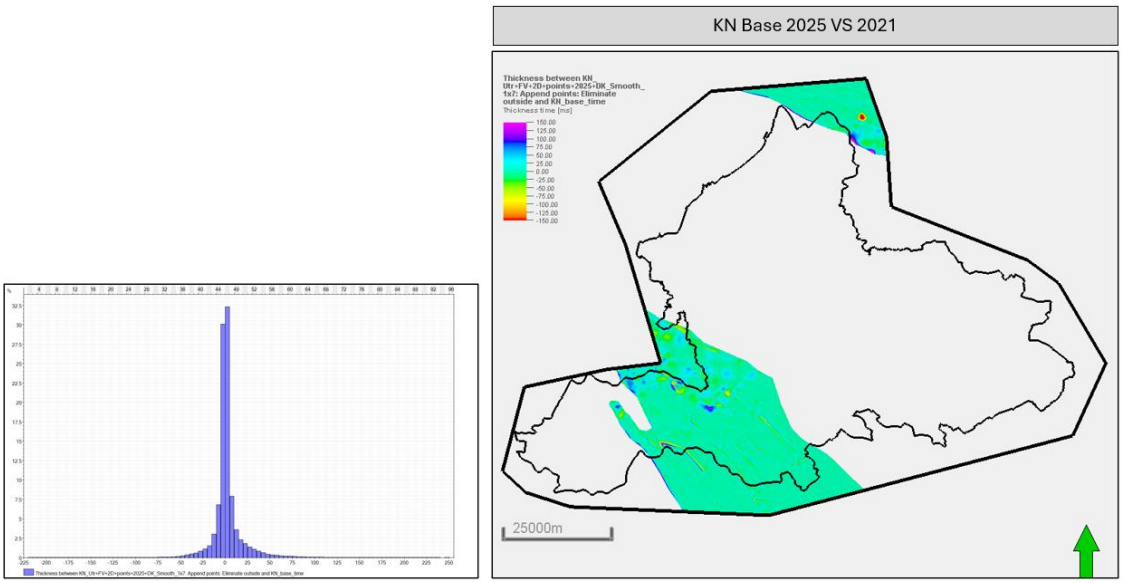



**Figuur 2-8: Seismische lijn L2PET1986A_AM86-05D illustreert de vergelijking tussen oude (zwarte stippellijn) en bijgewerkte (gekleurde) interpretaties. Er zijn lokaal opvallende verbeteringen waarneembaar met verschillen van 5-100 ms. De sectie toont ook de afsnijding van de basis Krijtkalk (CK) door de basis N discordantie.**




**Figuur 2-9: Seismische lijn 8513 illustreert de vergelijking tussen oude (zwarte stippellijn) en bijgewerkte (gekleurde) interpretaties. Er zijn opvallende lokale verbeteringen rond breuken met verschillen tot 550 ms, wat mogelijk is door verbeteringen in de kwaliteit van de lijn door herverwerking en betere controle door een grotere dichtheid van lijnen. De sectie toont ook de afsnijding van Basis Rijnland (KN) door de Basis Noordzee discordantie.**

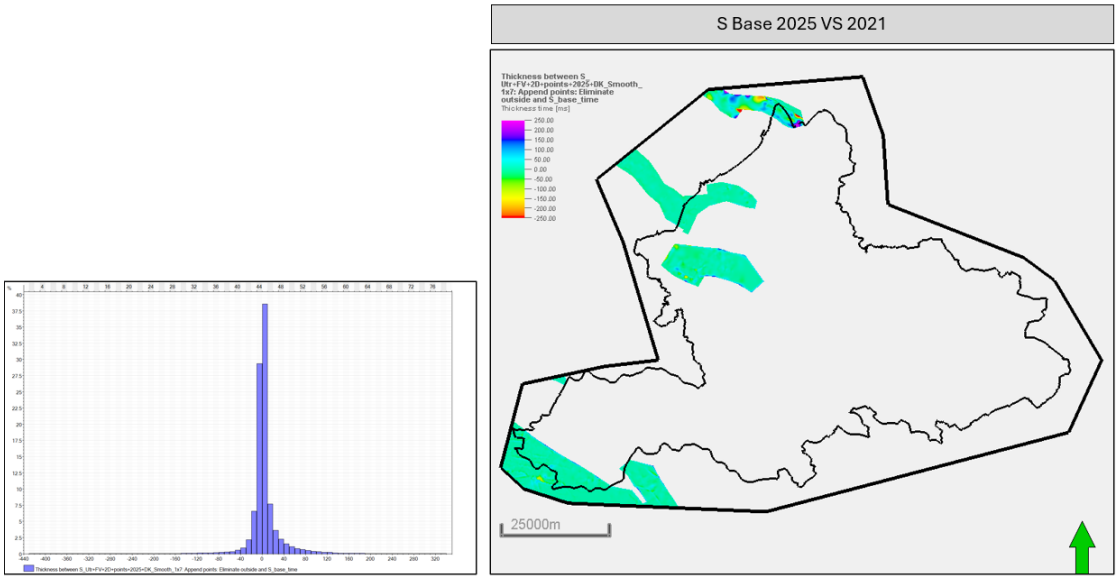
In vergelijking met de legacy interpretatie vertoont het nieuwe Basis Rijnland-horizont verschillen van ongeveer 220 ms dieper, tot 240 ms ondieper (Figuur 2-10). De meeste waarden vallen echter binnen een bereik van ±25 ms, wat aangeeft dat de veranderingen over het algemeen gering zijn in het grootste deel van het gebied. Deze variaties houden voornamelijk verband met verbeterde beeldvorming van het erosieoppervlak en lokale stratigrafische relaties in het noordelijke deel van de provincie.



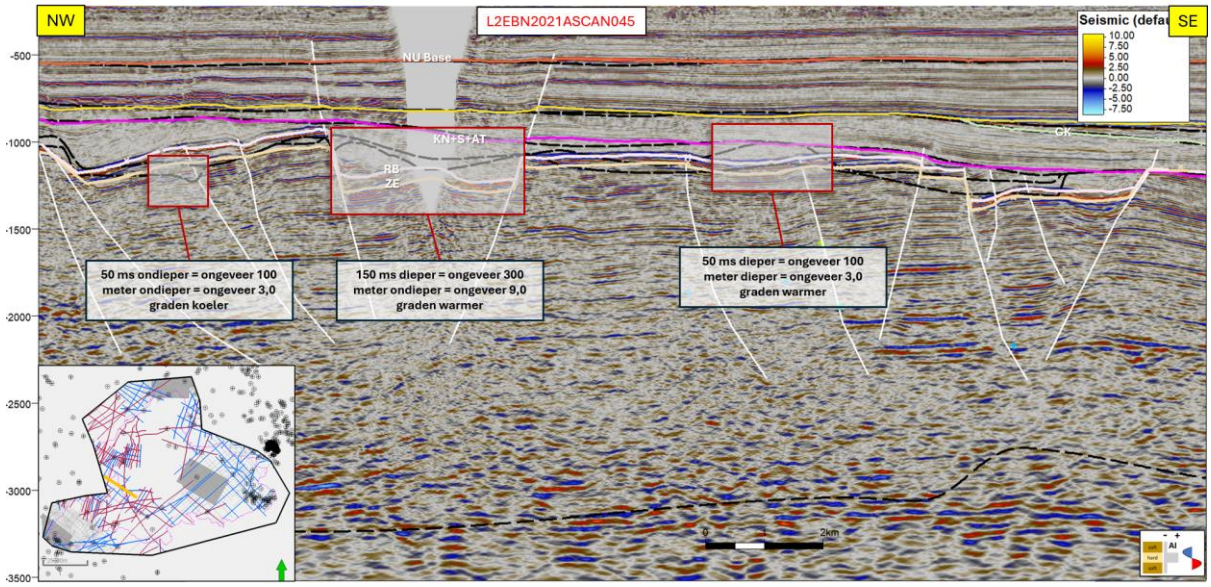

**Figuur 2-10: Basis Rijnland (KN). Vergelijking tussen de seismische interpretatie voor 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

### 2.4.5 Basis Schieland Groep (Base S)

De basis van de Schieland Groep wordt gekenmerkt door een negatief acoustic impedance contrast in combinatie met een piek van gemiddelde amplitude. De eenheid blijft alleen behouden in slenken in het noordelijke en uiterste westelijke deel van het onderzoeksgebied en wordt afgesneden door de Kenozoïcum discordantie.




**Figuur 2-11: Basis Schieland. Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

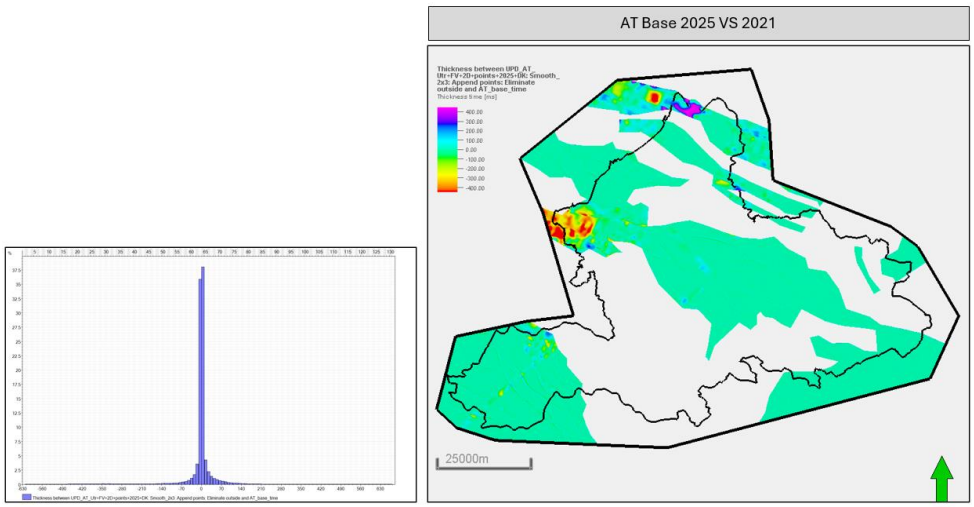



**Figuur 2-12: Seismische lijn L2EBN2021ASCAN045 illustreert de vergelijking tussen oude (zwarte stippellijn) en bijgewerkte (gekleurde) interpretaties. Er zijn opvallende lokale verbeteringen waarneembaar met een verdieping van de AT-, RB- en ZE-horizonten van 50-150 ms. De sectie toont ook een afsnijding van de Basis Schieland (S) en Basis Altena (AT) horizonten door de Tertiaire discordantie (N).**

De verschillen tussen de huidige interpretatie en legacy studies variëren van ongeveer 420 ms dieper tot 330 ms ondieper (Figuur 2-13). Het histogram geeft aan dat de meeste verschillen binnen een bereik van ±50 ms liggen, wat wijst op een consistente interpretatie. De bredere spreiding weerspiegelt voornamelijk het beperkte en discontinue voorkomen van de formatie binnen graben, samen met een verbeterde geometrie van grabens als gevolg van de hogere seismische gegevensdichtheid in de bijgewerkte dataset.

### 2.4.6 Basis Altena Groep (Basis AT)

De Basis Altena Groep wordt gekenmerkt door een sterk positief acoustic impedance contrast tussen de basale schalie en de onderliggende evaporiet-carbonaateenheden uit het Boven-Trias, wat een trog met hoge amplitude oplevert. Dit maakt de horizon tot een prominente seismische marker waar deze bewaard is gebleven, de top wordt afgesneden door de Tertiaire discordantie in een groot deel van het studiegebied (Figuur 2-13).



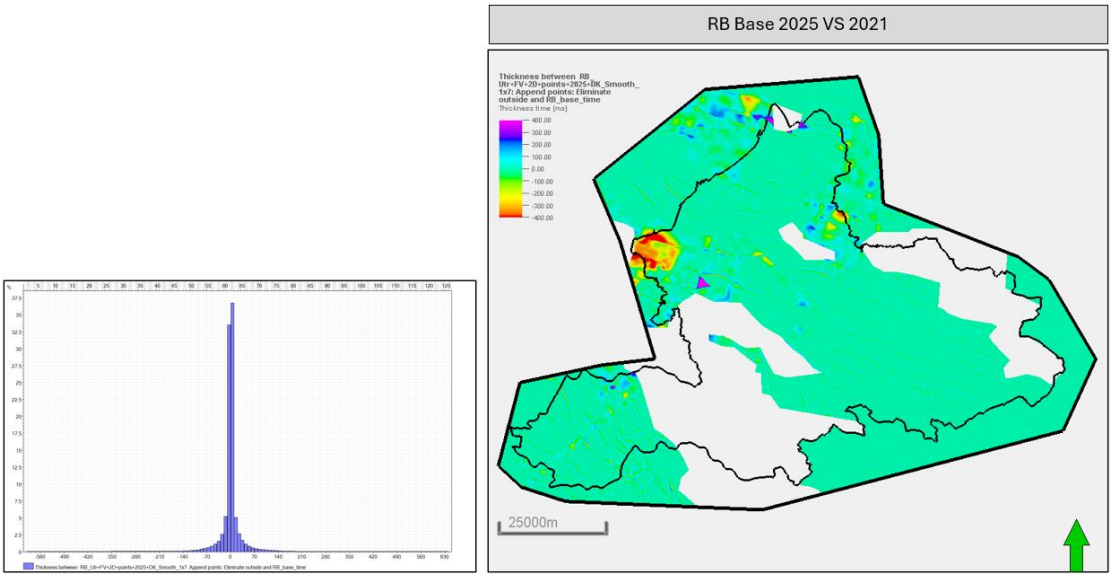

**Figuur 2-13: Basis Altena Groep (AT). Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

De verschillen tussen de bijgewerkte interpretatie en legacy studies variëren van ongeveer 600 ms dieper tot 650 ms ondieper (Figuur 2-13). De verdeling van de waarden is sterk geconcentreerd rond 0 ms, wat aangeeft dat de bijgewerkte interpretatie voor het grootste deel van het onderzoeksgebied zeer nauw aansluit bij het legacy model. Meer uitgesproken verschillen komen enkel lokaal voor en weerspiegelen voornamelijk lokale verdieping in het noordwesten van het studiegebied. Deze aanpassing weerspiegelt een herzien regionaal geologisch concept. Daarnaast is er lokale verfijning waargenomen als gevolg van een betere afbakening van breuken door de integratie van aanvullende SCAN-seismische lijnen.

### 2.4.7 Basis Onder-Germaanse Trias Groep (Basis RB)

De Basis Onder-Germaanse Trias Groep-horizon vertegenwoordigt een positief acoustic impedance contrast tussen de schalies uit het Onder-Germaanse Trias Groep en de onderliggende Zechstein-carbonaten en evaporieten. Hoewel de bijbehorende trog relatief zwak is, is de bovenliggende piek meer uitgesproken en werd deze daarom met meer zekerheid geïnterpreteerd. De horizon is aanwezig in het grootste deel van het onderzoeksgebied, behalve boven de hogen in het oosten waar erosie heeft plaatsgevonden.

De verschillen tussen de huidige en de legacy interpretaties variëren van ongeveer 600 ms dieper tot 600 ms ondieper (Figuur 2-14). Het histogram geeft aan dat de meeste verschillen binnen een bereik van ±25 ms liggen, wat wijst op een goede overeenstemming tussen de interpretaties. De veranderingen worden voornamelijk veroorzaakt door een verdieping van de horizont in het noordwestelijke deel van het studiegebied, in combinatie met een verbeterde definitie van de breuklijn als gevolg van een grotere dichtheid van seismische lijnen (Figuur 2-12).

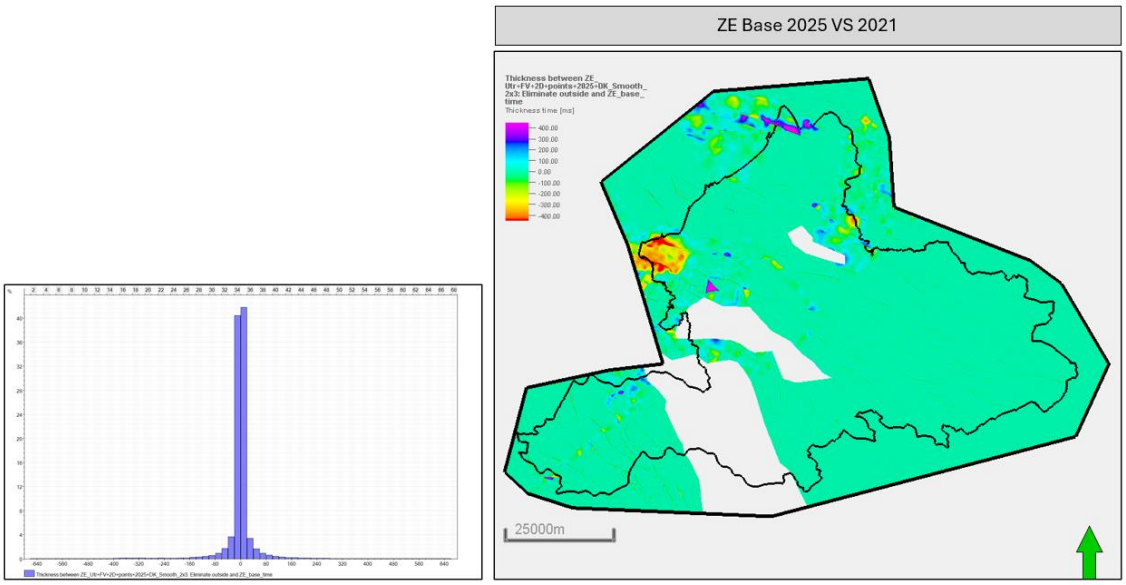



**Figuur 2-14: Basis Trias (RB). Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

### 2.4.8 Basis Zechstein (Basis ZE)

De basis van de Zechstein Group wordt gedefinieerd door een negatief acoustic impedance contrast tussen basale Zechstein-carbonaten en onderliggende Rotliegend-klastische gesteenten, wat resulteert in een piekrespons van variabele amplitude. Net als bij de Basis Onder-Germaanse Trias Groep is dit horizon afwezig in het oosten ter plaatse van hogen, waar het wordt afgesneden door de Basis Krijt-discordantie.

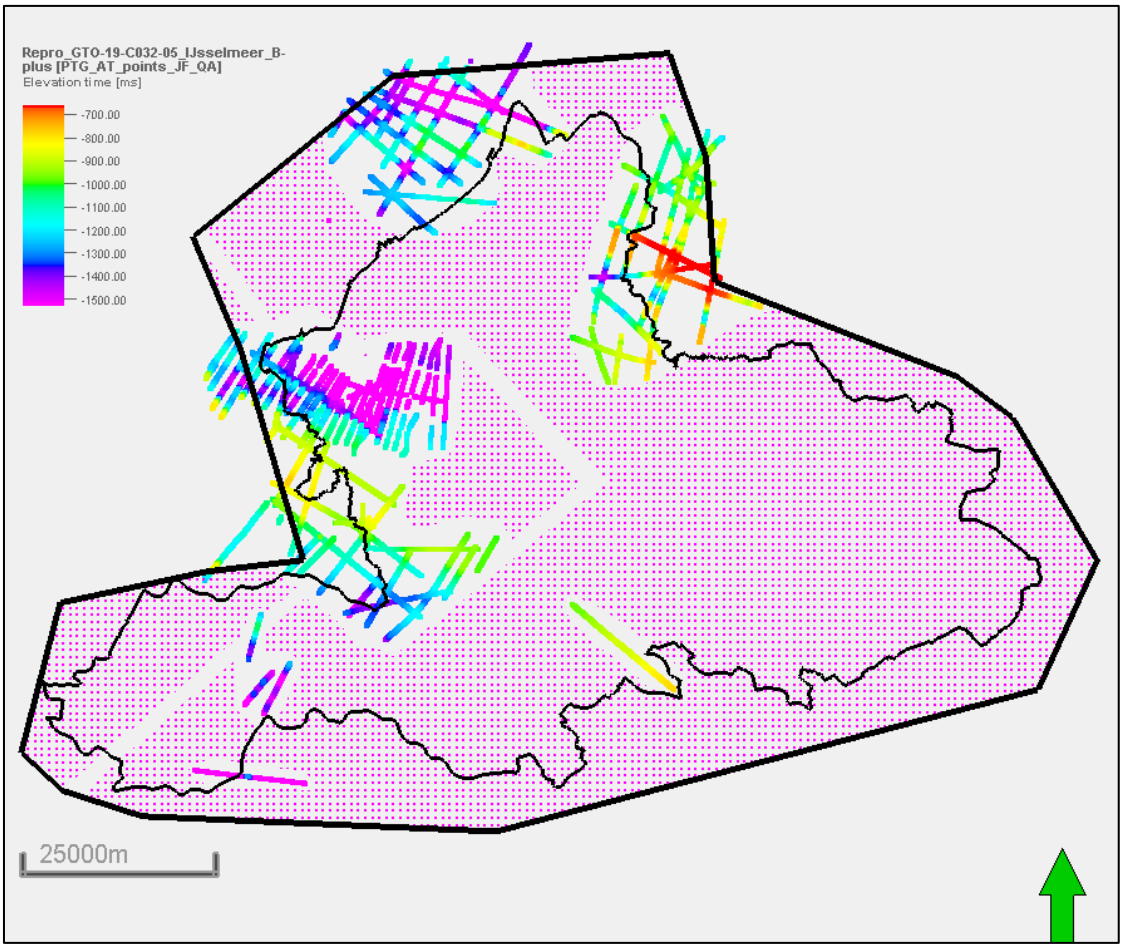
De vergelijking met legacy interpretaties wijst op variaties van ongeveer 650 ms dieper tot 650 ms ondieper (Figuur 2-15). Het histogram geeft aan dat de meeste verschillen relatief klein zijn en rond 0 ms liggen, wat suggereert dat de bijgewerkte interpretatie consistent is met het legacy model voor grote delen van het studiegebied. Grotere afwijkingen komen lokaal voor, met lokale verdieping in het noordelijke en noordoostelijke deel van het studiegebied, evenals door een verbeterde resolutie van breuken en structuren als gevolg van de integratie van aanvullende SCAN-seismische lijnen.




**Figuur 2-15: Basis Zechstein Groep (ZE). Vergelijking tussen de seismische interpretatie van 2025 en het oude raster. Warme kleuren geven gebieden aan waar de bijgewerkte interpretatie dieper is, terwijl koude kleuren gebieden aangeven waar deze ondieper is. Het histogram aan de linkerkant illustreert de verdeling van diepteverschillen (ms) over het onderzoeksgebied.**

## 2.5 Gridding Algoritme

Voor elk van de acht geïnterpreteerde horizonten werden structurele tijdkaarten gegenereerd met een gridresolutie van 50 × 50 m. Bij het proces voor gridding werden meerdere gegevens geïntegreerd om regionale consistentie te waarborgen en tegelijkertijd rekening te houden met de bijgewerkte interpretaties.




**Figuur 2-16: Gridding methode waarin interpretaties van nieuw beschikbare SCAN-seismische lijnen (gekleurde lijnen) worden geïntegreerd met bestaande structurele grids.**

De belangrijkste input voor het gridding algoritme zijn de bijgewerkte interpretaties van seismische horizonten langs nieuwe SCAN-lijnen, samen met legacy seismische lijnen waar herinterpretatie nodig was. In gebieden waar geen nieuwe seismische dekking beschikbaar was, werd de bestaande oudere interpretatie behouden om de structurele continuïteit te behouden. Deze oudere interpretaties werden omgezet in puntdatasets en opgenomen in de grids als secundaire controlepunten (Figuur 2-16). Deze gecombineerde aanpak resulterend in tijdgrids met een verbeterde resolutie en structurele details, consistent met legacy interpretaties daar geen nieuwe informatie beschikbaar is.

## 2.6 Tijd-diepte conversie

### 2.6.1 Keuze velocity model

Na een zorgvuldige evaluatie van de seismische well-ties, bestaande akoestische snelheidsgegevens en TNO-snelheidsmodellen (VelMod 3.2 en VelMod 4.0) werd besloten om een hybride aanpak te gebruiken die zowel nieuw geïnterpreteerde oppervlakken als enkele inputs van TNO's VelMod 4.0 en VelMod 3.2 omvat.

In deze methode werden de volgende formules gebruikt:

Vint=V0+kZ (Vint (m/s): momentane snelheid;

V0 (m/s): genormaliseerde snelheid aan het oppervlak MSL=0m;

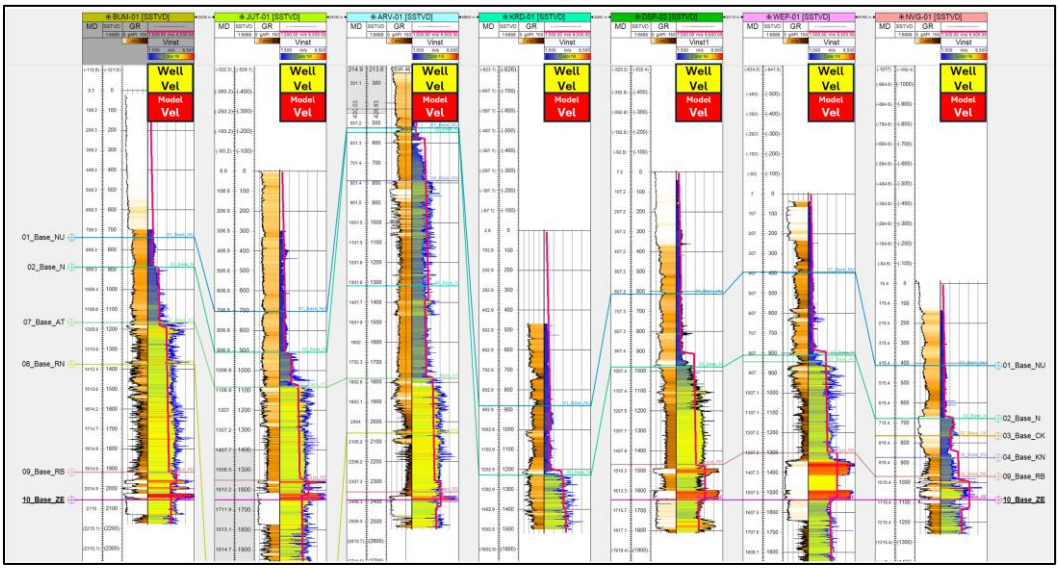
k (1/s): compaction coefficiënt, de helling van de snelheidsverandering met diepte Z (m)

Het uiteindelijke snelheidsmodel is verdeeld in acht zones (Tabel 2-2) tussen MSL=0m en de bovenkant van de Formatie van Slochteren reservoir (Top ROSL). Het model is een 'layer cake' met afzonderlijke V0- en k-waarden voor elk interval. Alle geïnterpreteerde horizonten zijn ingevoerd. Er is een werkwijze gebruikt om alle horizonten continu doorlopend te maken, d.w.z. in gebieden waar de horizon ontbreekt, is deze identiek gemaakt aan de horizont waardoor deze werd afgesneden. In dit proces zijn ook conflicten in de kartering, zoals een diepere horizon die boven een ondiepere horizon uitsteekt, verwijderd.

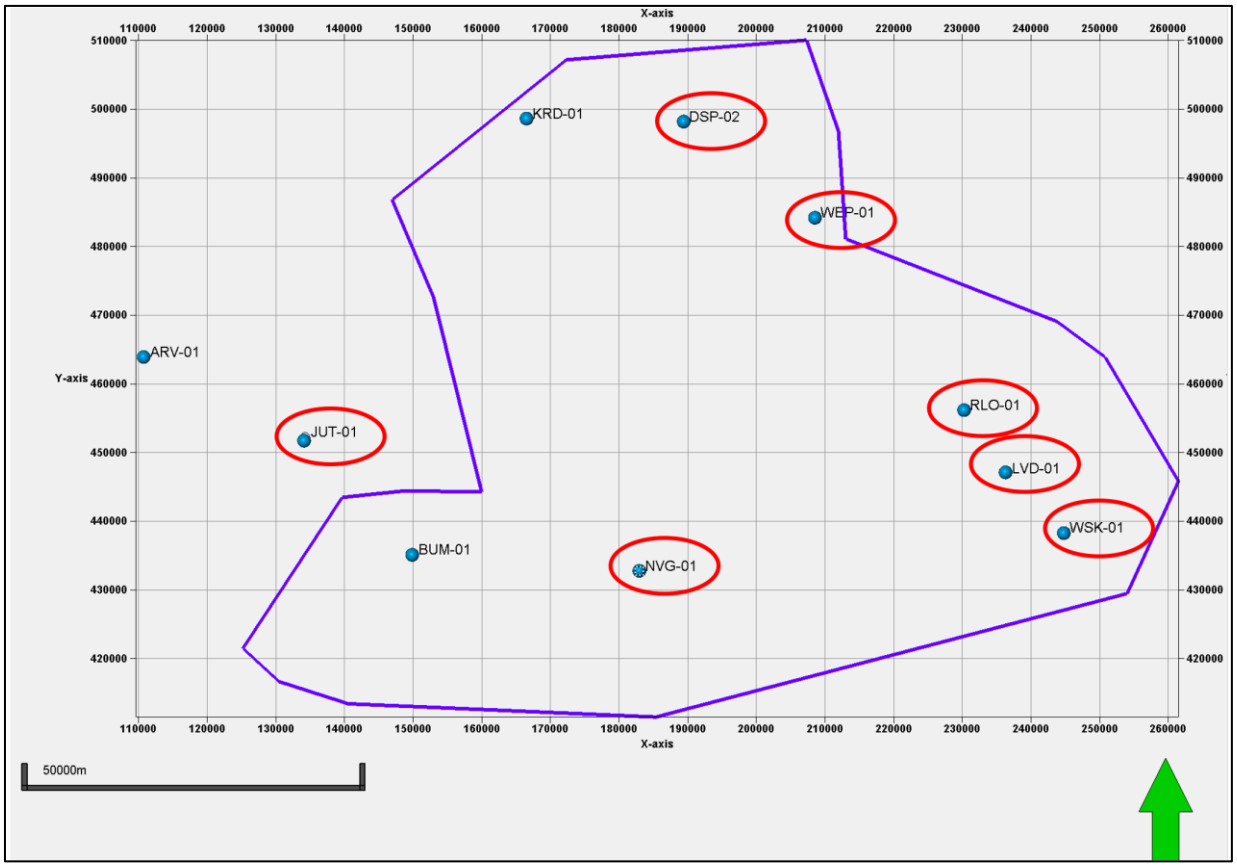
**Tabel 2-2: V0 en k voor elke zone van het snelheidsmodel.**

| Base Surface | k (1/s) | V0 (m/s) | Remarks |
|---|---|---|---|
| (Base) NU | -0.436 | 1761 | k (single value from VelMod 4)<br>V0 (single value from VelMod 4) |
| (Base) N | -0.235 | 1779 | k (single value from VelMod 4)<br>V0 (single value from VelMod 4) |
| (Base) CK | -0.889 | 2257 | k (single value from VelMod 4)<br>V0 (single value from VelMod 4) |
| (Base) KN | -0.536 | 2133 | k (single value from VelMod 4)<br>V0 (single value from VelMod 4) |
| (Base) S | -0.52 | 2557 | k (single value from VelMod 3.1)<br>V0 (single value from VelMod 3.1) |
| (Base) AT | -0.436 | 2259 | k (single value from VelMod 3.1)<br>V0 (single value from VelMod 3.1) |
| (Base) RB | -0.374 | 3046 | k (single value from VelMod 4)<br>V0 (single value from VelMod 4) |
| (Base) ZE - Top Rotliegend Slochteren | NA | 4550 | Averaged estimate from surrounding wells |

Tabel 2-2 biedt een vergelijking van de gemodelleerde snelheden (Figuur 2-17) met de werkelijke snelheden die zijn berekend op basis van verkregen sonic logs bij zeven putten (Figuur 2-18).



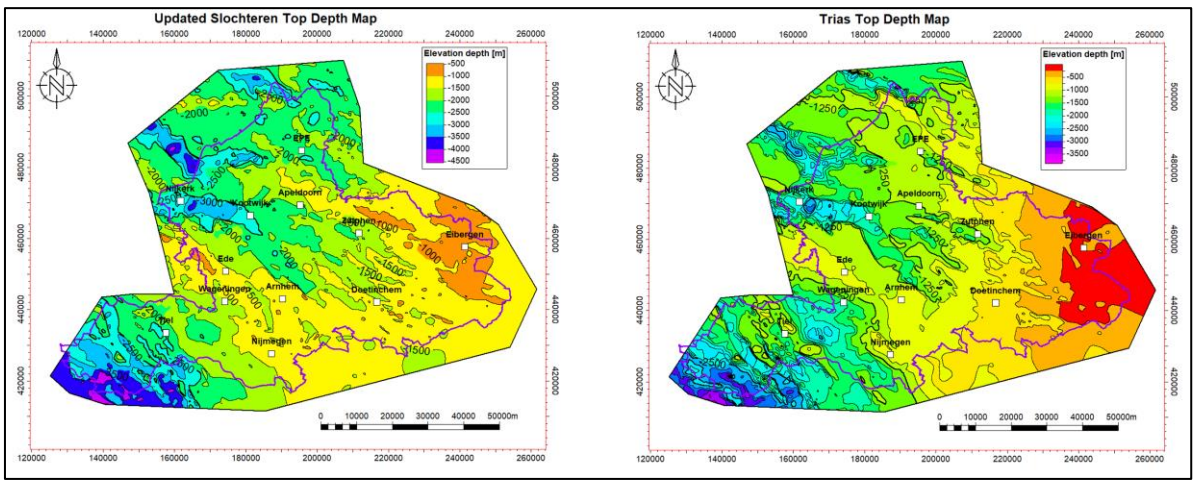

**Figuur 2-17: Vergelijking van de werkelijke acoustic putsnelheid berekend op basis van sonic logs (linker groenblauwe curve) en TNO-modelsnelheden (rode lijn). Putlogs zijn genivelleerd langs de Top Formatie van Slochteren reservoir (= Basis Zechstein Groep).**




**Figuur 2-18: Basiskaart van putten weergegeven in Figuur 2-17. De veelhoek geeft het gebied aan waarvoor snelheidsmodellering is uitgevoerd in het studiegebied van Gelderland.**

## 2.7 Dieptekaart van het Top Boven-Germaanse Trias Groep en Top Formatie van Slochteren

Kaarten met de diepte van de Top Boven-Germaanse Trias Groep (=Basis AT) en Top Formatie van Slochteren (=Basis ZE) zijn weergegeven in Figuur 2-19. De diepte van het Top Formatie van Slochteren varieert van -700 tot -3800 mMSL, terwijl het ondiepere Top Boven-Germaanse Trias Groep een dieptebereik heeft van -600 tot -3200 mMSL. De ondiepere delen van beide eenheden bevinden zich in het oosten van het studiegebied, terwijl de diepere delen zich in de westelijke helft en in een slenk in het noordoosten bevinden.

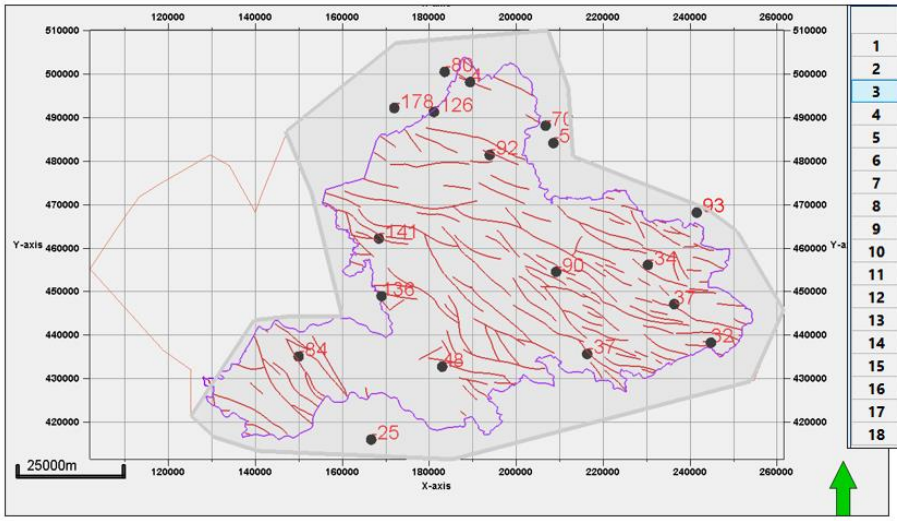



**Figuur 2-19: Kaarten van de diepte van de Top Formatie van Slochteren (Base ZE) (links) en de diepte van de Top Boven-Germaanse Trias Groep (Base AT) (rechts) binnen het studiegebied van Gelderland.**

## 2.8 Top Formatie van Slochteren dieptekaarten onzekerheden

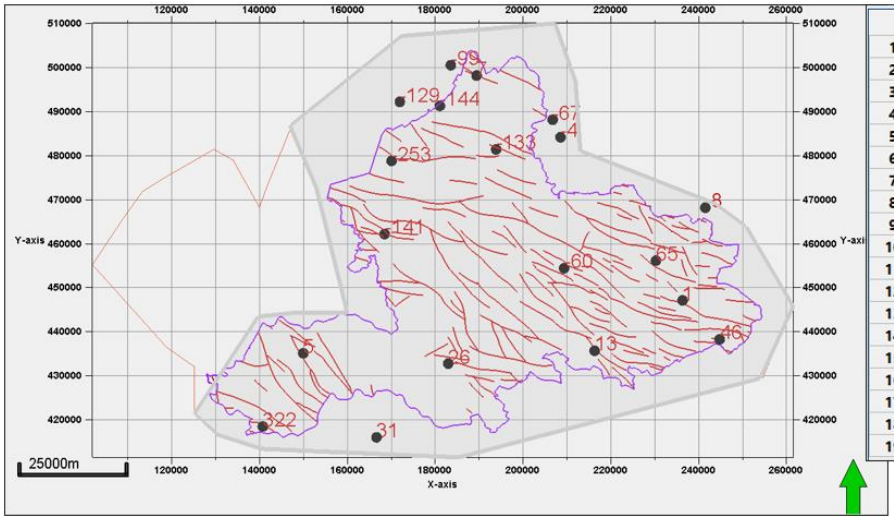
Het gebrek aan controlepunten van putten in het projectgebied van de Provincie Gelderland bemoeilijkt de kwantificering van de onzekerheid over de diepte-afwijking. Binnen het studiegebied kunnen afwijkingen in de orde van +140/-180 meter zijn voor Top Slochteren en +65/- 141 voor het Top Trias (Figuur 2-20 en Figuur 2-21). Er zijn enkele uitschieters van +/-200-320m rond breuken. Putten die nabij breukvlakken zijn geboord zijn lastig te koppelen aan seismische horizonten.

Na de diepteconversie is geen dieptecorrectie toegepast, omdat een gecorrigeerde dieptekaart alleen nodig is bij putplanning, wat buiten de scope van dit onderzoek ligt. Een onzekerheid van +/-140 m komt overeen met een temperatuuronzekerheid van +4-6 °C bij een gradiënt van 30 °C/km en is dus niet significant genoeg in deze regionale energie-evaluatie om een dieptegecorrigeerde kaart te produceren.




| | X | Y | Depth |
|---|---|---|---|
| 1 | 209146 | 454597 | -90 |
| 2 | 168376 | 462217 | -141 |
| 3 | 149938 | 435130 | -84 |
| 4 | 183541 | 500556 | -80 |
| 5 | 181044 | 491334 | -126 |
| 6 | 189375 | 498186 | 4 |
| 7 | 193869 | 481443 | -92 |
| 8 | 236304 | 447153 | 37 |
| 9 | 182939 | 432783 | 48 |
| 10 | 171932 | 492255 | -178 |
| 11 | 230257 | 456176 | -34 |
| 12 | 208524 | 484194 | -5 |
| 13 | 244776 | 438311 | 32 |
| 14 | 206745 | 488157 | -70 |
| 15 | 241491 | 468195 | -93 |
| 16 | 216292 | 435702 | -37 |
| 17 | 169009 | 449009 | 136 |
| 18 | 166630 | 416019 | -25 |

**Figuur 2-20: Basiskaart van putten met berekend diepteverschil tussen Top Rotliegend puttoppen en de overeenkomstige dieptehorizonnen na diepteconversie. De dikke blauwe veelhoek geeft het gebied aan van de snelheidsmodellering in het studiegebied van Gelderland; de dunne blauwe lijn geeft de grens van Gelderland aan; en de zwarte lijnen geven breuklocaties aan.**




| | X | Y | Depth |
|---|---|---|---|
| 1 | 230257 | 456176 | 65 |
| 2 | 241491 | 468195 | -8 |
| 3 | 236298 | 447139 | 1 |
| 4 | 244782 | 438293 | 46 |
| 5 | 182939 | 432783 | 26 |
| 6 | 208524 | 484206 | -4 |
| 7 | 189398 | 498222 | 7 |
| 8 | 206745 | 488157 | -67 |
| 9 | 193869 | 481443 | -133 |
| 10 | 181043 | 491334 | -144 |
| 11 | 149937 | 435134 | 5 |
| 12 | 171933 | 492249 | -129 |
| 13 | 183541 | 500556 | -99 |
| 14 | 209364 | 454472 | -60 |
| 15 | 170050 | 478826 | -253 |
| 16 | 140728 | 418502 | 322 |
| 17 | 168479 | 462207 | -141 |
| 18 | 216292 | 435702 | 13 |
| 19 | 166627 | 416029 | 31 |

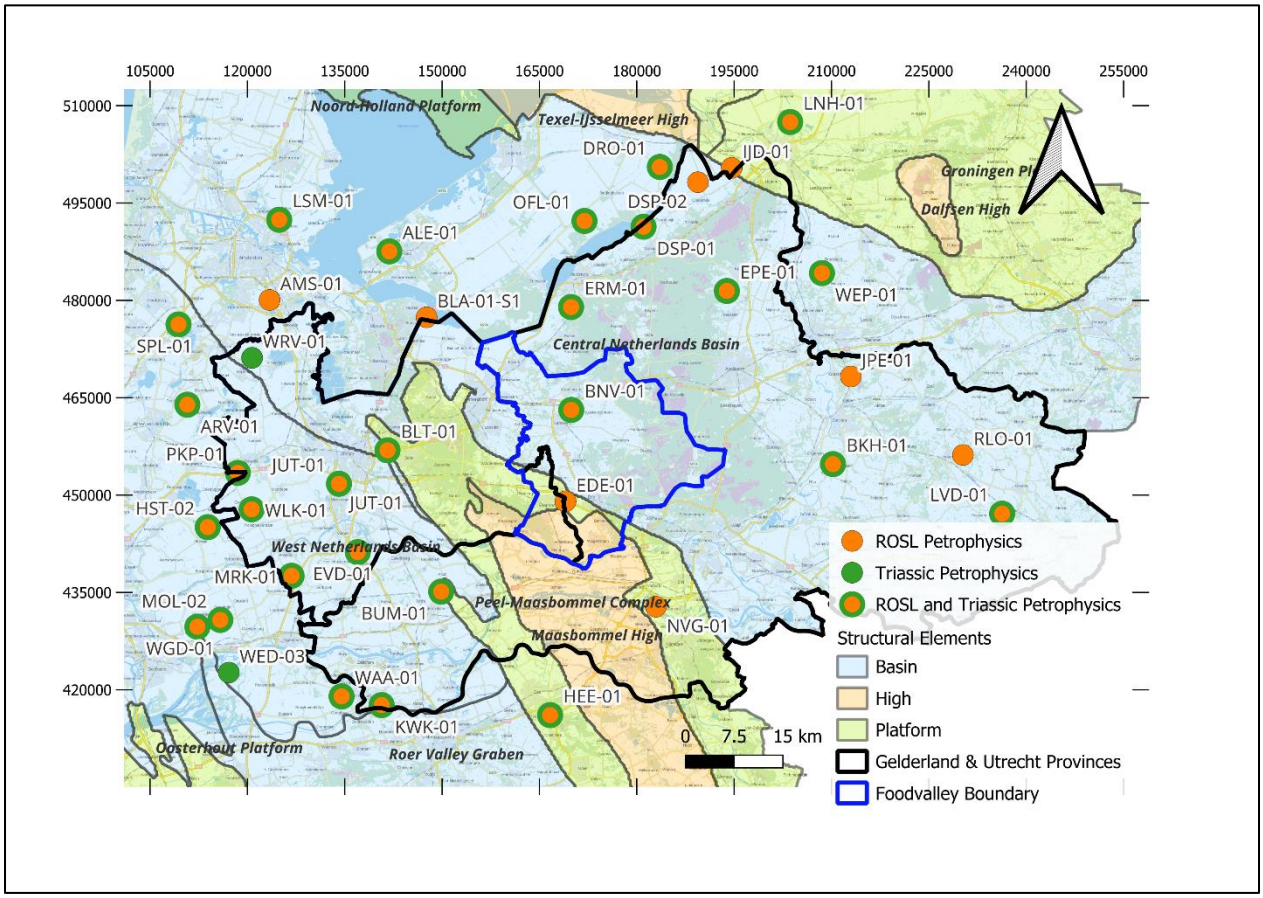
**Figuur 2-21: Basiskaart van putten met berekend diepteverschil tussen Top Trias puttoppen en de overeenkomstige dieptehorizonnen na diepteconversie.**

# 3 Onderzoek reservoirkwaliteit

## 3.1 Inleiding onderzoek reservoirkwaliteit

De putten voor dit onderzoek zijn geselecteerd op basis van de beschikbaarheid van volledige putloggegevens over de onderzochte reservoirintervallen. Van een aantal van deze putten zijn zowel log- als boorkerngegevens beschikbaar. Daarnaast zijn er putten geselecteerd net buiten het initiële studiegebied om tekorten aan data nabij de provinciegrenzen te voorkomen. De geselecteerde putten liggen verspreid over drie structurele eenheden binnen de provincies Gelderland en Utrecht: (1) het West Nederland Bekken (WNB), (2) het Peel-Maasbommel Complex (PMC) en (3) het Centraal Nederland Bekken (CNB). De onderzochte putten zijn weergegeven in Figuur 3-1.

Putten die zijn gebruikt in de voorgaande studies die PanTerra in 2020 en 2021 heeft uitgevoerd voor de provincies Utrecht en Gelderland [ (Panterra Geoconsultants BV, 2021), (Panterra Geoconsultants BV, 2022)] zijn in dit onderzoek opgenomen. De reservoirkenmerken (zie paragraaf 3.4) zijn gebaseerd op PanTerra's petrofysische boorgatmetingen en kernevaluatie van alle putten.




**Figuur 3-1: Kaart met provinciegrenzen, de Regio Foodvalley, structurele elementen en de onderzochte putten. De put-symbolen geven de aanwezigheid aan van de primaire reservoirs die zijn geanalyseerd voor de vermogenskaarten: reservoirs binnen de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen en de Formatie van Slochteren.**

## 3.2 Voorbereiding en kwaliteitscontrole (QC) op beschikbare data

In totaal zijn 44 putten in dit onderzoek meegenomen, waarbij de resultaten van eerdere studies zijn gecombineerd met analyses van aanvullende legacy putten en recent geboorde EBN SCAN-putten. De meeste putten zijn oude olie- en gasexploratieputten die in de loop van tientallen jaren zijn geboord. De digitale gegevens hiervoor zijn afkomstig uit de openbare database Nederlandse Olie-en Gasportaal (NLOG). De geselecteerde putten bieden een ruimtelijke en stratigrafische dekking van het onderzoeksgebied, hoewel niet alle putten alle relevante reservoirunits aangeboord hebben.

Digitale boorgatmetingen werden geladen en geanalyseerd in de Interactive Petrophysics ("IP") software. De QC omvatte het selecteren van curven op basis van een vergelijking van signalen uit verschillende vintages (wireline logs, herhaalde runs, enz.) en een vergelijking van samengestelde LAS-bestand met de originele LAS, indien beschikbaar. Alle putten hebben GammaRay (GR)-, dichtheids-, weerstands- en akoestische metingen over de relevante secties. Individuele log metingen werden waar nodig op diepte afgestemd en aan elkaar gekoppeld om continue datasets over de put te verkrijgen.

De logs werden bewerkt om ongeldige gegevens op verbuizingpunten te verwijderen, duidelijk foutieve gegevens te verwijderen en kleine hiaten werden opgevuld door lineaire interpolatie. Er werd geen lognormalisatie uitgevoerd en er werden geen aanvullende omgevingscorrecties toegepast, behalve die welke al door de bedrijven die de putlog metingen doen op de ruwe gegevens waren uitgevoerd.

## 3.3 Evaluatie van putloggegevens

De petrofysische analyse maakt gebruik van een standaard deterministische benadering voor kleiachtig zandige reservoirs, zoals geïmplementeerd in IP in het kleivolume (Vcl) - en PhiSw-modules (Porositeit-Watersaturatie). De invoerparameters werden per put ingesteld, waarbij gebruik werd gemaakt van boorkerngegevens waar deze beschikbaar waren. De parameters werden waar nodig ingedeeld in zones aan de hand van stratigrafische grenzen. Intervallen met slechte boorgaten werden geïdentificeerd met behulp van de caliper- en bulkdichtheidscorrectiecurves met in elke put ingestelde drempelwaarden. Evaporieten (Zechstein) en steenkool (Carboon) werden geïdentificeerd met behulp van verwerkingsindicatoren op basis van putlogsignalen en drempelwaarden; er werden geen complexe volumetrische mineralogische analyses uitgevoerd. De gebruikte methode en techniek bepaalt eerst de klei- of schalievolumes, die vervolgens worden gebruikt als input voor de gecombineerde porositeits-watersaturatie module, die iteratief de effectieve porositeit en watersaturatie berekent.

### 3.3.1 Modellering van kleigehalte

Het kleigehalte werd eerst gemodelleerd in het schaliedomein (VSH) voordat het werd omgezet naar het kleimineraaldomein (VCL). Dit heeft als voordeel dat de 100% schalie-eindpunten rechtstreeks uit de putlogresponses kunnen worden gekozen, terwijl het klei-eindpunt bij VCL=100% zich altijd buiten het data-bereik bevindt (aangezien gesteenten die volledig uit kleimineralen bestaan in de natuur niet voorkomen). In deze studie wordt aangenomen dat standaard schalie gesteente gemiddeld ongeveer 70% kleimineralen bevat: VCL = VSH * 0,7 [vol.frac].

De kalibratie van VSH werd iteratief uitgevoerd met behulp van meerdere klei-indicatoren op basis van de beschikbaarheid van putloggegevens, voornamelijk de gamma ray (VSH_GR) en de neutronen-dichtheidsmethoden (VSH_ND). Overschatting van het kleigehalte wordt voorkomen door de minimale VSH-curve te bepalen voor verdere petrofysische verwerking: VSH = MIN [VSH_ND, VSH_GR]. De

verwerking van het schalievolume werd beperkt tot VSH_GR in secties waar neutronen-dichtheidslogboeken ontbreken of waar VSH_ND ernstig wordt beïnvloed door uitspoelingen.

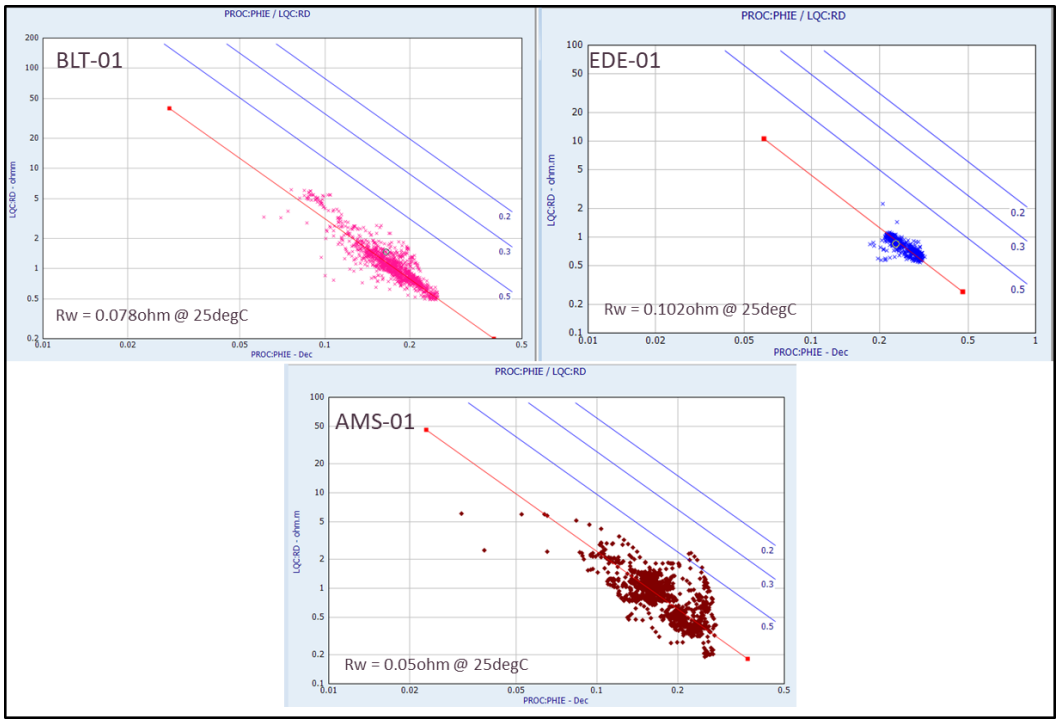
### 3.3.2 Porositeit & Water Saturatie

Porositeit en watersaturatie, formatie-eigenschappen die onderling afhankelijk zijn van elkaar, in IP bepaald. Porositeit werd berekend met behulp van de dichtheids-, neutronen dichtheids- en akoestische methoden, waarbij de vereiste putloggegevens beschikbaar waren. De gebruikte matrixparameters zijn standaardwaarden uit de industrie voor kwarts of carbonaten, al naargelang het geval. De kleiparameters werden gekoppeld aan het gekalibreerde VSH-model (neutron, dichtheid), terwijl de akoestische traagheid van klei per put werd gekalibreerd. De aanpak die in elke put wordt gebruikt, is afhankelijk van de beschikbare gegevens van de put, maar omvat over het algemeen (i) iteratieve convergentie van porositeitscurves van verschillende berekeningsmethoden met minimale afwijking van standaard invoerparameters, en (ii) afstemming op boorkerngegevens (indien beschikbaar). Daarom leveren de verschillende porositeitsmethoden vergelijkbare resultaten op binnen de grenzen die worden bepaald door onzekerheden in het model en natuurlijke variatie van invoerparameters. Porositeit afgeleid van akoestische putlogmetingen komen over het algemeen beter overeen met de resultaten van andere porositeitsmethoden die gebruikmaken van het Raymer-Hunt-Gardner-model in plaats van Wyllie methode. De porositeit van de neutron-dichtheidsmethode kreeg over het algemeen de voorkeur als uiteindelijke porositeit, omdat deze rekening houdt met de mogelijke aanwezigheid van calcietcement. De invoerparameters worden beperkt via het klei-model en deze methode compenseert voor gaseffecten. Intervallen met slechte boorgaten, zoals uitspoelingen of rugositeit, werden onderscheiden met behulp van een combinatie van caliper- en dichtheidscorrectie (delta-rho) limieten. In intervallen met slechte boorgaten werd de porositeitsberekening beperkt tot het minimum van akoestische en andere methoden (dichtheid, dichtheid/neutron) als zijnde het minst beïnvloed door onregelmatigheden in het boorgat.

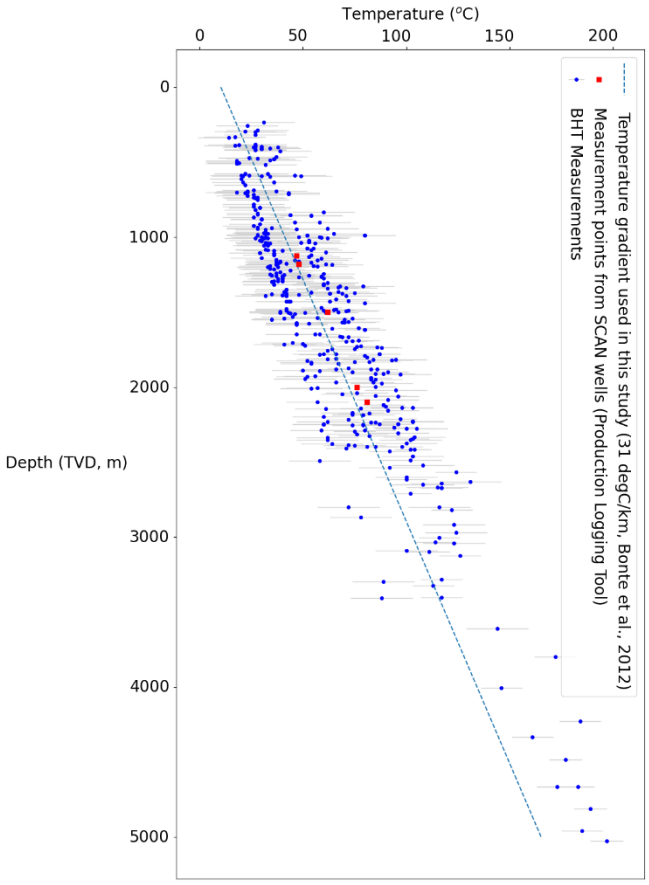
De meeste putten in het onderzoeksgebied zijn vanuit het oogpunt van olie-exploratie ‘droge putten’. Niettemin worden alle porositeitscurves gecorrigeerd voor de eigenschappen van de poriënvloeistof (water, koolwaterstoffen) door gelijktijdige verwerking van weerstandslogs in het Archie-type watersaturatiemodel. Primaire vergelijkingen worden toegepast in het effectieve porositeitsdomein (PHIE) in IP. De totale porositeit (PHIT) is een secundaire uitkomst die wordt berekend als PHIE plus de poriënfractie van klei-gebonden water of ‘kleiporositeit’, een parameter die wordt bepaald door de aanname van droge klei-eigenschappen die binnen standaardbereiken kunnen variëren (Deer, Howie, & Zusmann, 2013) (Schlumberger, 2009) als er geen geschikte Röntgenstraaldiffractie (XRD)-gegevens voor de kleifractie beschikbaar zijn. De cementatie- (m) en verzadigingsexponenten (n) werden verondersteld 2,0 te zijn, de tortuositeitsfactor (a) is ingesteld op 1,0; deze liggen allemaal binnen het bereik van de industriestandaardwaarden voor zandsteenreservoirs.

De in-situ weerstand van het formatiewater (Rw) werd op basis van het zoutgehalte geschat met behulp van de door ThermoGIS afgeleide formule 70000/1500*TVDss, waarbij TVDss de gemiddelde reservoirdiepte is. Deze waarden werden waar mogelijk geverifieerd door middel van Pickett-plotanalyses in schone zandsteenintervallen in de putten. In de drie SCAN-putten werd het zoutgehalte van het formatiewater ook bevestigd door middel van watermonsteranalyses uit puttests. Voorbeelden van Pickett-plots voor de Slochteren (ROSL)-formatie in de drie SCAN-putten BLT-01, EDE-01 en AMS-01 zijn weergegeven in Figuur 3-2. De door Pickett afgeleide weerstanden (zoutgehaltes) komen overeen met de beschikbare resultaten uit watermonsteranalyses in deze putten: Rw's van 0,05, 0,104 en 0,08 ohm bij 25 °C, gerapporteerd op basis van monsteranalyses in respectievelijk AMS-01, EDE-01 en BLT-01.

Een geothermische gradiënt van 31 °C/km met een oppervlaktetemperatuur van 10 °C werd gebruikt om de formatietemperaturen te bepalen. Deze trend komt overeen met de temperatuurgradiënt die werd verkregen in de Gelderland 2021-studie op dieptes < 2500 m en is vergelijkbaar met die welke werd vastgesteld voor de regionale dataset in Bonte et al. (2012). Statische reservoirtemperaturen van 81 °C, 69 °C en 47,5 °C werden gerapporteerd op basis van boorputtestgegevens in de ROSL in SCAN-putten AMS-01, BLT-01 en EDE-01, die gunstig uitkomen in vergelijking met de overeenkomstige schattingen van 75 °C, 77 °C en 47 °C op basis van de temperatuur/diepte-trend die in de drie putten is gebruikt. De geothermische gradiënt die in deze studie is gebruikt (31 °C/km ), met putbodemtemperatuur (BHT)-metingen uit de provincies Utrecht en Gelderland en SCAN-boorgatgegevens, is weergegeven in Figuur 3-3.




**Figuur 3-2: Voorbeeld van Pickett-plot voor de Formatie van Slochteren in SCAN-putten BLT-01, EDE-01 en AMS-01, met een schatting van de in situ-weerstanden van formatiewater omgerekend naar standaardtemperatuur (25 °C).**




**Figuur 3-3: Vergelijking van de temperatuur-diepte trend op basis van NLOG-bodemtemperaturen (Gelderland en Utrecht) en SCAN-putgegevens. Een gradiënt van 31 °C/km is weergegeven, met BHT-metingen in het blauw en SCAN-data in het rood. De onzekerheid van de BHT-metingen in het blauw en SCAN-data in het rood. De onzekerheid van de BHT-metingen is 10 tot 15 °C (grijze foutbalken). De SCAN-gegevens tonen hogere temperaturen dan de nationale trend.**

### 3.3.3 Netto dikte van het Reservoir

Er zijn grenswaarden nodig om reservoirintervallen af te bakenen, zodat de gemiddelde reservoirkenmerken per formatie kunnen worden berekend, waaronder porositeit en permeabiliteit, terwijl niet-reservoirgesteenten worden uitgesloten. Over het algemeen worden evaluatieresultaten zoals kleivolume en/of porositeit gebruikt en worden alleen gemiddelden van resultaten per stratigrafische eenheid genomen wanneer de petrofysische resultaten aan de grenswaarden voldoen. Door op deze manier gemiddelden te berekenen, kunnen putten met elkaar worden vergeleken en worden inputlaagkenmerken verkregen voor reservoirmodellering en het in kaart brengen van de reservoir eigenschappen.

Voor geothermische studies kunnen twee sets grenswaarden-criteria worden gedefinieerd: (i) lithologische grenswaarden, zoals een bovengrens Vshale-grenswaarde (≤) van 50% (d.w.z. ≤35% kleimineralen, zie paragraaf 3.3.1), en (ii) het gebruik van een aanvullende ondergrens (≥) voor permeabiliteit of porositeit om reservoirs van betere kwaliteit te identificeren. De eerste biedt gemiddelde waarden voor het zandrijke deel van het reservoir, terwijl de tweede de eigenschappen identificeert en gemiddeld berekent voor zanden met het grootste opslag- en stromingspotentieel.

Een Vshale-grenswaarde verlaagt doorgaans de waarde voor netto-bruto (N/G) verhouding van de meeste (elke ) stratigrafische eenheid tot onder één, aangezien geen enkele eenheid volledig uit schoon zand bestaat.

Het toepassen van een Vshale-grenswaarde resulteert vaak in een verlaging van de netto-bruto (N/G) verhouding binnen een stratigrafische eenheid. Hoewel specifieke intervallen volledig uit schoon zand kunnen bestaan, bevatten de meeste eenheden op reservoir-schaal subtiele variaties in kleigehalte, waardoor de gemiddelde N/G-waarde bij een strikte grenswaarde meestal net onder de 1.0 uitkomt. Een extra porositeits- of permeabiliteitsgrenswaarde verlaagt de N/G-waarde nog verder en kan aanzienlijke zandintervallen of zelfs hele reservoirpakketten elimineren. Een dergelijke grenswaarde heeft ook tot gevolg dat de gemiddelde porositeit in de resterende netto-intervallen toeneemt, aangezien slechtere gesteenten worden uitgesloten. Daarom werd in deze studie alleen een Vshale-cut-off toegepast, samen met discriminatoren om niet-reservoir evaporiet- en steenkoolintervallen (die doorgaans lage Vshale-waarden hebben) te elimineren. Petrofysische gemiddelden zijn per laag weergegeven in tabellen in paragraaf 3.7.

## 3.4 Modellering permeabiliteit

De stromingseigenschappen van een reservoirlaag zijn van cruciaal belang voor het beoordelen van het geothermische potentieel ervan, naast de opslagcapaciteit op basis van porositeit en dikte. Deze laatste kan rechtstreeks worden verkregen uit putloganalyses, maar voor het voorspellen van de permeabiliteit is kalibratie met de beschikbare boorkerngegevens nodig.

Regionale boorkerngegevens zijn afkomstig uit het Nederlandse Olie-en Gasportaal (NLOG) database voor geboorde putten in het onderzoeksgebied. De putten zijn geselecteerd om zowel geografische als stratigrafische dekking van de te onderzoeken reservoirs te bieden.

De verzamelde boorkerngegevens van NLOG zijn van verschillende ouderdom en zijn meestal beperkt tot metingen die onder oppervlakte-omstandigheden (atmosferische druk) zijn uitgevoerd. Informatie over de voorbereiding van monsters of experimentele omstandigheden is beperkt voor deze gegevens; er is uitgegaan van standaard laboratoriumpraktijken. De resultaten van boorkern analyses van recente SCAN-putten zijn opgenomen voor zover deze beschikbaar waren. Hoewel deze gegevens beperkt zijn tot slechts drie putten in het gebied, zijn ze het meest betrouwbaar en omvatten ze zowel metingen onder spanning als permeabiliteit van vloeistoffen. De putten en stratigrafische eenheden die zijn onderzocht, staan vermeld in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Putten met boorkernmonsters die de stratigrafische dekking in elke put weergeven

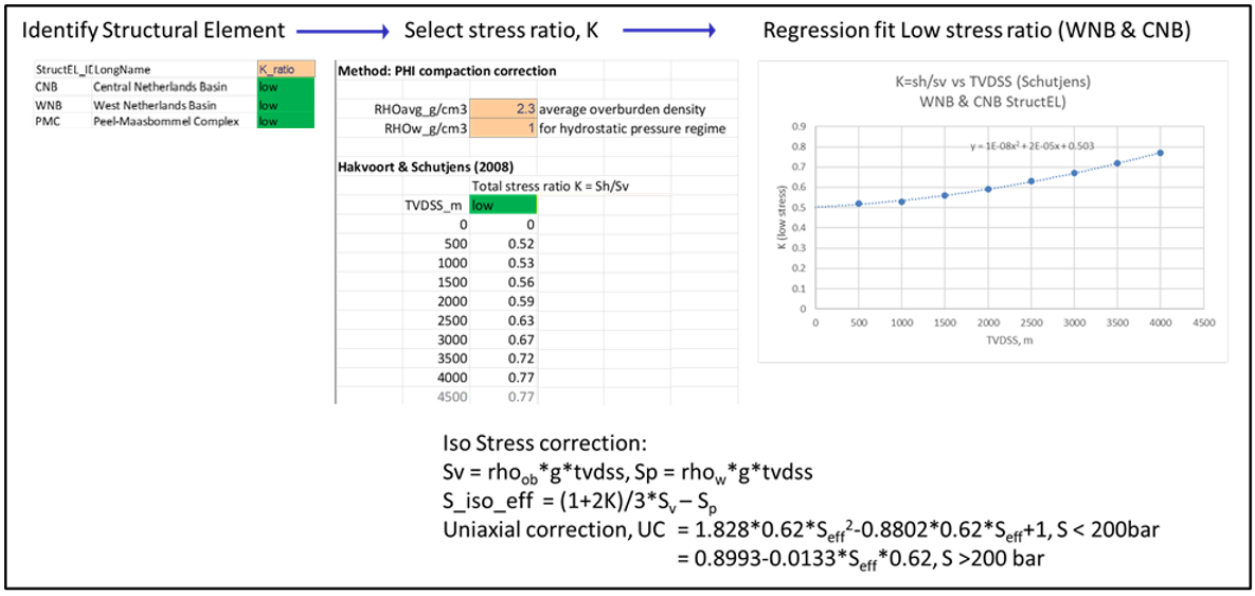
| WELL | KN | RNROF | RBM | ZE | ROSL | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AMS-01 | | | X | | X | |
| BLT-01 | X | X | X | | X | KN = Holland Fm |
| EDE-01 | X | | | | X | KN = Vlieland Fm |
| HEE-01 | | | X | | | |
| BLA-01-S1 | | | | | X | |
| BUM-01 | | | X | X | | |
| DRO-01 | | | | | X | |
| LNH-01 | | | | | X | |
| DSP-01 | | | | | X | |
| ERM-01-S1 | | | | | X | |
| EVD-01 | | | | | X | |
| HST-02-S1 | | | X | | X | |
| IJD-01 | | | | | X | |
| JUT-01 | | X | | | X | |
| KWK-01 | | X | X | | | No permeability data |
| LSM-01 | | | | | X | |
| LVD-01 | | | | X | | |
| MRK-01 | | X | | | | |
| OTL-01 | | X | X | | | |
| PKP-01 | | X | X | | | |
| WED-02 | | X | | | | |
| WEP-01 | | | | | X | |
| WGD-01 | | X | | | | |
| WLK-01 | | X | | | | |
| WYH-01 | | | | | X | |

### 3.4.1 Kernporositeit

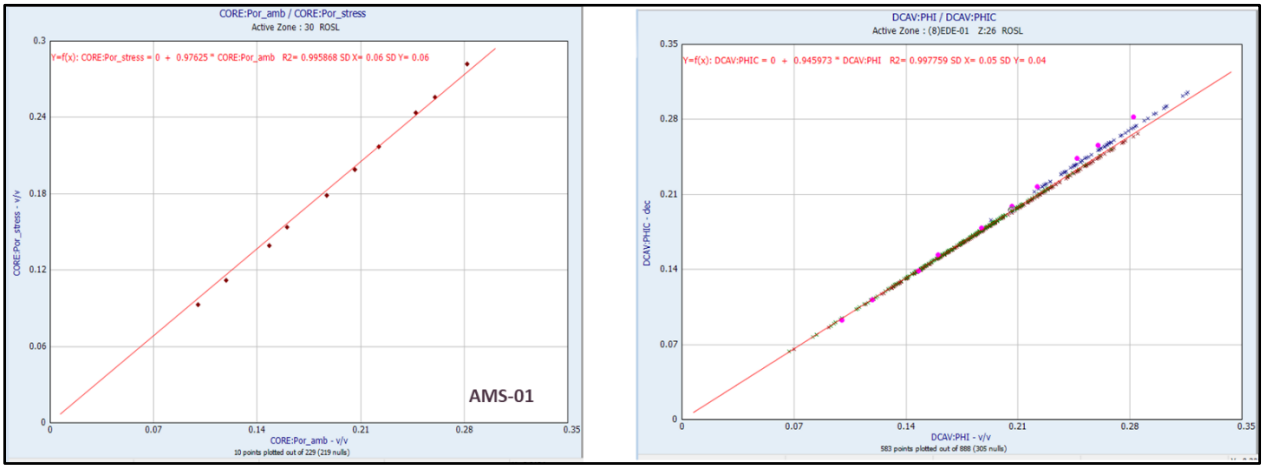
Heliumporositeiten in routinematig boorkernanalyses (RCA) worden doorgaans gemeten onder bijna-atmosferische spanningsomstandigheden en moeten worden gecorrigeerd voor in-situ spanningen. Er werden dus overbelastingscorrecties door bovenliggende gesteente pakketten toegepast op de ruwe porositeitsgegevens van de boorkernen die uit NLOG werden gehaald, met behulp van de door Hakvoort en Schutjens voorgestelde methode (Hakvoort, 2006). De gebruikte porositeitscorrectiemethode wordt geïllustreerd in Figuur 3-4.

In SCAN-put AMS-01 werden porositeiten voor zowel de in-situ- als de onder druk staande boorkern gemeten, dit geeft validatie voor de hierboven beschreven benadering. Door de gemeten gegevens van AMS-01 tegen elkaar uit te zetten in een plot diagram, wordt een correctiefactor van 0,976 gevonden. Dezelfde gemeten gegevens voor AMS-01 worden vervolgens uitgezet met de boorkern porositeit die met behulp van Hakvoort zijn gecorrigeerd voor spanning in de putten AMS-01, BLT-01 en EDE-01. De regressieaanpassing aan deze gegevens levert een correctiefactor van 0,95 op, wat redelijk overeenkomt met de gemeten waarde voor AMS-01, vooral voor porositeit onder 21%. Dit wordt weergegeven in Figuur 3-5. De meer algemene benadering heeft de voorkeur om de oude gegevens te corrigeren, aangezien de isostatische in-situ spanning wordt berekend met behulp van TVDss in elke put, terwijl de door AMS-01

gemeten porositeitsgegevens betrekking hebben op een enkele bovenlaagspanning “druk van de bovenliggende lagen” die relevant is voor die put.




**Figuur 3-4: Illustratie van de stresscorrectiemethode die wordt gebruikt om gemeten ambient porositeiten te corrigeren naar in-situ stressomstandigheden (naar Hakvoort & Schutjens). Stressregime per structurele eenheid aan de linkerkant, schatting van de stressverhouding en regressie versus TVDss, wat resulteert in een correctiefactor voor gemeten porositeit.**



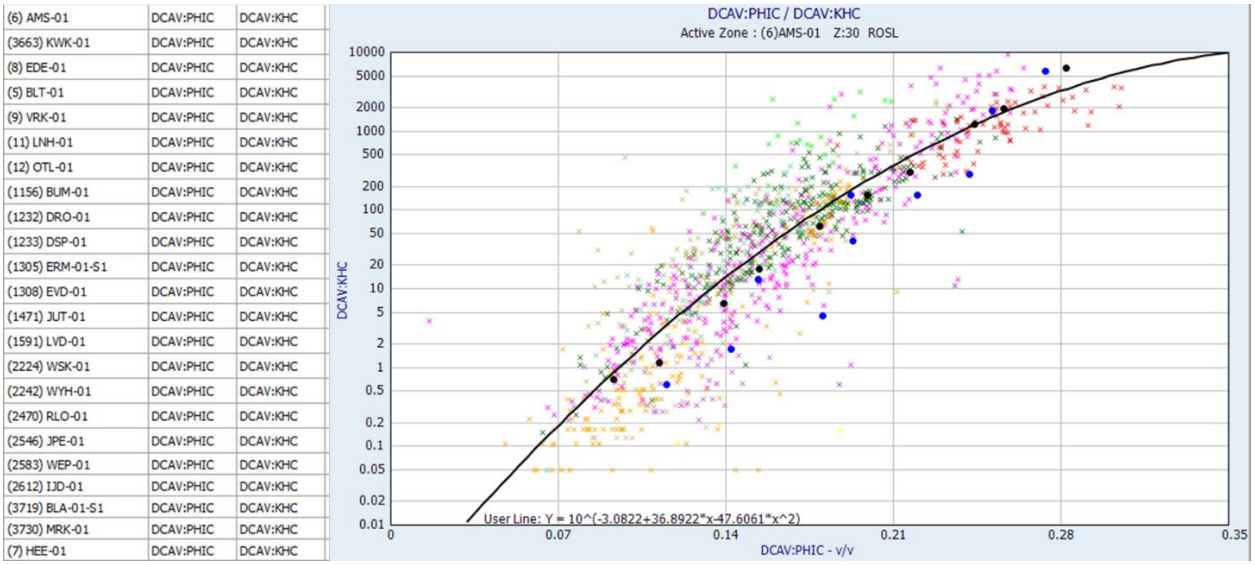

**Figuur 3-5: Kruisdiagrammen die (a) gemeten spanning versus ambientporositeit in boorput AMS-01 weergeven met regressieaanpassingscorrectiefactor en (b) spanningsgecorrigeerde versus omgevingsporositeit in boorputten AMS-01, BLT-01 en EDE-01 weergeven met behulp van de Hakvoort-methodologie in combinatie met gemeten gegevens uit AMS-01. Regressieaanpassing levert een correctiefactor van 0,95 op.**

Wanneer bij de voorbereiding van boorkernen gebruik wordt gemaakt van conventionele (hete) ovendroging, wat gebruikelijk is bij routineanalyses, hebben de resulterende gegevens betrekking op een systeem met totale porositeit. In de schone reservoirs die doorgaans worden gebruikt voor geothermie maakt dit weinig verschil, aangezien de totale en effectieve porositeit hetzelfde zijn bij afwezigheid van klei, maar het wordt wel relevant in meer kleihoudende intervallen.

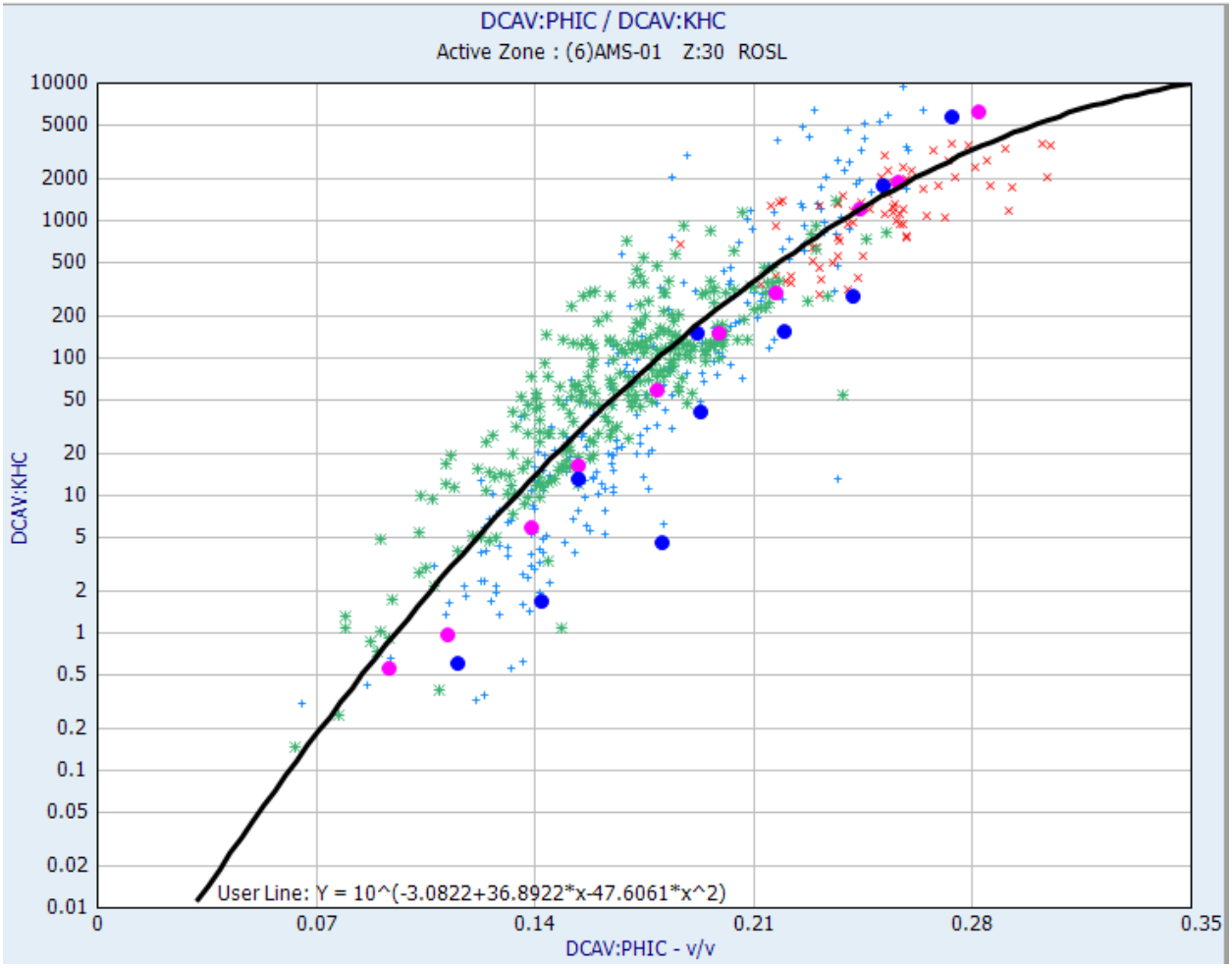
### 3.4.2 Permeabiliteit boorkern

De gaspermeabiliteit gemeten routine kernanalyse, die zijn gemeten bij oppervlaktecondities (~1 ATM druk), werden gecorrigeerd voor spanning met de relatie van Juhasz (Juhasz, 1986), afgeleid op basis van boorkerngegevens uit de Noordzee. Hiermee werd de in-situ Klinkenberg-doorlatendheid voorspeld op basis van omgevingscondities. Gaspermeabiliteit gemeten onder spanning uit de recente AMS-01 SCAN-put werd gebruikt om de geldigheid te bevestigen. Kruisdiagrammen van spanning gecorrigeerde luchtpermeabiliteit tegen porositeit in de Formatie van Slochteren (ROSL) voor alle kernputten, met de AMS-01-meetgegevens bij spanning daaroverheen, en de drie SCAN-putten (AMS-01, BLT-01 en EDE-01) worden respectievelijk weergegeven in Figuur 3-6 en Figuur 3-7. Uit een vergelijking van de beschikbare gemeten stressgegevens met gecorrigeerde omgevingscondities blijkt dat de gebruikte correcties redelijk goed zijn.

Deze gecorrigeerde gegevens zijn vervolgens gebruikt om porositeit-permeabiliteitsrelaties voor elke reservoir laag af te leiden.




**Figuur 3-6: Overburden gecorrigeerde kern gaspermeabiliteit (KHC) vergeleken met overburden gecorrigeerde boorkernporositeit (PHIC) in ROSL voor drie SCAN-putten: AMS-01 (blauw kruis), BLT-01 (groen kruis) en EDE-01 (rode x). Ook weergegeven zijn de gemeten permeabiliteit voor gas onder spanning (magenta stip) en voor brijn onder spanning (blauwe stip) versus porositeit onder spanning van put AMS-01. Over de gegevens heen (zwarte lijn) is de poro-perm regressiefunctie (alle boorkernputten) weergegeven die is afgeleid voor de ROSL.**




**Figuur 3-7: Voor overburden gecorrigeerde kern gas permeabiliteit (KHC) tegenover overburden gecorrigeerde boorkernporositeit (PHIC) in ROSL voor drie SCAN-putten: AMS-01 (blauw kruis), BLT-01 (groen kruis) & EDE-01 (rode x). Daarnaast worden de gemeten permeabiliteit voor gas onder spanning (magenta stip) en voor brijn onder spanning (blauwe stip) weergegeven ten opzichte van de porositeit onder spanning van put AMS-01. Over de gegevens heen (zwarte lijn) is de poro-perm regressiefunctie (alle boorkernputten) weergegeven die voor de ROSL is afgeleid.**

### 3.4.3 Permeabiliteit transformaties op basis van putdata

Om de permeabiliteit te berekenen van de porositeit is een regressieanalyse uitgevoerd. Hierbij zijn pluggegevens gecorrigeerd voor druk voor de onderzochte doelreservoirs. Deze transformaties zijn vervolgens toegepast op de uit de logs afgeleide porositeit. De gebruikte transformaties worden hieronder toegelicht.

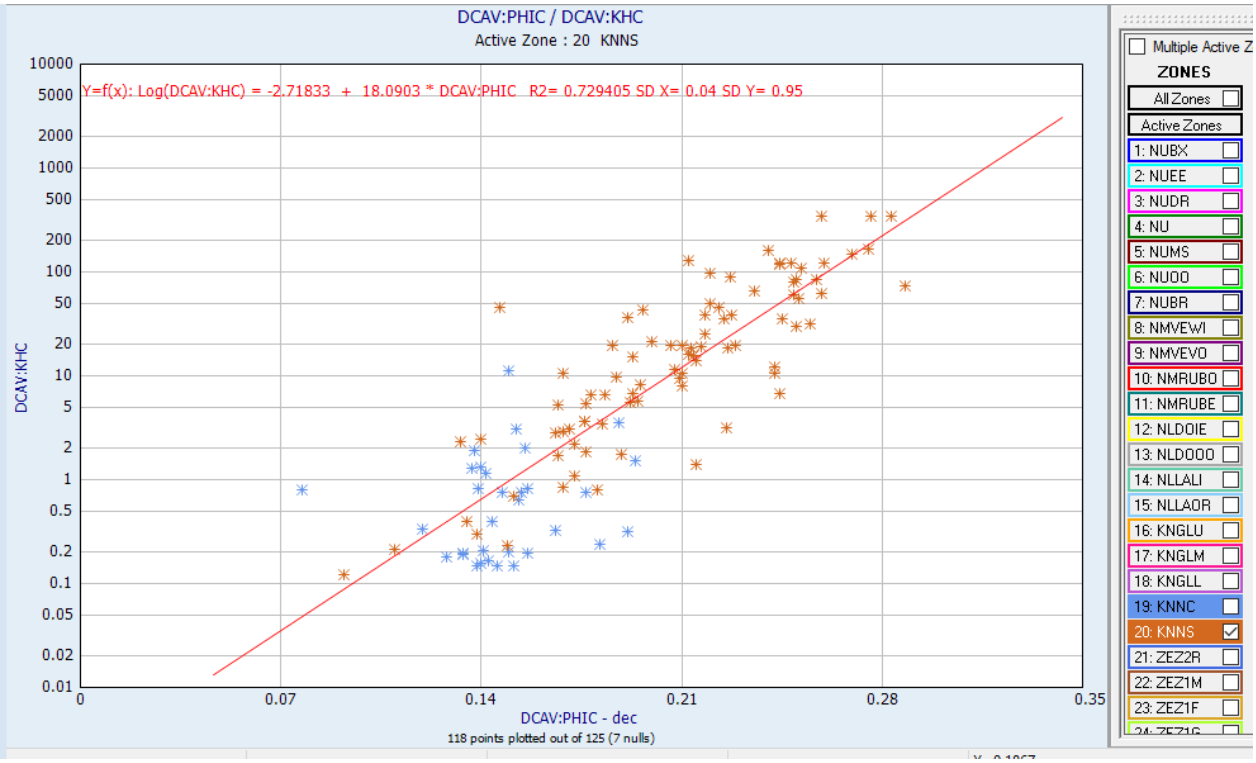
***Vlieland Zandsteen Formatie, Rijnland Groep (KNNS)***

Er werd een poro-perm-trend vastgesteld aan de hand van de boorkerngegevens onder oppervlakte-omstandigheden van de SCAN-put EDE-01. De gegevens werden eerst gecorrigeerd voor de druk van de bovenliggendelagen met behulp van de hierboven beschreven methodologie voor legacy boorkerngegevens. Vervolgens werd de regressieanalyse uitgevoerd. De resulterende transformatie is:

KHC = 10^( -2.71832774 + 18.0902704 * POR)

Waarbij KHC in mD is en POR in v/v eenheid.

De regressie wordt weergegeven in Figuur 3-8. Merk hierbij op dat de regressie is uitgevoerd met behulp van gegevens van zowel KNNC- als KNNS-formaties.



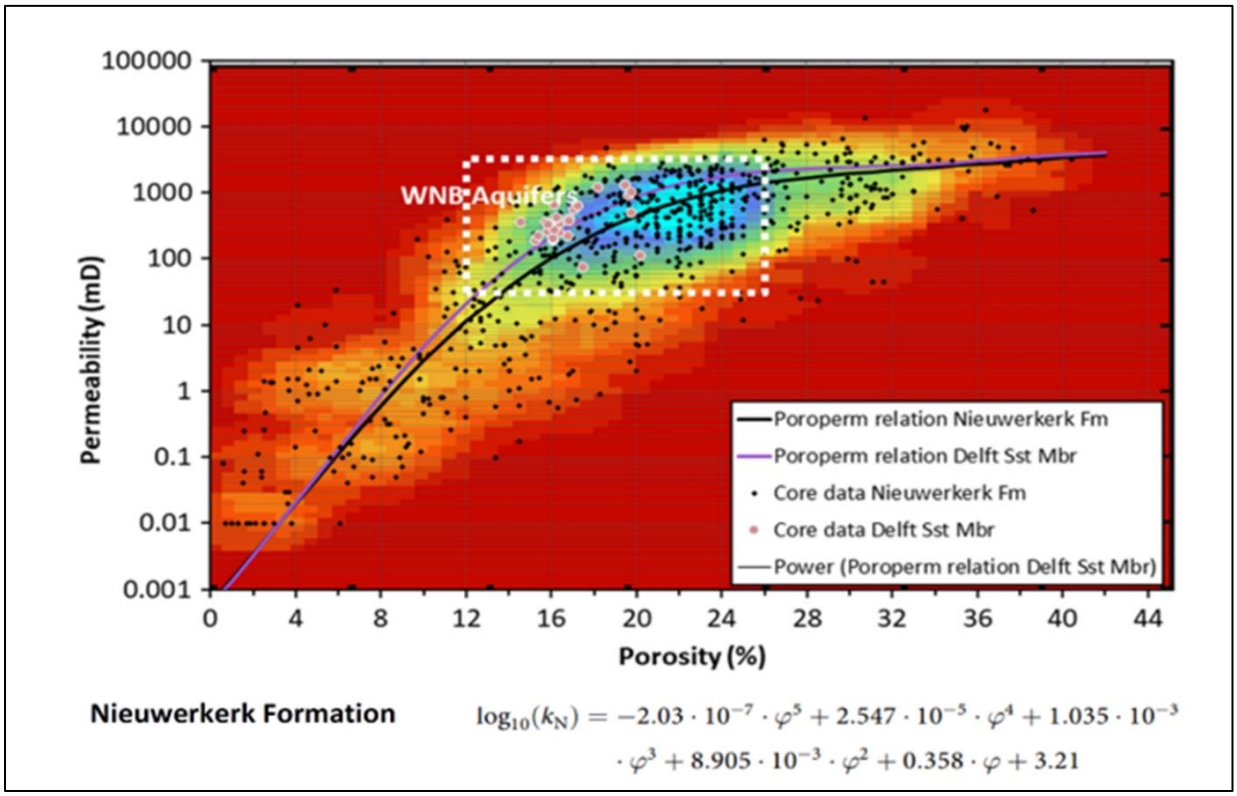

**Figuur 3-8: Kruisdiagram van gecorrigeerde boorkernporositeit versus lucht gemeten permeabiliteit met een regressieaanpassing (y=f(x)) voor de EDE-01-put in het Rijnland (KNNS).**

***Formatie van Nieuwerkerk, Schieland Groep (SLDN)***

Voor de Schieland Groep waren er geen kerngegevens beschikbaar van putten binnen het onderzoeksgebied, dus werd een gepubliceerde transformatie gebruikt om de permeabiliteit te berekenen, ontwikkeld door Willems et al. (2020) en eerder gebruikt in het PanTerra 2022 Gelderland-onderzoek (Panterra Geoconsultants BV, 2022) voor de Nieuwerkerk-formatie in het West Nederland Bekken. De regressie wordt weergegeven in Figuur 3-9 en de transformatie is:

KHC = 10^(-2.030*10^-7*(POR)^5 + 2.547*10^-5*(POR)^4 - 1.035*10^-3*(POR)^3 + 8.905*10^-3*(POR)^2 + 3.575*10^-1*(POR) - 3.210)

Waarbij porositeit in % .

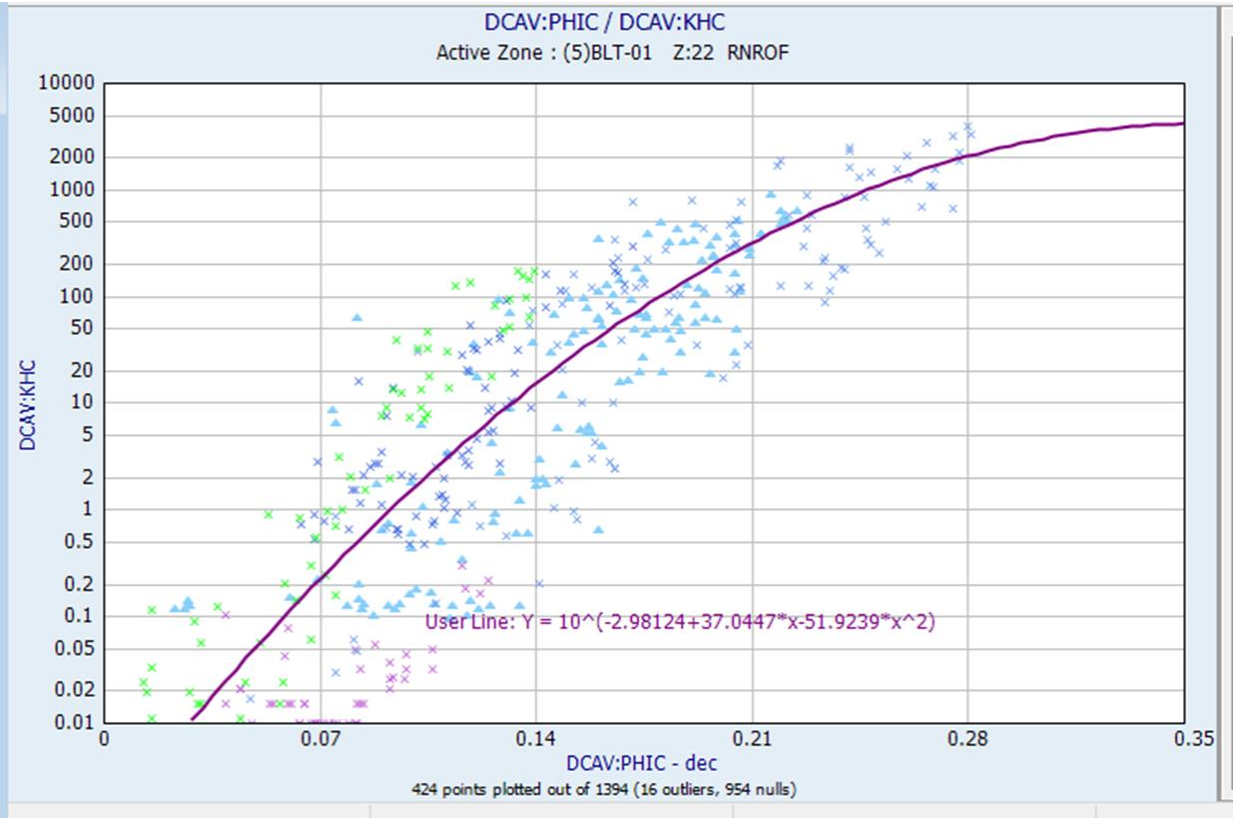



**Figuur 3-9: Kruisdiagram van permeabiliteit versus boorkernporositeit voor gegevens in de Nieuwerkerk-formatie en afgeleide poro-perm-relatie (Willems et al., 2020).**

***Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF - Trias)***

De beschikbare kerngegevens voor de RNROF zijn weergegeven in Figuur 3-10. De regressieaanpassing, geldig voor porositeit tot 35%, is:

KHC = 10^(-2.98124+37.0447*POR-51.9239*POR^2), met POR in fractionele eenheden (v/v)



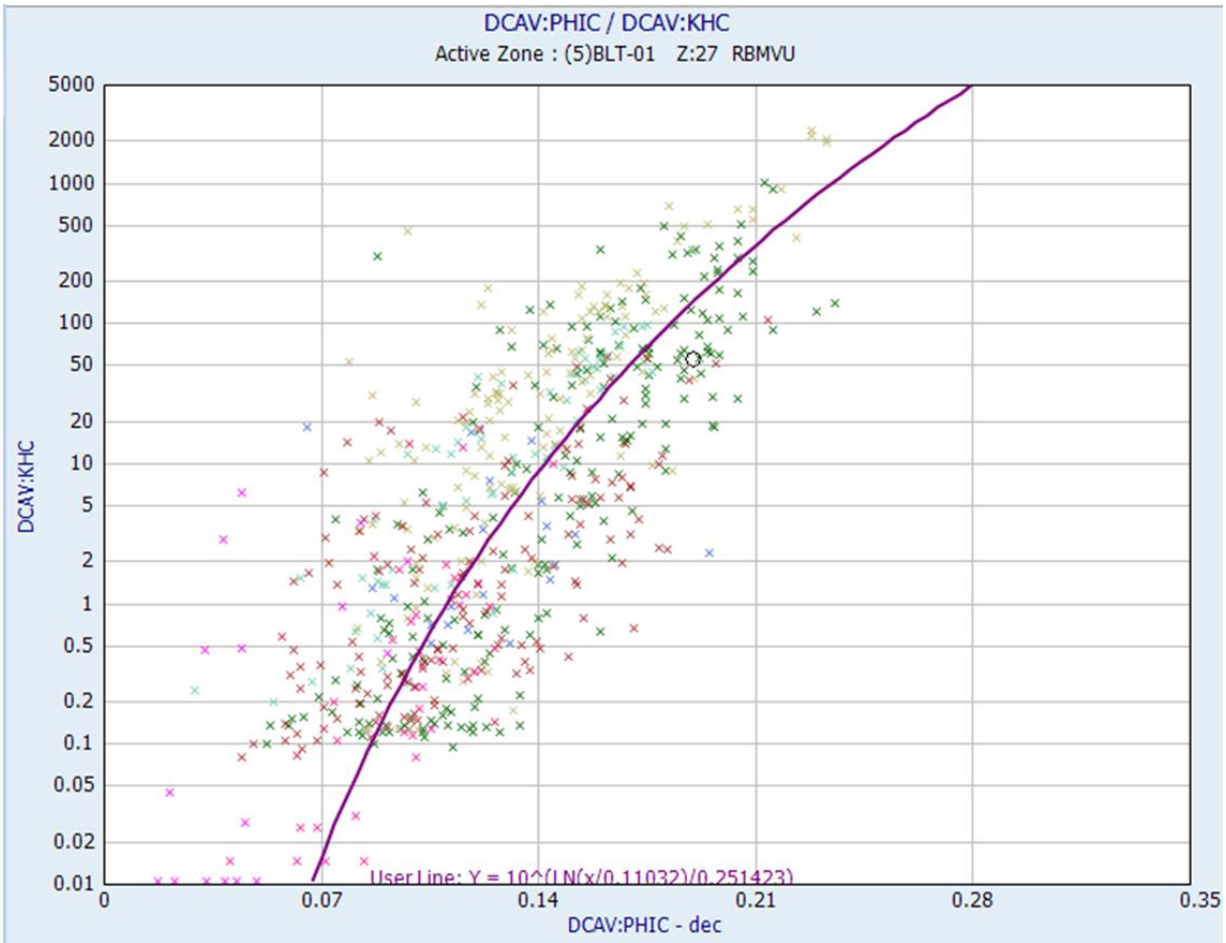

**Figuur 3-10: Kruisdiagram van permeabiliteit versus boorkernporositeit voor gegevens in de RNROF met afgeleide poro-perm regressietrend (paarse trendlijn). Gegevenspunten gekleurd per put.**

***Hoofd Bontzandsteen Subgroep (RBM – Trias)***

De Hoofd Bontzandsteen Subgroep omvat de Hardegsen-, Detfurth- en Volpriehausen-formaties. Er zijn onvoldoende kerngegevens beschikbaar in de onderzochte putten om betrouwbare poro-perm-trends voor elk van deze formaties afzonderlijk te genereren, dus werden de gegevens gegroepeerd en werd één poro-perm-trend afgeleid voor de Hoofd Bontzandsteen. Deze aanpak wordt geacht een robuustere voorspelling te geven voor het zand dan een slechte aanpassing aan schaarse gegevens. De beschikbare porositeits-/permeabiliteitsgegevens worden weergegeven in Figuur 3-11, samen met de afgeleide regressierelatie. Sommige uitschieters in de data zijn buiten beschouwing gelaten, waaronder de zeer lage permeabiliteitswaarden onder 0.02 mD, omdat deze onbetrouwbaar zijn.

De poro-perm trend is:

KHC = 10 ^ (ln(POR / 0.11032) / 0.251423), waarbij POR in fractionele eenheden (v/v) is uitgedrukt.

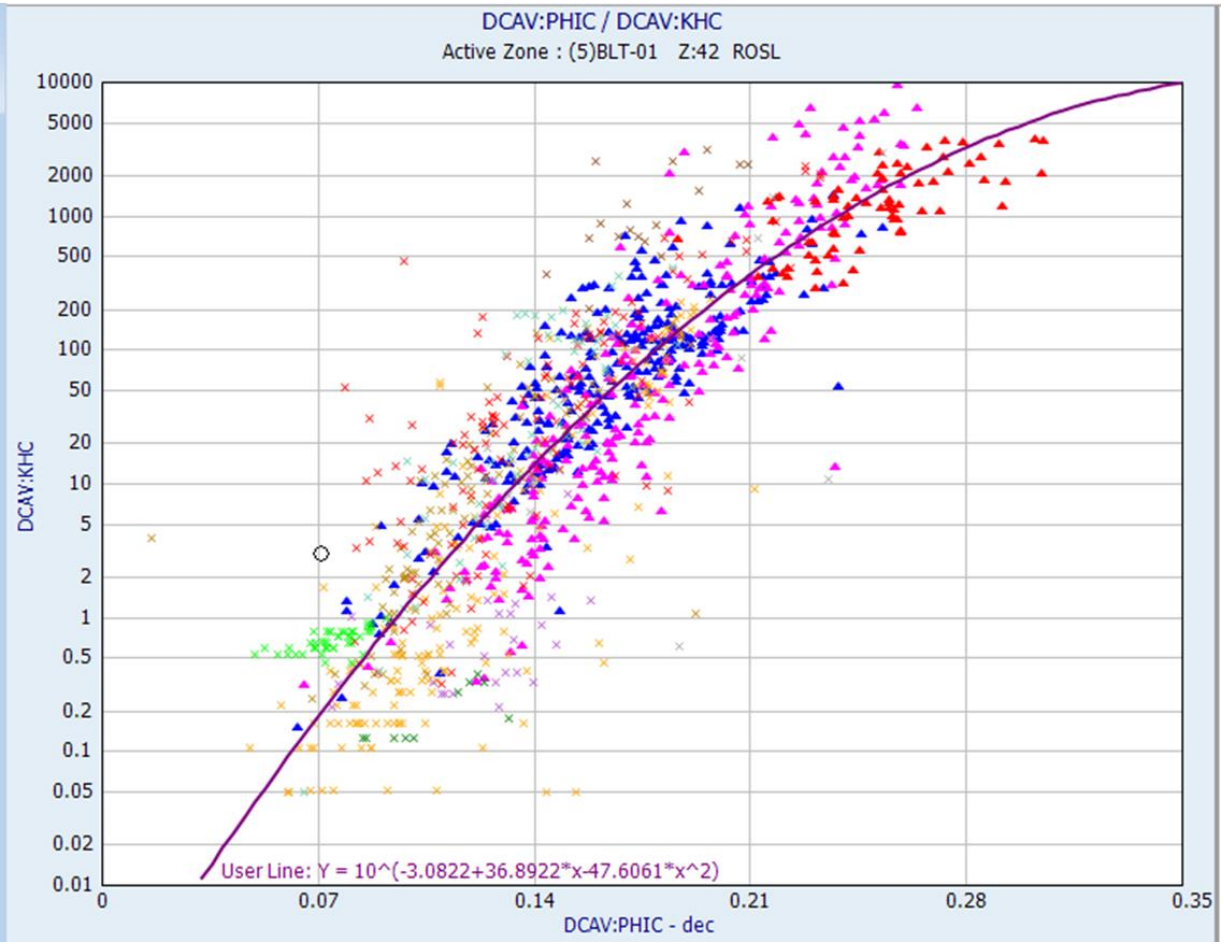



**Figuur 3-11: Kruisdiagram met gecorrigeerde gegevens over kernporositeit/permeabiliteit en de regressietrendlijn die is aangepast aan de gegevens voor het Onder-Trias, RBM (inclusief sub-eenheden). Afwijkende waarden, zoals zeer lage permeabiliteiten (<0.02 mD) zijn buiten beschouwing gelaten.**

***Formatie van Slochteren (ROSL – Perm)***

De Formatie van Slochteren (ROSL) maakt deel uit van de Boven-Rotliegend-groep en omvat kernmonsters uit 15 putten, waaronder 3 SCAN-putten (AMS-01, BLT-01, EDE-01). De gegevens zijn weergegeven in Figuur 3-12, waarbij de gegevens van de SCAN-putten zijn gemarkeerd met driehoekssymbolen in de grafiek. De regressielijn is zo aangepast dat deze beter aansluit bij de metingen van EDE-01 met een hogere porositeit en permeabiliteit, aangezien deze zich in het midden van het onderzoeksgebied bevindt. De trendvergelijking is:

KHC = 10^( -3.08228 + 36.8922 * PHIC - 47.6061 * PHIC **2), waarbij POR in fractionele eenheden (v/v) is weergegeven.




**Figuur 3-12: Kruisdiagram van gecorrigeerde boorkernporositeit/permeabiliteitsgegevens voor de ROSL met de regressietrendlijn die aan de gegevens is aangepast. De SCAN-putten worden aangegeven met driehoeken (rood = EDE-01, blauw = BLT-01 en magenta = AMS-01), de overige putten met kruisjes. De gegevenspunten zijn gekleurd per put.**

### 3.4.4 Permeabiliteit geothermisch brijn

De hierboven afgeleide gecorrigeerde permeabiliteit voor gas worden gebruikt als input voor het genereren van geothermische vermogenskaarten. Hiervoor is gekozen omdat de dataset uit kernplugdata veel groter is dan de dataset van productietests in het studiegebied. Er wordt echter erkend dat er correcties moeten worden toegepast op de in-situ luchtpermeabiliteit om de permeabiliteit voor brijn te bepalen en zo een nauwkeurigere beoordeling van de doorlaatbaarheid in reservoirs te maken. Uiteindelijk zijn het de productietests die de effectieve permeabiliteit werkelijk weergeven, waarbij heterogeniteit (bijv. natuurlijke breuken of laagdoorlatende lagen) een rol spelen. Deze heterogeniteiten worden niet altijd zichtbaar bij kernplugdata en kunnen de permeabiliteit daardoor overschatten.

De nieuwe SCAN-putten hebben zowel puttests als kernmonsters opgeleverd uit de beoogde reservoirs, met name uit het Rotliegend. De SCAL-metingen in AMS-01, BLT-01 en EDE-01 omvatten porositeit onder druk (gemeten in AMS-01) en permeabiliteit voor brijn onder druk (gemeten in alle drie de putten). Dit biedt de mogelijkheid om eerst de in-situ permeabiliteit voor brijn te schatten op basis van kernmonsters en deze vervolgens te kalibreren aan de hand van de puttestresultaten.

De methode die in deze studie is gebruikt om de in-situ brijn-permeabiliteit te schatten, bestaat uit een aantal stappen: eerst wordt de gemeten porositeit van de kern onder oppervlakte-omstandigheden

gecorrigeerd voor spanning, waarna de gemeten gaspermeabiliteit van de boorkern wordt omgezet naar brijn-permeabiliteit onder spanning. Vervolgens wordt per laag een transformatie van porositeit onder spanning naar brijn-permeabiliteit geconstrueerd. Deze trends worden toegepast op de uit logmetingen afgeleide porositeit, waarna laaggemiddelden voor phi, $K_{brijn}$, $Kh_{air}$ worden berekend ter ondersteuning van de geothermische vermogenskaarten.

De correlaties gebruikt voor de boorkerngegevens zijn:

In-situ porositeitsbepaling via spanningscorrectie:

$$PHI_{stress} = 0.95 * PHI_{ambient}$$

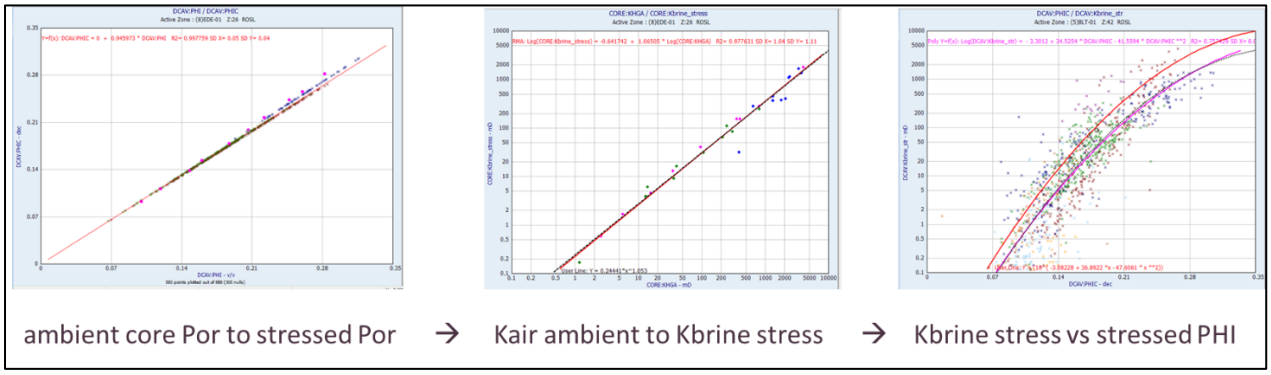
Conversie van ambient luchtpermeabiliteit naar in-situ brijn-permeabiliteit:

$$Kbrine_{(stress)} = 0.24441 * KH_{(ambient)}^{2}$$

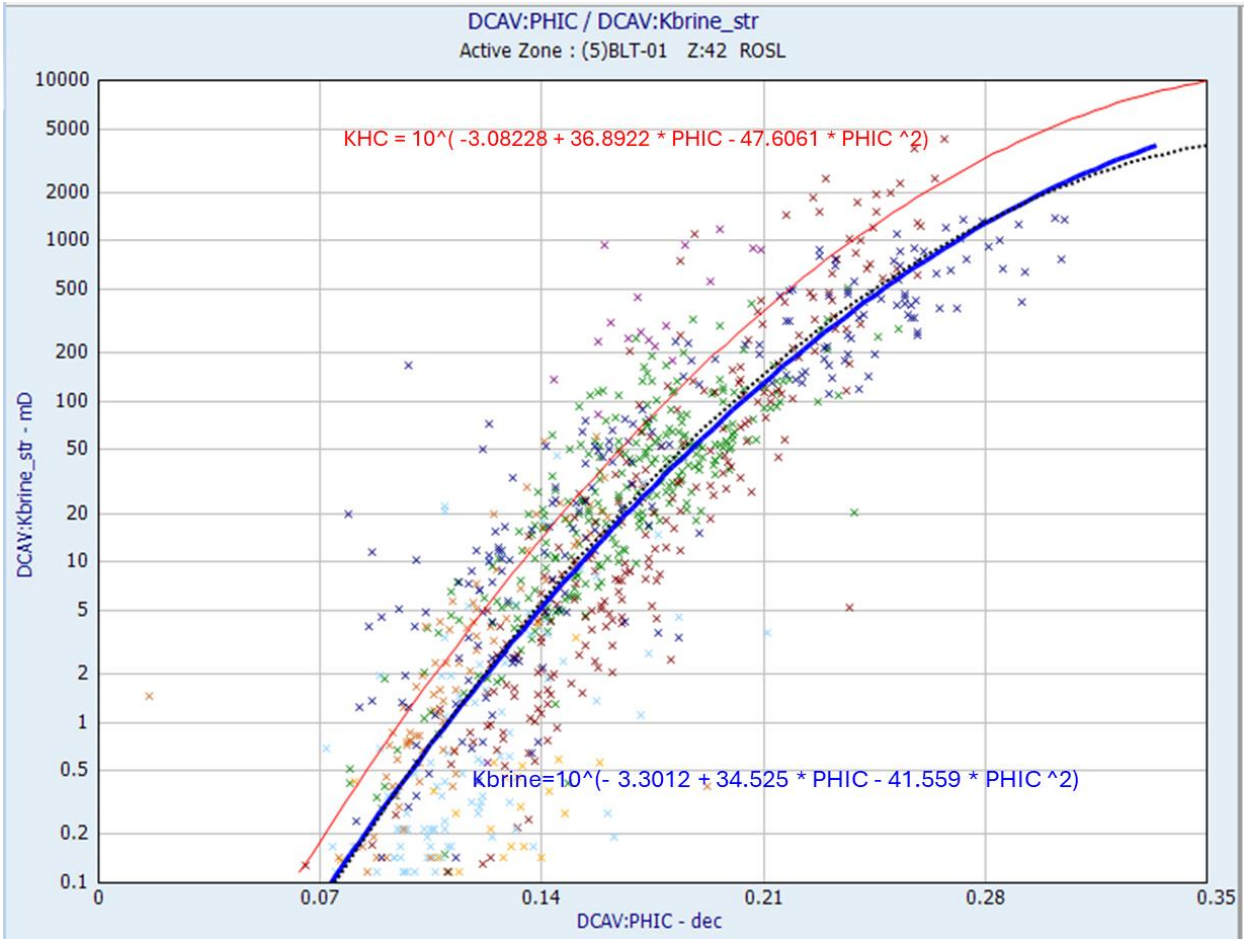
Regressie functie voor $Kbrine_{(stress)}$:

$$Kbrine_{(stress)} = 10\text{^}(- 3.3012 + 34.525 * PHI_{stress} - 41.559 * PHI_{stress}\text{^}2)$$

De werkwijze is geïllustreerd in Figuur 3-13, met de in-situ luchtpermeabiliteitstrend en de naar de brijnpermeabiliteit geschaalde trend. De resulterende regressie-fit is weergegeven in Figuur 3-14. Hiermee wordt aangetoond dat het mogelijk is om op basis van kerngegevens zowel de stap van oppervlakte omstandigheden naar in-situ data te maken, als luchtpermeabiliteit om te zetten naar vloeistofpermeabiliteit.




**Figuur 3-13: Illustratie van de methodiek om de permeabiliteit voor in situ brijn te verkrijgen uit SCAN-putgegevens. (a) corrigeren van de porositeit van de boorkern naar de porositeit onder spanning (SCAN-putten), (b) omzetten van de permeabiliteit voor lucht naar de permeabiliteit voor brijn onder spanning (SCAN-putten), (c) regressieaanpassing van de permeabiliteit voor brijn onder spanning met gegevens over de porositeit onder spanning (alle putten met boorkernboringen) om de poro-perm-transformatie te verkrijgen.**




**Figuur 3-14: Grafiek van de stressgecorrigeerde brijnpermeabiliteit, geschat op basis van SCAN-putcorrelatie, versus stressgecorrigeerde kernporositeit voor de ROSL. De weergegeven punten zijn per put gekleurd. Ook zijn de regressieaanpassing aan deze gegevens (blauwe curve) en de in-situ luchtpermeabiliteitstrend (rode lijn) weergegeven. De zwarte stippellijn is de luchtpermeabiliteitstrend die is verschoven om overeen te komen met de brijntrend, ter illustratie van de schaalbaarheid.**

## 3.5 Porositeit-dieptetrend

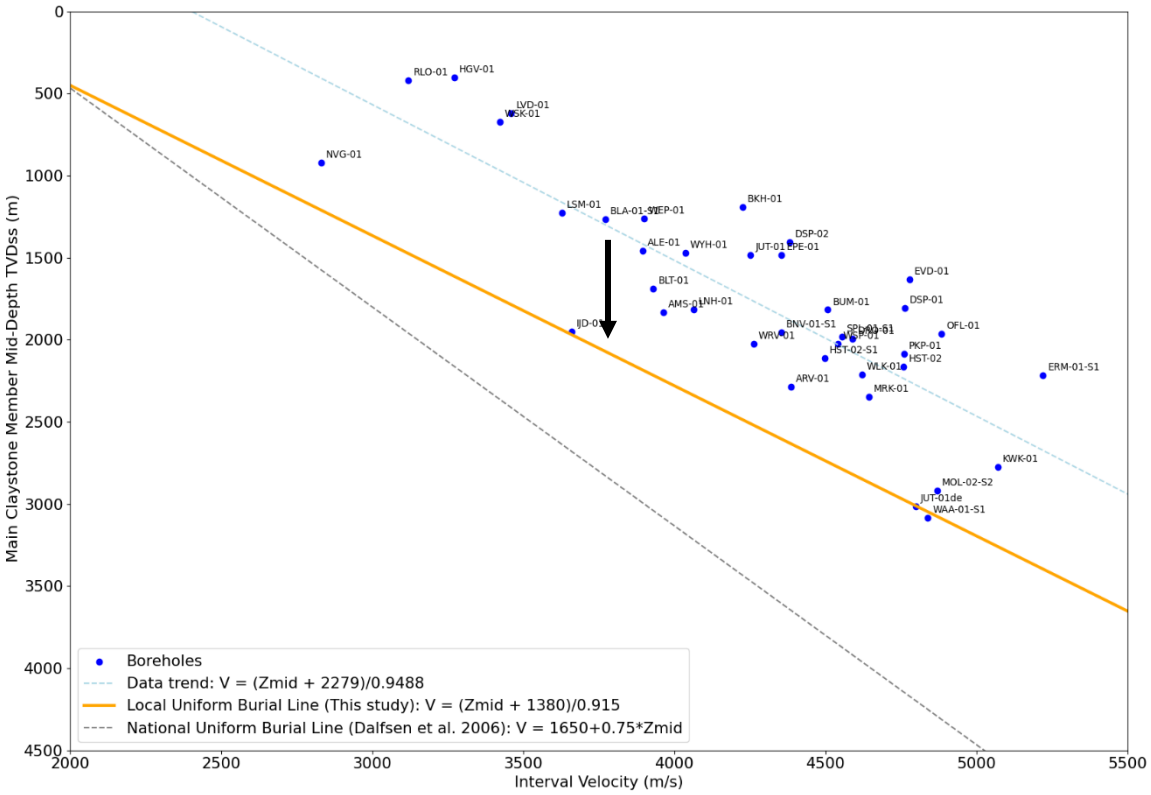
Het simpelweg uitzetten van de gemiddelde porositeit van het reservoir tegen de diepte levert geen bruikbare trend op vanwege de uiteenlopende geschiedenis van de opheffing in het onderzoeksgebied. Er werd een techniek toegepast waarbij gebruik werd gemaakt van de akoestische P-golfsnelheidsgegevens in kleisteen om de opheffing bij elke put te kunnen schatten. In kleisteen vertegenwoordigd de akoestische respons een inklinkingstrend, waarbij de P-golfsnelheid toeneemt naarmate de begravingsdiepte in normaal onder druk staande sedimenten toeneemt. Het is deze eigenschap die kan worden gebruikt om de opheffing in elke put te schatten. Een soortgelijke benadering werd gebruikt in het eerdere Gelderland-onderzoek (PanTerra-project 2100112). De voorspelling van maximale begraving is gebaseerd op de gemeten P-golfsnelheid van de Hoofd Kleisteen Formatie. De onzekerheid met betrekking tot het opheffingsmodel wordt besproken in paragraaf 3.8.

Het gemiddelde van de gemeten P-golfsnelheden (VP) in de Hoofd Kleisteen Formatie werd berekend en uitgezet tegen de gemiddelde diepte van de formatie (TVD) voor elke put in het onderzoek. Er werd een uniforme begravingslijn gegenereerd op basis van putten waarvan wordt aangenomen dat ze zich momenteel op hun huidige maximale begravingsdiepte bevinden. Verder werd de trendlijn bepaald door een regressieaanpassing van VP versus TVD van de Hoofd-Kleisteen Formatie schalie (RBSM). Putten die

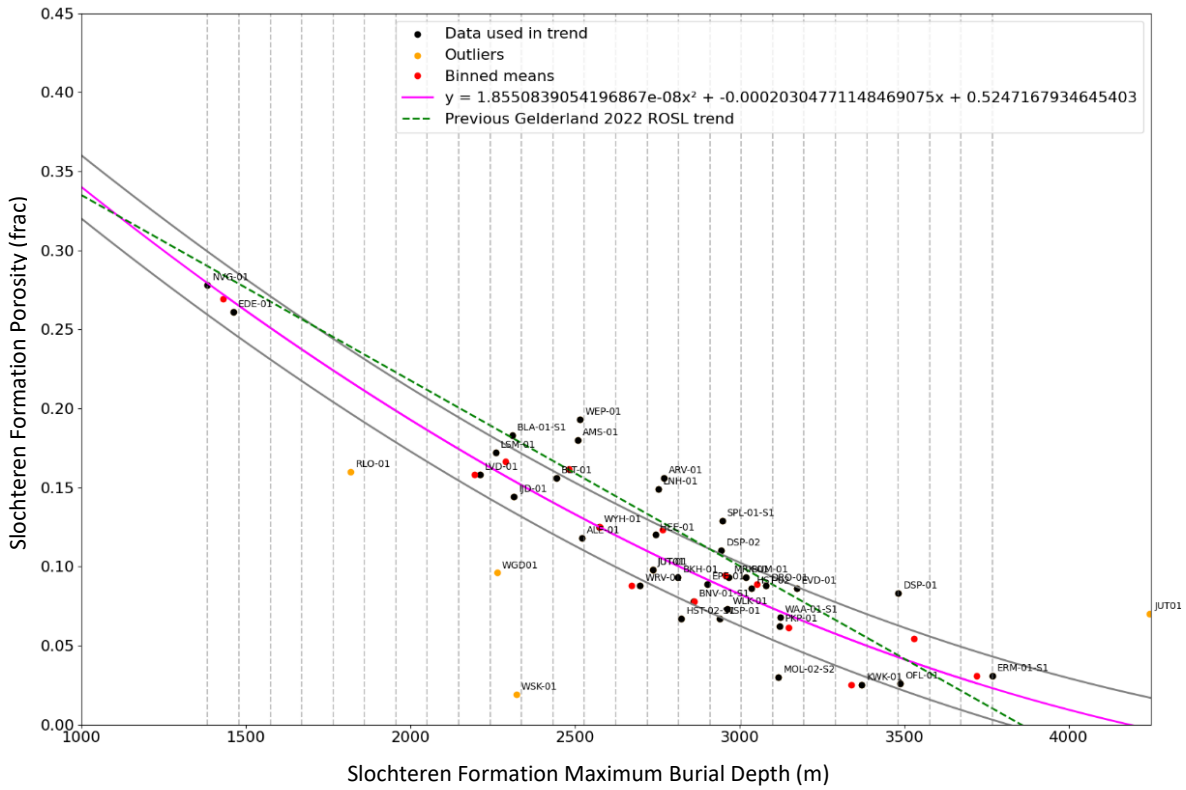
boven deze uniforme begravingstrendlijn liggen, zijn momenteel ondieper dan voorspeld op basis van hun interval snelheid. De opheffing voor elke put werd vervolgens geschat op basis van de verticale afstand van elk gegevenspunt in de grafiek boven deze uniforme begravingslijn. Het proces voor het schatten van de opheffing wordt geïllustreerd in Figuur 3-15. Deze schattingen van de opheffing werden vervolgens gebruikt om de gemiddelde diepte van de reservoirs van de doelformaties (bijv. Formatie van Slochteren & reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen ) in de onderzochte putten te corrigeren voor maximale begraving. Vervolgens werden de gemiddelde porositeit van de lagen uitgezet tegen de herziene gemiddelde diepte van de reservoirs, om zo de voor opheffing gecorrigeerde porositeit-diepte trends per reservoir af te leiden.

Het resultaat van de voor opheffing gecorrigeerde porositeit-diepte trends worden weergegeven in Figuur 3-16 voor de Formatie van Slochteren (ROSL) en in Figuur 3-17 voor de reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen. Deze benadering gaat alleen uit van compactie als mechanisme voor porositeitsvermindering met de diepte en houdt geen rekening met diagenetische effecten. De trend is alleen geldig binnen het diepte-interval van de gegevens (ongeveer 1500 – 3500 m TVD). Buiten dit bereik is het waarschijnlijk dat de trends enigszins moeten worden aangepast. EDE-01 en HEE-01 doorboren de Hoofd Kleisteen-formatie niet, daarom werd aangenomen dat deze putten dezelfde opheffing hadden als NVG-01 vanwege hun locatie op het Peel-Maasbommel Complex om gegevens op kleinere dieptes te bieden. De porositeit-diepte trendlijnen werden gegenereerd door de gegevens in bins van 70 - 100 m te verdelen en een gemiddelde te berekenen om een vertekend beeld als gevolg van ongelijke gegevenskwaliteit te verminderen. Voor de trend van de Slochteren-formatie werden RLO-01, WGD-01, WSK-01 en JUT-01$_{diep}$ als uitschieters geclassificeerd en werd een cut-off van 0,35 tussen netto en brutoverhouding gebruikt om de contouren voor de dieptetrend van het Trias te definiëren. Uitschieters ten opzichte van de trend zullen tijdens het opstellen van de vermogenkaarten worden opgenomen in de porositeitskaart met een well-tie (straal van 2 km) in Petrel. Voor de Slochteren-formatie kunnen de putten NVG-01 en EDE-01 een hogere dan gemiddelde porositeit hebben vanwege hun positie op het Peel-Maasbommel Complex, in vergelijking met andere gebieden op dezelfde diepte. Daarom bestaat de mogelijkheid dat deze ondiepe gegevenspunten de porositeit in andere gebieden te hoog inschatten. Voor de reservoirs binnen de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen werden geen sterke trends gevonden binnen de afzonderlijke formaties, met een mix van formaties die hogere porositeitswaarden laten zien.

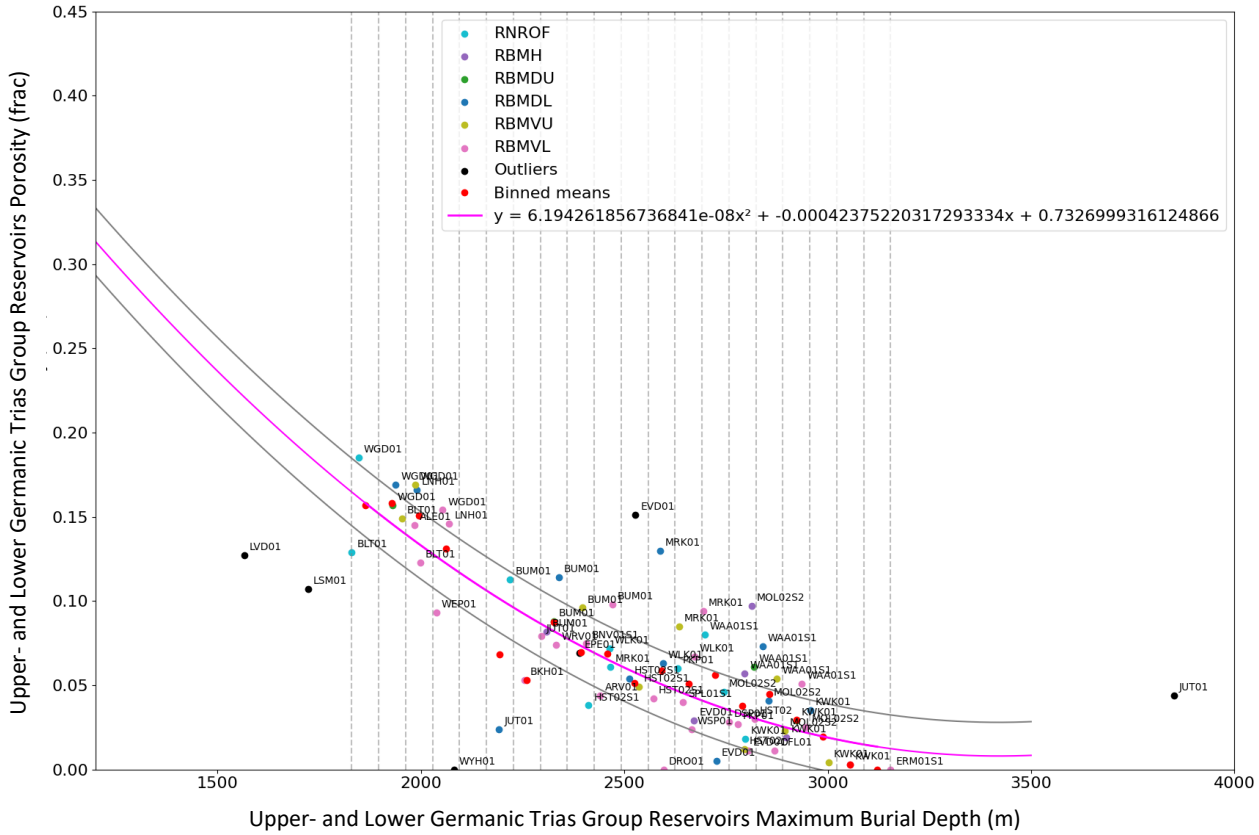
De gegenereerde porositeit-diepte trends werden toegepast op de kaart met de maximale begravingsdiepte van het reservoir. Het oppervlak met de opheffingscorrectie werd gegenereerd op basis van de gegevenspunten van de putten en met behulp van convergente interpolatie tussen de putten (± 10%). Het oppervlak met de opheffingscorrectie wordt geïllustreerd in Figuur 3-18, samen met de structurele elementen en de provinciegrenzen. De kaart illustreert een breed regionaal opheffingsmodel, waarbij 1) het Peel-Maasbommel Complex een beperkte inversie vertoont, die zich uitstrekt naar het noordwesten tussen het Centraal Nederland Bekken, het West Nederland Bekken en de Zandvoortrug, 2) het Centraal Nederland Bekken een geleidelijk toenemende inversie vertoont naarmate men zich van het hoge punt verwijdert, met de grootste inversie in het midden van het bekken. Verder naar het noorden in het platformgebied wordt, zoals verwacht, een lage opheffingscorrectie aangegeven, 3) het West Nederland bekken vertoont een relatief hoge inversie aan de randen, hoewel putten in het zuiden een minder intense inversie aangeven.



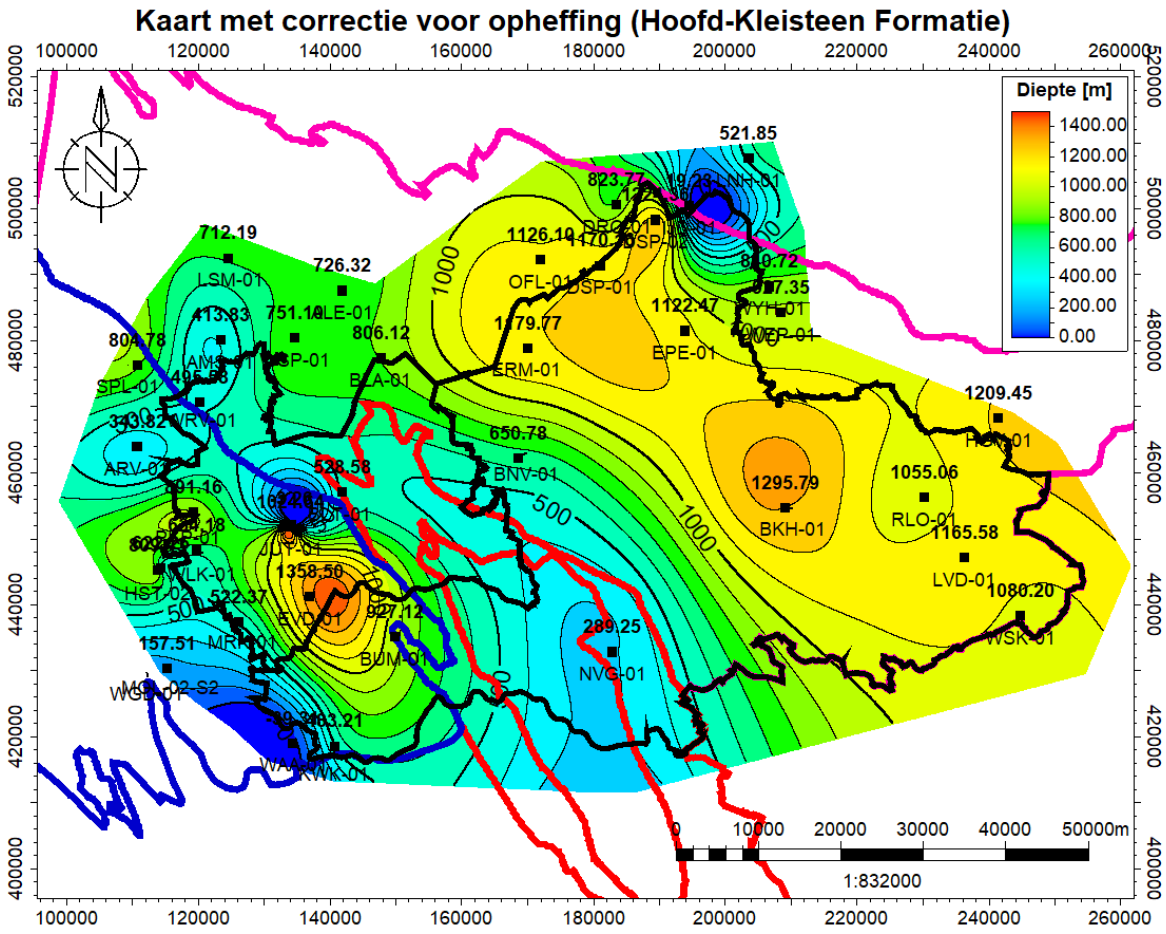

**Figuur 3-15: De grafiek toont de gemiddelde akoestische P-golfinterval snelheden uitgezet tegen gemiddelde reservoirdiepte (TVD). De oranje trendlijn is een regressie door de datapunten van de putten, verschoven om door de putten met nul-opheffing te lopen. De zwarte pijl geeft de richting en omvang van de opheffingscorrectie naar de gemiddelde diepte van het reservoir aan. Ook weergegeven als een grijze stippellijn is een regionale nulbegravingslijn van TNO.**




**Figuur 3-16: Grafiek die de porositeit-diepte trend voor Formatie van Slochteren (ROSL) weergeeft, gebruikmakend van de voor opheffing gecorrigeerde gemiddelde reservoirdieptes.**




**Figuur 3-17: Grafiek die de porositeit-diepte trend weergeeft voor de reservoirs van de de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen, gebruikmakend van voor opheffing gecorrigeerde gemiddelde reservoirdieptes.**




**Figuur 3-18: In het model toegepaste correctiekaart voor opheffing. Zwarte contouren geven de provinciegrenzen weer. Magenta contour: Centraal Nederland Bekken; Rode contour: Peel-Maasbommel Complex; Blauwe contour: West Nederland Bekken.**

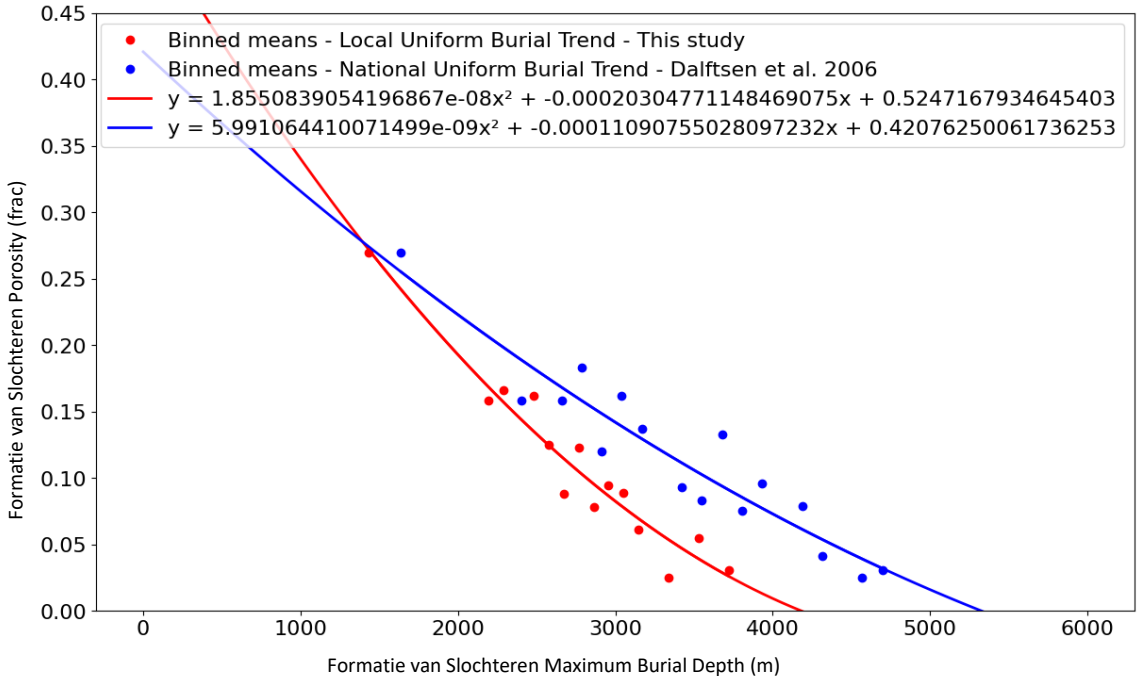
### 3.5.1 Onzekerheid en rechtvaardiging van de porositeit-diepte trend

Er zijn veel methoden beschikbaar om de maximale begraving van een reservoir te bepalen, waaronder de eerder besproken akoestische snelheidsmethode, maar ook structurele reconstructie op seismische lijnen en het modelleren van bekkens. Een samenvatting van deze methoden is te vinden in Veldkamp et al. (2022), waarin de verschillende voor- en nadelen van elke methode worden geïllustreerd en ook de grote verschillen tussen de verschillende benaderingen wordt beschreven. Deze verschillen illustreren dat er een grote onzekerheid bestaat bij het voorspellen van de maximale begravingsdiepte van reservoirs en dat dit uiteindelijk van invloed kan zijn op de voorspellingen voor geothermische vermogen. De voor- en nadelen van elke methode werden afgewogen en uiteindelijk werd gekozen voor de akoestische snelheidsmethode, om de volgende redenen:

- Grote hoeveelheid putgegevens beschikbaar met akoestische snelheden binnen de Hoofd Kleisteen Formatie. De grotere gegevensdichtheid maakt betere voorspellingen mogelijk.
- Het onderzoekgebied is structureel complex, met platforms, hogen en twee verschillende bekkens (CNB, WNB). Akoestische snelheden maken een gestandaardiseerde aanpak in de verschillende regio's mogelijk en zorgen voor een directe vergelijking met het eerdere Gelderland 2022-onderzoek
- De methode biedt directe vergelijkingen tussen putten voor porositeitsverhoging, in plaats van te vertrouwen op interpolaties tussen putten.

Binnen de akoestische snelheidsmethode komt een van de belangrijkste onzekerheden voort uit het definiëren van de uniforme begravingslijn. Er kunnen verschillende uniforme begravingslijnen worden geïnterpreteerd, die beïnvloed kunnen worden door verschillende factoren, zoals kleisteenlithologie. Twee mogelijke begravingslijnen worden geïllustreerd in Figuur 3-19: 1) de begravingslijn die in dit onderzoek is gegenereerd enkel met behulp van de putten in het studiegebied, 2) de begravingslijn die is gegenereerd op basis van nationale gegevens (Dalfsen et al. 2006). Er bestaat een significant verschil tussen beide, waarbij de nationale trendlijn een steilere helling heeft. De variatie illustreert de mogelijke onzekerheid die kan bestaan bij het afleiden van een trendlijn. Deze onzekerheid kan een grote invloed hebben op de voorspelde porositeit, aangezien deze wordt gebruikt als input voor het genereren van een porositeit-diepte-trend voor de vermogenskaarten, zoals besproken in de vorige paragraaf. De lokale uniforme begravingslijn werd in deze studie gebruikt om de volgende redenen: 1) De trend van Dalftsen et al. (2006) werd gedefinieerd op basis van de eindpunten van de regionale dataset en gaat uit van een uniforme samenstelling van de kleisteen in het hele land, terwijl de lokale trend die in deze studie wordt gebruikt het effect van mogelijke heterogeniteit minimaliseert, 2) de lokale trend biedt relatief lage opheffingscorrecties voor de platformen, en 3) twee putten komen overeen met eerdere vitrinietreflectie-analyses (MOL-02-S2 en JUT-01deep) voor de lokale uniforme begravingslijn (Nelskamp, 2011).

De impact van de keuze van de begravingslijn werd onderzocht om te begrijpen welke invloed dit zou kunnen hebben op het gemiddelde vermogen potentieel van Slochteren. Met behulp van de uniforme begravingslijn van Dalftsen et al. (2006) kan een ondiepere Slochteren-porositeit-diepte-trend worden gegenereerd in vergelijking met wanneer de lokale trend wordt gebruikt. Dit komt doordat de uniforme begravingslijn van Dalftsen een hogere gradiënt heeft, waardoor de opheffingscorrecties steeds groter worden bij hogere akoestische snelheden Figuur 3-19.



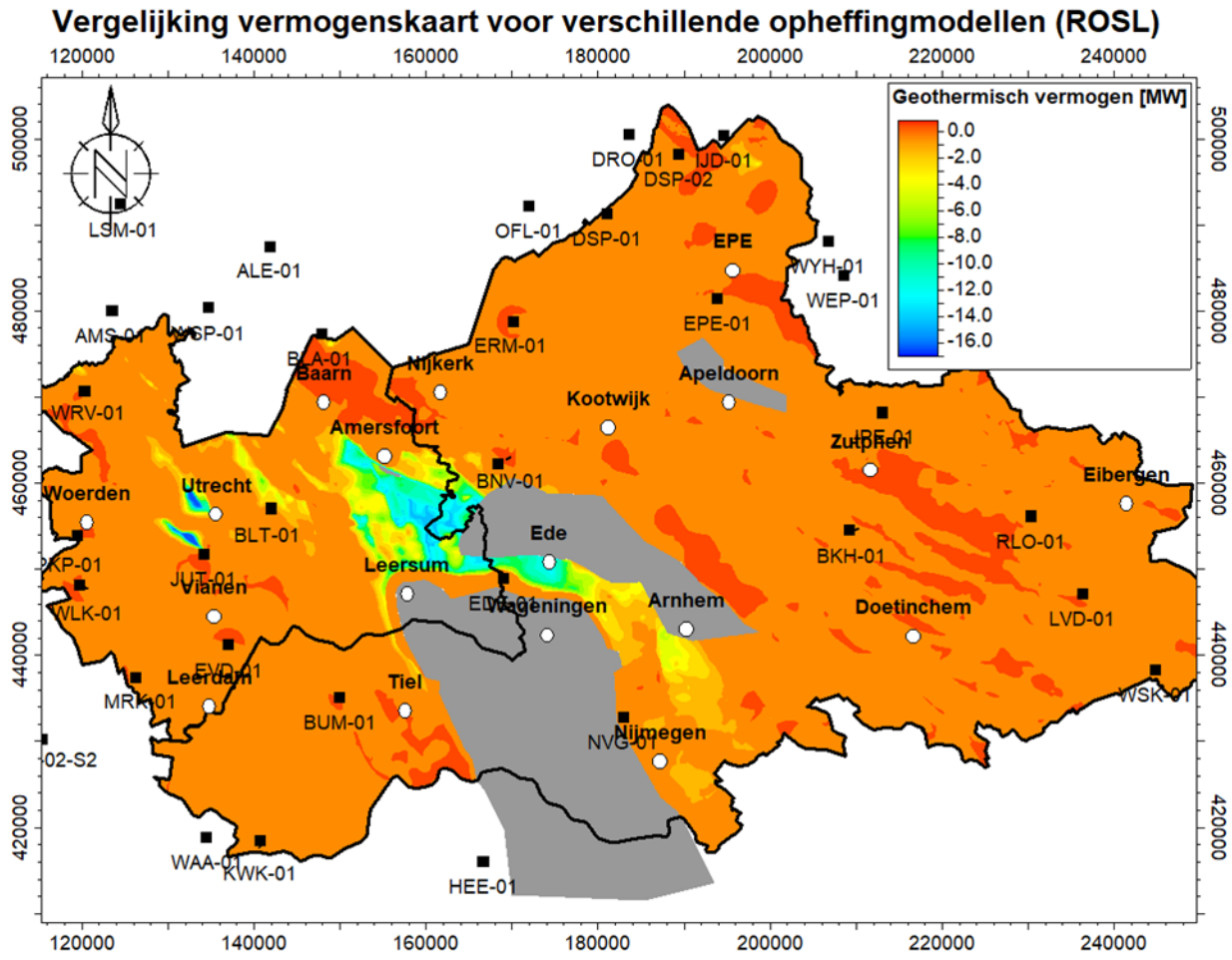

**Figuur 3-19: Formatie van Slochteren porositeit-diepte trends met behulp van de lokale begravingslijn gegenereerd in deze studie (rood) en de nationale (Dalftsen et al 2006) begravingslijn (blauw).**

De twee dieptetrends die werden gegenereerd met behulp van de uniforme begravingslijnen werden toegepast op de kaart met gemiddelde dieptes van het Slochteren-reservoir om inzicht te krijgen in de impact die deze kunnen hebben op het geothermisch vermogen. Uit de analyse bleek dat in het

belangrijkste gebied, rond het Peel-Maasbommel Complex, de vermogensvoorspelling aanzienlijk kan worden beïnvloed. De onzekerheid is het grootst tussen de boorlocaties waar geen controlepunten zijn. In deze gebieden wordt de porositeit naar verwachting ~7% (bijvoorbeeld van een porositeit van 14% naar 7%) lager wanneer de trend van Dalftsen et al. (2006) wordt gebruikt in vergelijking met de lokale trend die in deze studie is gegenereerd. Deze lagere porositeit leidt uiteindelijk tot een aanzienlijke daling van het vermogen: met ~14 MW, in de gebieden die het meeste potentieel hadden bij gebruik van de lokale begravingslijn (Figuur 3-20).

Over het algemeen bestaat er een aanzienlijke onzekerheid bij het voorspellen van de vroegere maximale begravingsdiepte van de geothermische reservoirs. Dit komt door de volgende redenen: 1) de verschillende afzonderlijke methoden leiden niet tot een consensus, 2) elke methode heeft zijn eigen aannames en onzekerheden, 3) de studiegebieden liggen in een structureel complex gebied, tussen drie structurele elementen (WNB, CNB en het PMC). De volgende aanbevelingen worden gedaan voor toekomstig werk om de potentiële onzekerheden in de methoden voor het bestuderen van de opheffingsgeschiedenis te begrijpen en te kwantificeren en om een aantal realistische scenario's te ontwikkelen:

- Bouw voort op de akoestische snelheidsmethode door extra putten uit platformgebieden op te nemen als kalibratiepunten met verwachte lagere opheffingswaarden.
- Evalueer of diffuse of scherpe grenzen nodig zijn tussen de structurele elementen op de akoestische snelheidsmethode en evalueer de interpolatiemethode verder. Neem extra putten op in representatieve segmenten en pas een gemiddelde opheffingswaarde toe (bijv. standaardafwijking voor hoge en lage gevallen).
- Evalueer de lithologische variaties van de Hoofd Kleisteen Formatie en het effect op de intervalsnelheid.
- Analyseer de relatieve variaties ten opzichte van de andere twee opheffingsmodellen.
- Genereer meerdere porositeit-diepte trends en definieer de potentiële hoge en lage scenario's.
- Gebruik een dubbele proxy-benadering: kalibreer de uniforme begravingslijn van de akoestische methode waar mogelijk met aanvullende gegevens van vitrinietreflectie.
- Analyseer de vitrinietreflectiegegevens van de SCAN-putten, met name voor EDE-01 en HEE-01, waar de Hoofd Kleisteen Formatie afwezig is.



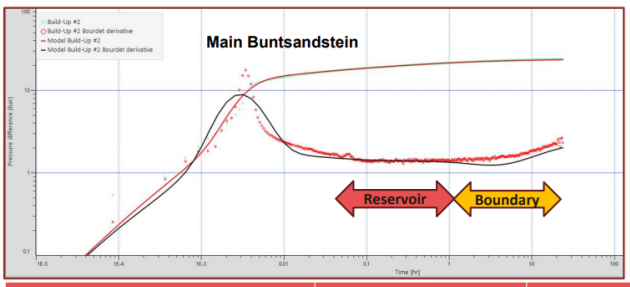

**Figuur 3-20: Verschil van de Formatie van Slochteren-vermogenskaarten voor het gemiddelde scenario op basis van de twee afzonderlijke porositeit-diepte trends. De kaart laat zien dat de methode van Dalftsen et al. (2006) het verwachte vermogensresultaat aanzienlijk vermindert, met maximaal ~14 MW.**

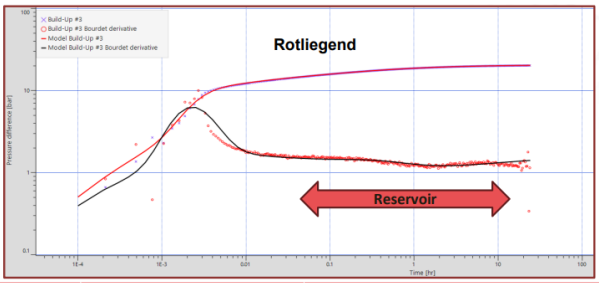
## 3.6 Evaluatie puttest

De interpretatie van puttests biedt een dynamische schatting van de effectieve vloeistofpermeabiliteit op reservoirschaal onder in-situ omstandigheden en kan worden gebruikt om de op boorkern- en putloggegevens gebaseerde permeabiliteitstrends te valideren. Puttest permeabiliteit leggen ook heterogeniteit op reservoirschaal vast, zowel positieve als negatieve, die niet zichtbaar zijn in metingen op boorkernschaal. De aanwezigheid van natuurlijke breuken kan bijvoorbeeld de stroming van een zone aanzienlijk vergroten. Omgekeerd kunnen dunne, gelamineerde lagen die de verticale doorlatendheid verminderen, en die niet zichtbaar zijn in horizontale boorkernplugmetingen, de effectieve doorlatendheid op grotere schaal verminderen. Gecombineerd bieden puttest en op putloggegevens gebaseerde permeabiliteitsmodellen een robuustere beoordeling van de transmissiviteit van het reservoir en dus van het geothermisch potentieel.

Er zijn enkel puttests uitgevoerd bij de SCAN-putten AMS-01, BLT-01 en EDE-01.

De testresultaten in BLT-01, gepresenteerd op GET2025 (Ganguly, et al., 2025), tonen consistentie tussen de test en op loggegevens gebaseerde schattingen van de vloeistofpermeabiliteit, gemiddeld over de zone, voor zowel de Bunter- als de Rotliegend-zandstenen. De vergelijking tussen de testresultaten en de door EBN berekende boorkern permeabiliteitresultaten wordt weergegeven in Figuur 3-21.




| Formation | Well Test data (Darcy.m) | Net Perforated interval (m TVD) | Avg Permeability from WT analysis (mD) | Avg Permeability from Core calibrated logs (mD) |
|---|---|---|---|---|
| Main Buntsandstein | 4.7 | 93.7 | 50 | 64 |
| Rotliegend | 4.8 | 118.3 | 39 | 53 |

**Figuur 3-21: Permeabiliteit-hoogte (KH) analyses uit boorputtests voor de Bunter- en Rotliegend-zandstenen in boorput BLT-01. Ter vergelijking wordt de gemiddelde permeabiliteit van de laag uit gekalibreerde boorkern weergegeven (met dank aan EBN (Ganguly, et al., 2025)).**

Onlangs vrijgegeven SCAL-gegevens van de BLT-01- en EDE-01-putten werden samen met de gegevens van AMS-01 gebruikt om de in-situ permeabiliteit van vloeistoffen te berekenen aan de hand van de regressies tussen de gemeten permeabiliteit onder atmosferische condities en onder druk staande brijn in deze putten, zoals beschreven in paragraaf 3.4.4. Vervolgens werd een transformatie tussen de voor overburden gecorrigeerde porositeit en de brijnpermeabiliteit op basis van oude boorkerngegevens geconstrueerd en gebruikt om de in-situ vloeistofpermeabiliteit in de putten in het onderzoeksgebied te berekenen (zie paragraaf 3.4.4).

In de BLT-01-put leverde de permeabiliteitsmodellering een gemiddelde in-situ gaspermeabiliteit op van 183 mD (met een laag-hoog bereik van 53 – 530 mD) en een in-situ brijnpermeabiliteit van 65 mD. Deze laatste waarde komt goed overeen met de puttestpermeabiliteit van 39 mD voor de zone.

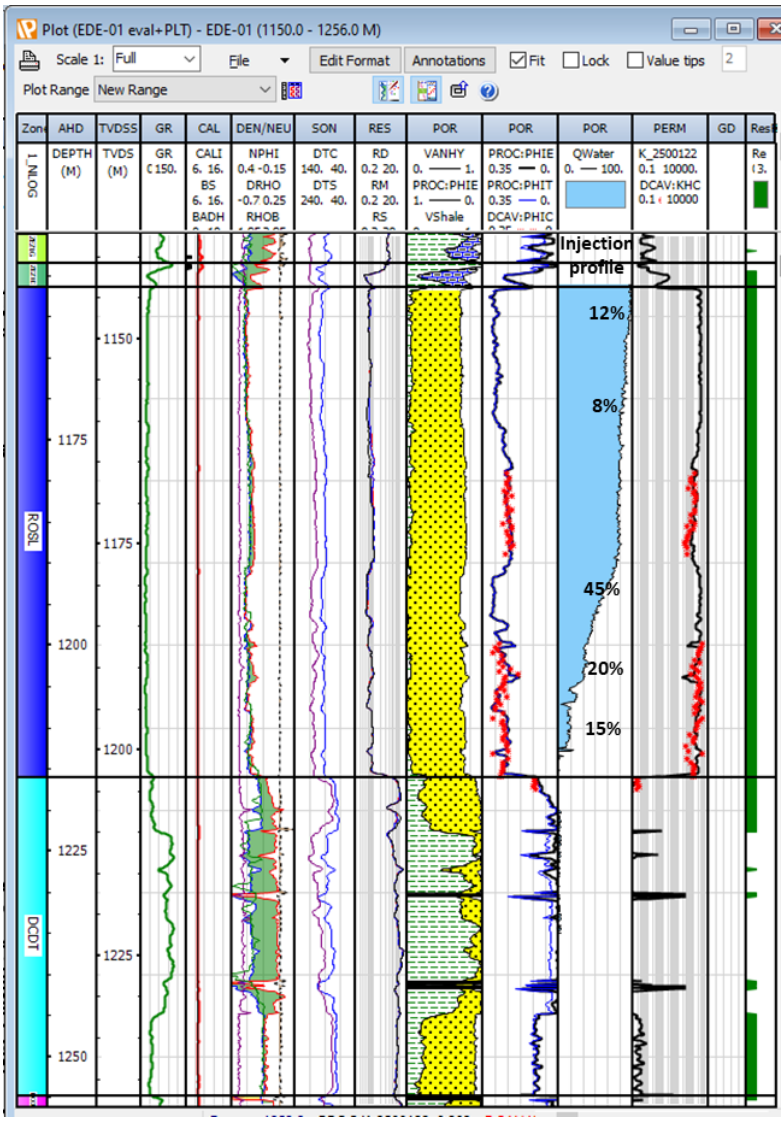
De gepubliceerde testresultaten (ter Borgh, et al., 2025) in het ROSL in AMS-01 leverden een KH op van 13 Dm en een gemiddelde (vloeistof) permeabiliteit van 120 mD (voor een netto dikte reservoir van 111 m). De resultaten afgeleid uit log-/kerngegevens in dit werk leverden in situ schattingen op van respectievelijk 340 mD en 125 mD voor de gas- en vloeistofpermeabiliteit.

De gepubliceerde resultaten van de boortests voor EDE-01 geven KH-waarden van 70-90 Dm voor de Slochteren-formatie (ROSL), wat een gemiddelde permeabiliteit oplevert van 1180 – 1510 mD (ter Borgh, et al., 2025). De uit loggegevens afgeleide gemiddelde in-situ gas- en vloeistofpermeabiliteiten zijn respectievelijk 2443 mD en 1301 mD.

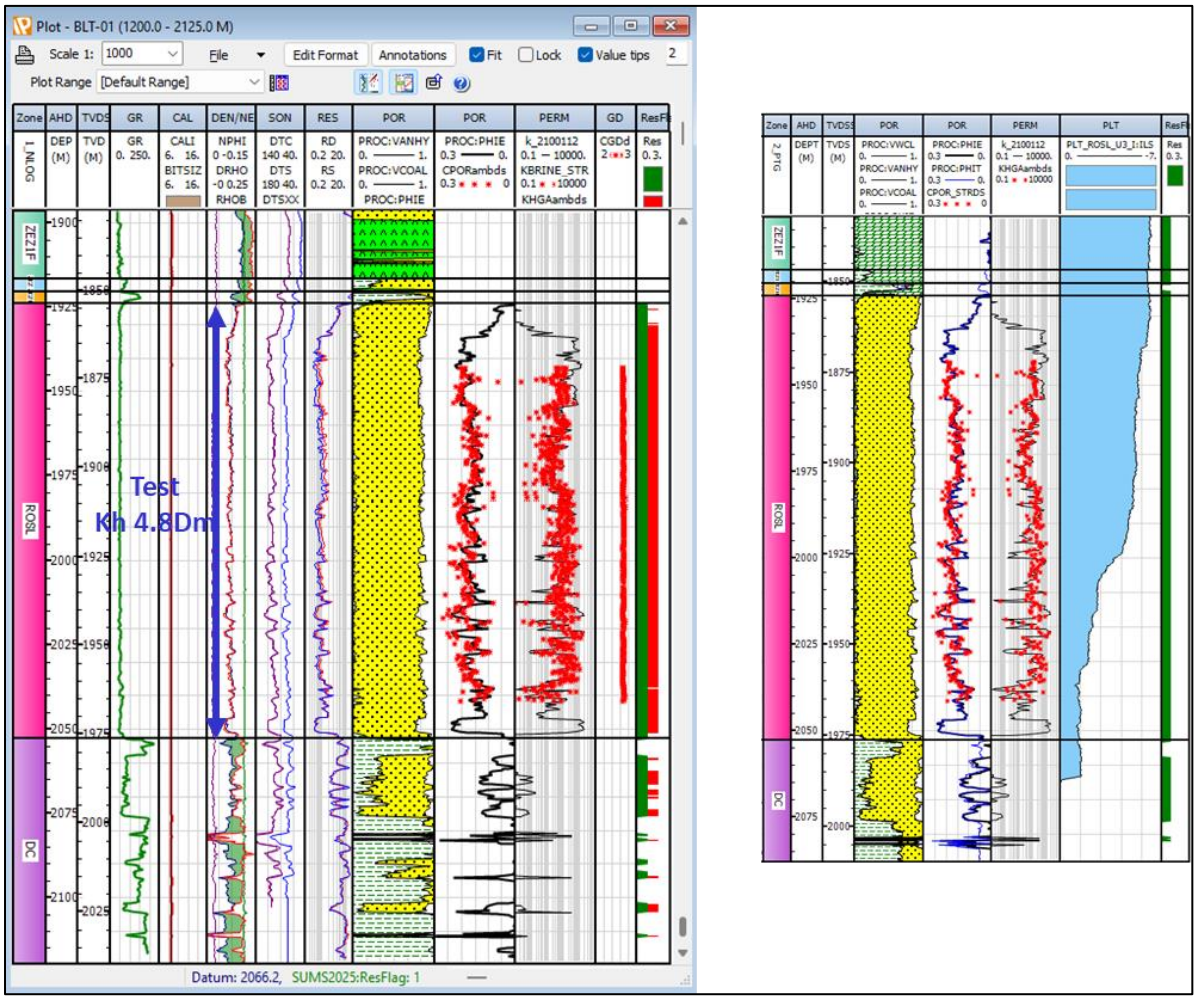
In EDE-01 werd ook het Zechstein 1 Randcarbonaat Laagpakket getest, maar er werd geen boorkern genomen. Er werd een permeabiliteit-dikte (KH) van 4-6 Dm geïnterpreteerd, wat een gemiddelde permeabiliteit van 150-224 mD opleverde (ter Borgh, et al., 2025). Er is geen betrouwbare schatting van de permeabiliteit voor brijn uit boorkern/putlogs beschikbaar vanwege het gebrek aan kerngegevens in deze eenheid in het studiegebied.

Productiemetingen werden uitgevoerd in AMS-01, BLT-01 en EDE-01 als onderdeel van de testprogramma's voor de ROSL en de resultaten tonen aan dat de injectiviteit niet uniform is in de formatie. Het injectieprofiel voor de ROSL in EDE-01 wordt weergegeven in Figuur 3-22 en dat voor BLT-10 in Figuur 3-23. In EDE-01 kan worden waargenomen dat 80% van de vloeistof wordt opgenomen door de zones met een hogere porositeit in de onderste laag van de ROSL, met een beperkte injectie in het

bovenste derde deel van de ROSL. Een soortgelijk resultaat is zichtbaar in BLT-01, waar het grootste deel van de injectie plaatsvindt in een korte zone net onder 2000 mD. Dit duidt op heterogeniteit op reservoirschaal in de ROSL die niet zichtbaar zijn op boorkernschaal en die de injectiviteit zowel versterken als vertragen.




**Figuur 3-22: Logplot van ROSL-interval (Formatie van Slochteren) in EDE-01 met open boorgatlogs track 4-8, geëvalueerde lithologietrack 9, porositeitstrack 10, PLT-injectieprofiel tijdens puttest track 11 en permeabiliteitstrack 12. Injectiepercentage per interval weergegeven in track 11.**




**Figuur 3-23: Logplot van ROSL-interval (Formatie van Slochteren) in BLT-01 waarbij het geteste interval (118 m) en geïnterpreteerde Kh links worden weergegeven, en rechterkant weergeeft PLT-injectieprofiel tijdens de test.**

Geen van de legacy putten in het onderzoeksgebied heeft productiegegevens. De analyse voor productiedata is dus gebaseerd op slechts 3 putten.

## 3.7 Resultaten en Evaluatie van de Data-analyse

De gemiddelde eigenschappen van de lagen voor de belangrijkste doelreservoirs, berekend als het gemiddelde van de individuele putgemiddelden per laag, worden weergegeven in Tabel 3-2. De gemiddelden per laag voor de individuele putten/stratigrafische eenheden worden weergegeven in Tabel 3-3 tot en met Tabel 3-6. De volledige reservoirdata voor alle lagen per put zijn te vinden in bijlage A.

| Stratigraphic Unit | Formation | Net | N/G | Av Phi | Av Sw | Av Vcl | Av DTC | Av Khg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | m | % | v/v | v/v | v/v | us/ft | mD |
| RNROF | Rot Fringe | 34.7 | 0.72 | 0.085 | 0.877 | 0.173 | 71.6 | 40.03 |
| RBMDU | Upper Detfurth | 18.8 | 0.78 | 0.098 | 0.925 | 0.154 | 71.1 | 34.84 |
| RBMDL | Lower Detfurth | 11.6 | 0.94 | 0.080 | 0.960 | 0.138 | 69.1 | 43.12 |
| RBMVU | Upper Volpriehausen | 53.7 | 0.82 | 0.076 | 0.975 | 0.151 | 68.2 | 19.68 |
| RBMVL | Lower Volpriehausen | 19.4 | 0.73 | 0.062 | 0.967 | 0.182 | 68.0 | 12.90 |
| ROSL | Slochteren | 68.1 | 0.97 | 0.111 | 0.959 | 0.076 | 71.4 | 195.34 |

**Tabel 3-2: Gemiddelde petrofysische eigenschappen (Phi, Sw, Vclay & permeabiliteit) per hoofdreservoirlaag op basis van individuele gemiddelden per laag van afzonderlijke putten, met een drempelwaarde van Vshale <50% cut-off**

| Well | Stratigraphic Unit | Top mTVDss | Bottom mTVDss | Gross m | Net m | N/G % | Av Phi v/v | Av Sw v/v | Av Vcl v/v | Av DTC us/ft | Av Khg mD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BLT-01 | RNROF | 1292.62 | 1309.74 | 17.12 | 8.37 | 0.489 | 0.129 | 0.847 | 0.082 | 77.401 | 76.714 |
| MOL-02-S2 | RNROF | 2579.13 | 2594.46 | 15.33 | $$13.71 | 0.894 | 0.046 | 0.999 | 0.112 | 87.548 | 0.062 |
| WED-03 | RNROF | 2790.43 | 2849.6 | 59.17 | 53.36 | 0.902 | 0.069 | 0.439 | 0.12 | 66.056 | 1.179 |
| BUM-01 | RNROF | 1272.7 | 1311.12 | 38.4 | 18.17 | 0.473 | 0.113 | 1 | 0.273 | 79.37 | 29.373 |
| EVD-01 | RNROF | 1146.49 | 1191.42 | 44.97 | 12.47 | 0.277 | 0.151 | 0.793 | 0.31 | 68.349 | 57.357 |
| WAA-01-S1 | RNROF | 2633.36 | 2684.23 | 50.82 | 38.27 | 0.753 | 0.08 | 0.978 | 0.176 | 64.843 | 2.651 |
| PKP-01 | RNROF | 1719.55 | 1761.07 | 41.45 | 39.52 | 0.953 | 0.06 | 0.842 | 0.153 | 70.536 | 10.143 |
| HST-02-S1 | RNROF | 1772.93 | 1806.54 | 33.6 | 26.22 | 0.78 | 0.038 | 0.867 | 0.167 | 66.893 | 0.093 |
| WLK-01 | RNROF | 1794.56 | 1864.45 | 69.88 | 59.23 | 0.848 | 0.072 | 0.998 | 0.199 | 67.85 | 12.488 |
| KWK-01 | RNROF | 2293.13 | 2336.53 | 43.38 | 42.23 | 0.973 | 0.018 | 0.986 | 0.065 | 61.376 | 0.008 |
| MRK-01 | RNROF | 1904.91 | 1981.19 | 76.24 | 40.47 | 0.531 | 0.061 | 0.899 | 0.2 | 67.843 | 0.482 |
| WGD-01 | RNROF | 1608.4 | 1662.45 | 54.06 | 43.74 | 0.809 | 0.182 | 0.874 | 0.221 | 80.661 | 289.783 |

**Tabel 3-3: Petrofysische gemiddelden per put in het beoogde reservoir RNROF met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, water saturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit.**

| Well | Stratigraphic Unit | Top mTVDss | Bottom mTVDss | Gross m | Net m | N/G % | Av Phi v/v | Av Sw v/v | Av Vcl v/v | Av DTC us/ft | Av Khg mD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WED-03 | RBMDU | 2922.7 | 2954.53 | 31.82 | 29.54 | 0.928 | 0.153 | 0.824 | 0.092 | 75.427 | 47.95 |
| BUM-01 | RBMDU | 1388.76 | 1409.76 | 21.07 | 12 | 0.57 | 0.088 | 1 | 0.226 | 73.505 | 0.85 |
| WAA-01-S1 | RBMDU | 2762.9 | 2795.86 | 32.89 | 19.67 | 0.598 | 0.061 | 0.992 | 0.157 | 64.456 | 0.049 |
| KWK-01 | RBMDU | 2428.14 | 2452.61 | 24.56 | 22.68 | 0.924 | 0.029 | 0.978 | 0.143 | 63.452 | 0.039 |
| WGD-01 | RBMDU | 1712.21 | 1723.17 | 10.96 | 9.86 | 0.9 | 0.159 | 0.83 | 0.154 | 78.591 | 125.325 |
| MOL-02-S2 | RBMDL | 2691.45 | 2701.91 | 10.45 | 10.45 | 1 | 0.041 | 1 | 0.126 | 64.295 | 0.001 |
| LNH-01 | RBMDL | 1464.57 | 1470.99 | 6.41 | 6.22 | 0.969 | 0.166 | 1 | 0.2 | 90.564 | 269.711 |
| WED-03 | RBMDL | 2954.53 | 2970.44 | 15.91 | 15.91 | 1 | 0.088 | 0.891 | 0.117 | 69.714 | 0.48 |
| BUM-01 | RBMDL | 1409.76 | 1413.67 | 3.84 | 3.45 | 0.899 | 0.114 | 1 | 0.178 | 74.862 | 2.592 |
| EVD-01 | RBMDL | 1364 | 1370.98 | 6.97 | 6.97 | 1 | 0.005 | 1 | 0.098 | 58.786 | 0 |
| JUT-01 | RBMDL | 1160.72 | 1174.57 | 13.78 | 13.18 | 0.956 | 0.024 | 0.98 | 0.13 | 63.092 | 0.011 |
| WAA-01-S1 | RBMDL | 2795.86 | 2805.74 | 9.97 | 9.97 | 1 | 0.073 | 1 | 0.151 | 65.66 | 0.721 |
| HST-02-S1 | RBMDL | 1885.47 | 1894.35 | 8.87 | 8.87 | 1 | 0.054 | 0.932 | 0.131 | 65.767 | 0.011 |
| WLK-01 | RBMDL | 1952.86 | 1968.7 | 15.85 | 10.15 | 0.64 | 0.063 | 0.906 | 0.254 | 64.082 | 13.69 |
| KWK-01 | RBMDL | 2452.61 | 2496.07 | 43.43 | 38.97 | 0.897 | 0.035 | 0.983 | 0.101 | 62.854 | 0.04 |
| MRK-01 | RBMDL | 2060.9 | 2070.5 | 9.69 | 9.69 | 1 | 0.13 | 0.969 | 0.067 | 70.794 | 15.223 |
| WGD-01 | RBMDL | 1723.17 | 1729.14 | 5.98 | 5.83 | 0.975 | 0.171 | 0.863 | 0.097 | 78.203 | 214.976 |

**Tabel 3-4: Petrofysische gemiddelden per put in het doelreservoir RBMD met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, watersaturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit.**

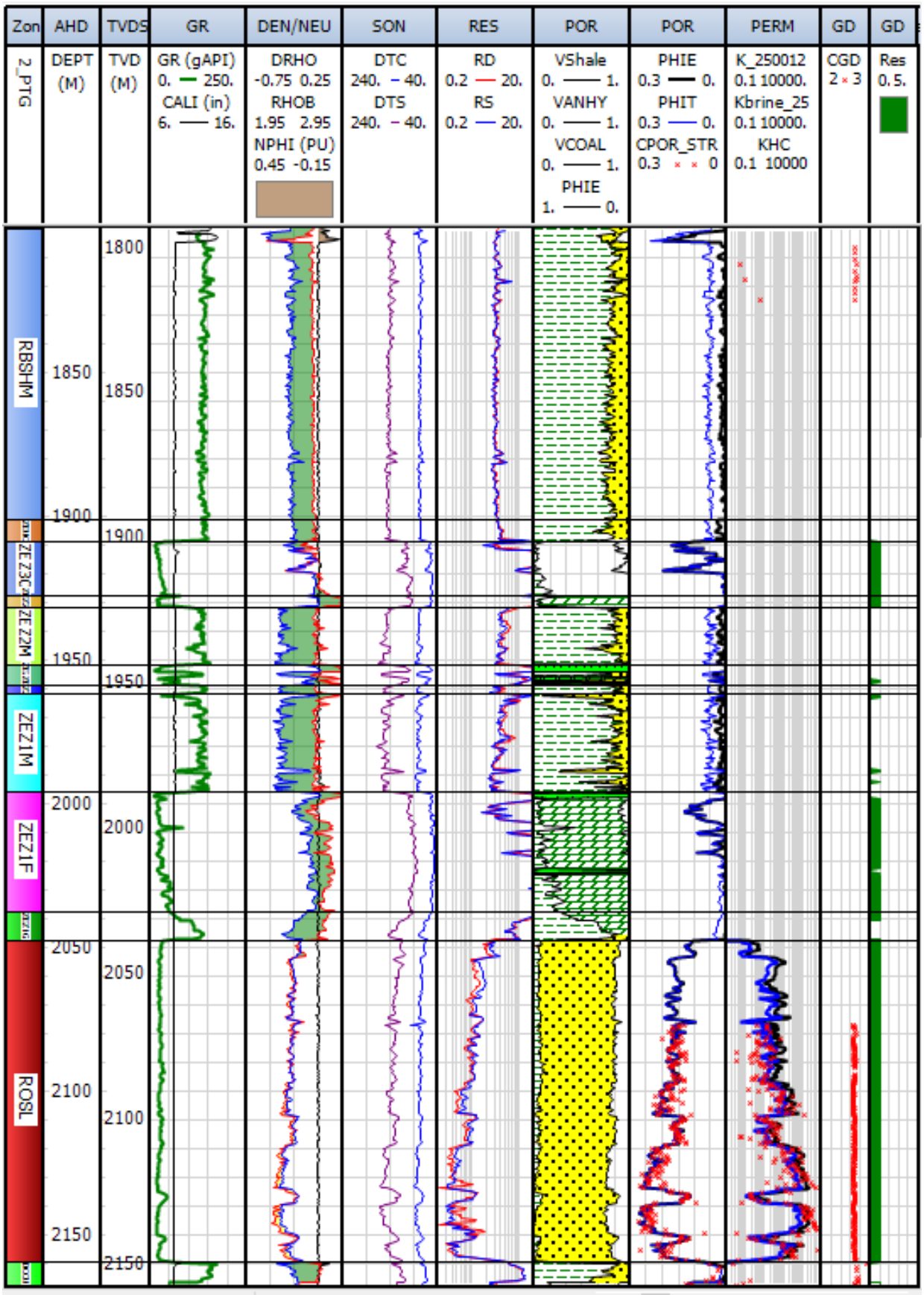
| Well | Stratigraphic Unit | Top mTVDss | Bottom mTVDss | Gross m | Net m | N/G % | Av Phi v/v | Av Sw v/v | Av Vcl v/v | Av DTC us/ft | Av Khg mD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BLT-01 | RBMVU | 1393.47 | 1454.7 | 61.23 | 39.24 | 0.641 | 0.149 | 0.97 | 0.189 | 80.653 | 70.439 |
| HEE-01 | RBMVU | 1892.73 | 1953.67 | 60.94 | 35.56 | 0.584 | 0.133 | 1 | 0.219 | 77.046 | 11.874 |
| MOL-02-S2 | RBMVU | 2701.91 | 2772.6 | 70.7 | 69.43 | 0.982 | 0.023 | 0.988 | 0.124 | 60.026 | 0 |
| WED-03 | RBMVU | 2970.44 | 3046.02 | 75.58 | 73.69 | 0.975 | 0.059 | 0.905 | 0.112 | 64.174 | 0.126 |
| BUM-01 | RBMVU | 1413.67 | 1524.25 | 110.57 | 65.5 | 0.592 | 0.096 | 0.997 | 0.187 | 72.968 | 6.265 |
| HST-02 | RBMVU | 1971.2 | 1999.88 | 28.58 | 21.53 | 0.753 | 0.012 | 0.991 | 0.188 | 62.449 | 0.001 |
| WAA-01-S1 | RBMVU | 2805.74 | 2865.58 | 59.8 | 52.06 | 0.87 | 0.054 | 1 | 0.094 | 62.596 | 0.014 |
| HST-02-S1 | RBMVU | 1894.35 | 1933.24 | 38.89 | 38.09 | 0.98 | 0.049 | 0.964 | 0.181 | 68.472 | 0.002 |
| KWK-01 | RBMVU | 2496.07 | 2542.39 | 46.25 | 39.92 | 0.863 | 0.004 | 1 | 0.095 | 57.731 | 0 |
| MRK-01 | RBMVU | 2070.5 | 2153.24 | 82.68 | 68.23 | 0.825 | 0.085 | 0.972 | 0.16 | 66.749 | 1.528 |
| WGD-01 | RBMVU | 1729.14 | 1818.86 | 89.72 | 87.38 | 0.974 | 0.168 | 0.943 | 0.108 | 77.414 | 126.236 |
| BLT-01 | RBMVL | 1454.7 | 1483.66 | 28.96 | 20.33 | 0.702 | 0.123 | 0.93 | 0.17 | 77.465 | 77.989 |
| HEE-01 | RBMVL | 1953.67 | 1999.71 | 46.04 | 38.95 | 0.846 | 0.126 | 1 | 0.229 | 76.347 | 10.267 |
| MOL-02-S2 | RBMVL | 2772.6 | 2807.23 | 34.62 | 33.23 | 0.96 | 0.025 | 0.983 | 0.117 | 59.22 | 0 |
| LNH-01 | RBMVL | 1542.67 | 1552.43 | 9.76 | 8 | 0.82 | 0.146 | 1 | 0.167 | 84.911 | 150.7 |
| WED-03 | RBMVL | 3046.02 | 3086.8 | 40.78 | 38.44 | 0.943 | 0.043 | 0.974 | 0.181 | 61.774 | 0.013 |
| ALE-01 | RBMVL | 1247.91 | 1268.17 | 20.19 | 11.42 | 0.566 | 0.145 | 0.95 | 0.262 | 86.689 | 47.755 |
| ARV-01 | RBMVL | 2080.86 | 2110.99 | 30.15 | 29.65 | 0.983 | 0.044 | 0.988 | 0.114 | 64.441 | 0.398 |
| BNV-01-S1 | RBMVL | 1739.87 | 1771.4 | 31.52 | 24.85 | 0.788 | 0.075 | 0.915 | 0.161 | 67.701 | 0.779 |
| BUM-01 | RBMVL | 1524.25 | 1561.94 | 37.75 | 24.62 | 0.652 | 0.098 | 0.988 | 0.157 | 72.078 | 32.045 |
| DRO-01 | RBMVL | 1770.97 | 1775.08 | 4 | 2.74 | 0.686 | 0 | 1 | 0.27 | 61.104 | 0 |
| DSP-01 | RBMVL | 1582.63 | 1591.62 | 9 | 6.86 | 0.762 | 0.028 | 1 | 0.241 | 63.851 | 0 |
| EPE-01 | RBMVL | 1264.53 | 1270.63 | 6 | 1.68 | 0.279 | 0.069 | 1 | 0.296 | 68.582 | 0.109 |
| ERM-01-S1 | RBMVL | 1972.67 | 1977.32 | 4.63 | 2.25 | 0.486 | 0 | 1 | 0.254 | 57.646 | 0 |
| EVD-01 | RBMVL | 1431.82 | 1459.06 | 27.21 | 22.49 | 0.827 | 0.011 | 0.977 | 0.108 | 58.875 | 0.001 |
| HST-02 | RBMVL | 1999.88 | 2021.69 | 21.86 | 20.46 | 0.936 | 0.03 | 0.977 | 0.076 | 60.982 | 0 |
| JUT-01 | RBMVL | 1261.75 | 1281.82 | 20.05 | 17.39 | 0.867 | 0.079 | 0.84 | 0.107 | 68.743 | 0.904 |
| JUT-01 | RBMVL_2 | 2816.2 | 2836.34 | 20.16 | 15.65 | 0.776 | 0.044 | 0.711 | 0.101 | 62.397 | 13.508 |
| LSM-01 | RBMVL | 1005.76 | 1014.14 | 8.4 | 1.68 | 0.2 | 0.107 | 0.981 | 0.321 | 81.465 | 1.161 |
| LVD-01 | RBMVL | 393.81 | 405.85 | 12 | 1.22 | 0.102 | 0.127 | 0.985 | 0.335 | 83.85 | 4.01 |
| OFL-01 | RBMVL | 1739.83 | 1746.23 | 6.4 | 3.85 | 0.602 | 0.011 | 1 | 0.238 | 65.057 | 0 |
| SPL-01-S1 | RBMVL | 1830.46 | 1848.27 | 17.81 | 15.64 | 0.878 | 0.04 | 0.968 | 0.106 | 63.917 | 0.698 |
| WAA-01-S1 | RBMVL | 2865.58 | 2928.46 | 62.78 | 54.28 | 0.865 | 0.051 | 0.997 | 0.146 | 62.168 | 0.014 |
| WRV-01 | RBMVL | 1835.04 | 1839.09 | 4.01 | 3.6 | 0.899 | 0.074 | 0.988 | 0.161 | 69.253 | 0.426 |
| WSK-01 | RBMVL | 452.24 | 467.32 | 14.99 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| WSP-01 | RBMVL | 1912.73 | 1917 | 4.2 | 3.65 | 0.871 | 0.024 | 1 | 0.096 | 62.599 | 0 |
| WYH-01 | RBMVL | 1236.9 | 1244.06 | 7.11 | 2.29 | 0.321 | 0 | 1 | 0.235 | 64.916 | 0 |
| WEP-01 | RBMVL | 1105.85 | 1114.83 | 9 | 4.01 | 0.446 | 0.093 | 1 | 0.207 | 77.019 | 3.139 |
| PKP-01 | RBMVL | 1871.54 | 1905.04 | 33.43 | 29.8 | 0.891 | 0.027 | 0.98 | 0.153 | 60.851 | 0.011 |
| HST-02-S1 | RBMVL | 1933.24 | 1965.82 | 32.58 | 31.66 | 0.972 | 0.042 | 0.993 | 0.144 | 66.11 | 0.009 |
| WLK-01 | RBMVL | 2022.4 | 2055.08 | 32.65 | 25.16 | 0.771 | 0.067 | 0.939 | 0.211 | 62.627 | 10.121 |
| KWK-01 | RBMVL | 2542.39 | 2599.89 | 57.54 | 55.1 | 0.958 | 0.003 | 1 | 0.125 | 58.21 | 0 |
| MRK-01 | RBMVL | 2153.24 | 2191.01 | 37.74 | 32.27 | 0.855 | 0.094 | 0.921 | 0.139 | 65.911 | 1.49 |
| BKH-01 | RBMVL | 947.04 | 971.8 | 24.72 | 15.42 | 0.624 | 0.053 | 1 | 0.277 | 72.203 | 0.091 |
| WGD-01 | RBMVL | 1818.86 | 1863.76 | 44.9 | 42.9 | 0.956 | 0.154 | 0.942 | 0.103 | 74.309 | 70.078 |

**Tabel 3-5: Petrofysische gemiddelden per laag in beoogde reservoirs RBMV met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, watersaturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit.**

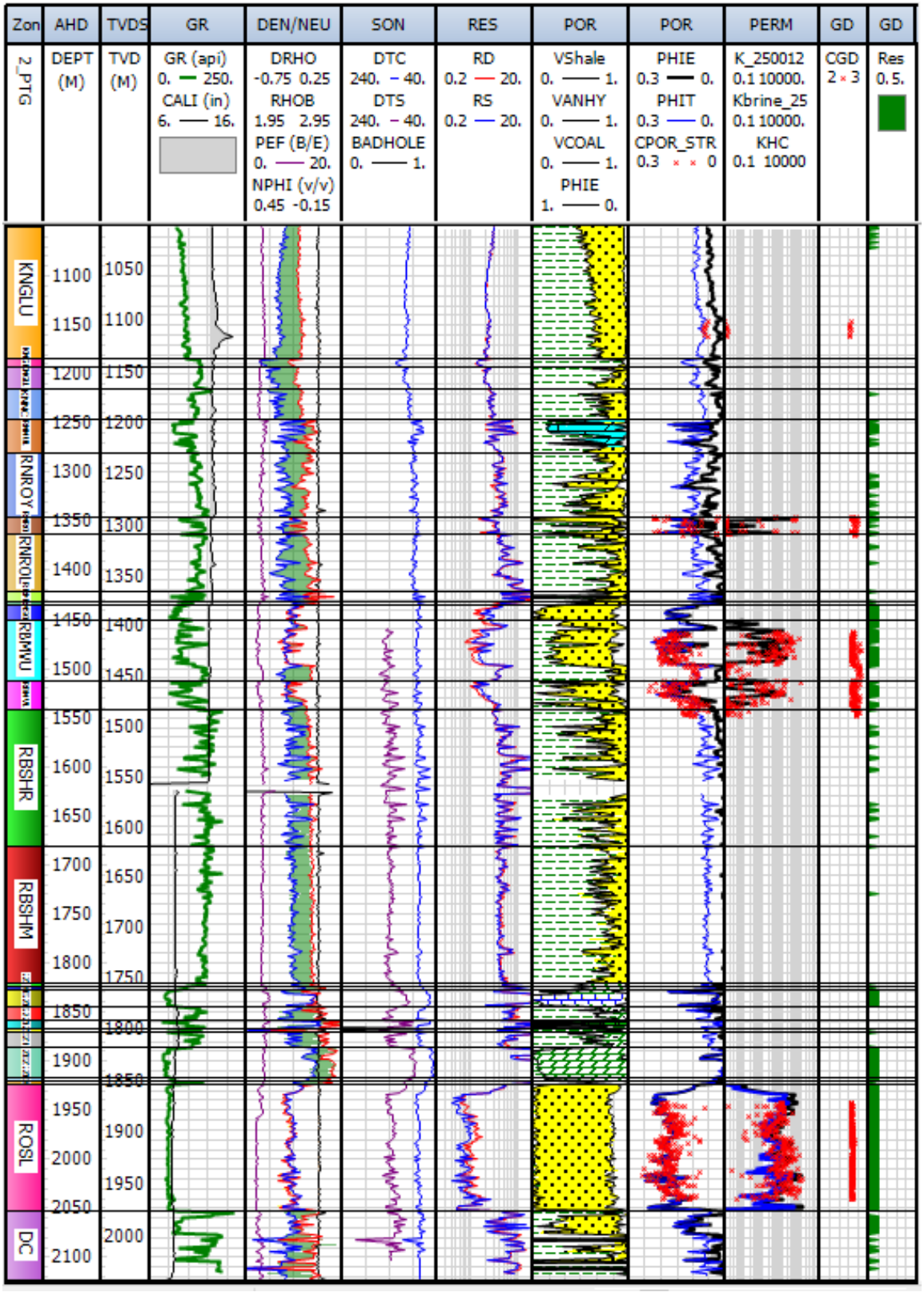
| Well | Stratigraphic Unit | Top mTVDss | Bottom mTVDss | Gross m | Net m | N/G % | Av Phi v/v | Av Sw v/v | Av Vcl v/v | Av DTC us/ft | Av Khg mD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BLT-01 | ROSL | 1853.86 | 1976.24 | 122.38 | 122.38 | 1 | 0.173 | 0.884 | 0.021 | 78.209 | 183.003 |
| AMS-01 | ROSL | 2038.93 | 2149.82 | 110.89 | 110.84 | 1 | 0.18 | 0.991 | 0.035 | 77.12 | 348.159 |
| HEE-01 | ROSL | 2450.59 | 2459.03 | 8.45 | 8.45 | 1 | 0.12 | 1 | 0.019 | 69.093 | 10.664 |
| EDE-01 | ROSL | 1143.76 | 1203.25 | 59.5 | 59.5 | 1 | 0.261 | 0.998 | 0.027 | 92.778 | 2498.617 |
| MOL-02-S2 | ROSL | 2956.74 | 2964.52 | 7.77 | 7.73 | 0.994 | 0.03 | 0.988 | 0.174 | 73.133 | 0.024 |
| LNH-01 | ROSL | 2213.48 | 2249.73 | 36.26 | 36.21 | 0.999 | 0.149 | 1 | 0.069 | 77.544 | 118.19 |
| ALE-01 | ROSL | 1732.92 | 1855.11 | 122.16 | 122.16 | 1 | 0.118 | 1 | 0.106 | 71.564 | 10.692 |
| ARV-01 | ROSL | 2392.25 | 2465.94 | 73.69 | $$73.46 | 0.997 | 0.156 | 1 | 0.003 | 73.491 | 47.968 |
| BNV-01-S1 | ROSL | 2168.75 | 2251.46 | 82.64 | 82.64 | 1 | 0.078 | 0.929 | 0.052 | 65.005 | 0.905 |
| BUM-01 | ROSL | 2055.53 | 2130.01 | 74.45 | 74.45 | 1 | 0.093 | 0.982 | 0.077 | 68.258 | 9.38 |
| DRO-01 | ROSL | 2186.56 | 2327.07 | 140.5 | $$61.52 | 0.438 | 0.088 | 0.983 | 0.054 | 68.66 | 3.852 |
| DSP-01 | ROSL | 2255.24 | 2369.53 | 114.29 | 111.08 | 0.972 | 0.083 | 0.822 | 0.073 | 66.045 | 2.147 |
| DSP-02 | ROSL | 1645.49 | 1794.99 | 149.41 | 146.66 | 0.982 | 0.11 | 0.986 | 0.117 | 71.976 | 58.77 |
| EPE-01 | ROSL | 1744.9 | 1813.17 | 68.2 | 68.04 | 0.998 | 0.089 | 0.986 | 0.066 | 69.367 | 5.431 |
| ERM-01-S1 | ROSL | 2574.44 | 2601.82 | 27.34 | $$24.48 | 0.896 | 0.031 | 0.995 | 0.077 | 60.192 | 0.012 |
| EVD-01 | ROSL | 1776.38 | 1852.87 | 76.42 | 76.23 | 0.997 | 0.086 | 0.956 | 0.074 | 60.196 | 3.348 |
| HST-02 | ROSL | 2214.85 | 2239.62 | 24.7 | $$24.30 | 0.984 | 0.086 | 0.824 | 0.045 | 66.465 | 18.98 |
| JUT-01 | ROSL | 1648.8 | 1774.23 | 125.34 | 125.15 | 0.999 | 0.098 | 0.924 | 0.078 | 69.602 | 12.126 |
| JUT-01 | ROSL_2 | 3154.91 | 3287.46 | 132.58 | 132.58 | 1 | 0.07 | 0.972 | 0.07 | 65.535 | 1.104 |
| LSM-01 | ROSL | 1449.6 | 1644.94 | 195.26 | 195.26 | 1 | 0.172 | 0.98 | 0.057 | 81.489 | 283.705 |
| LVD-01 | ROSL | 1027.13 | 1063.84 | 36.72 | 36.72 | 1 | 0.158 | 1 | 0.09 | 75.865 | 65.315 |
| NVG-01 | ROSL | 1085.59 | 1103.72 | 18 | 18 | 1 | 0.278 | 0.94 | 0.097 | 103.09 | 3264.112 |
| OFL-01 | ROSL | 2335.72 | 2387.68 | 51.99 | $$48.95 | 0.942 | 0.026 | 0.99 | 0.076 | 61.816 | 0.015 |
| SPL-01-S1 | ROSL | 2089.43 | 2195.35 | 105.96 | 105.96 | 1 | 0.129 | 0.991 | 0.054 | 74.11 | 48.264 |
| WAA-01-S1 | ROSL | 3144.44 | 3179.69 | 35.2 | 35.16 | 0.999 | 0.068 | 0.999 | 0.069 | 63.961 | 2.933 |
| WRV-01 | ROSL | 2196.88 | 2207.63 | 10.73 | 10.73 | 1 | 0.088 | 0.984 | 0.052 | 66.629 | 1.69 |
| WSK-01 | ROSL | 1240.49 | 1243.53 | 3 | 1.7 | 0.568 | 0.019 | 1 | 0.252 | 65.577 | 0.006 |
| WSP-01 | ROSL | 2185.7 | 2190.72 | 4.99 | 4.91 | 0.984 | 0.067 | 0.732 | 0.084 | 64.755 | 0.245 |
| WYH-01 | ROSL | 1705.99 | 1759.48 | 53.47 | 53.47 | 1 | 0.125 | 0.999 | 0.057 | 73.242 | 35.632 |
| RLO-01 | ROSL | 755.49 | 772.41 | 16.8 | 16.61 | 0.989 | 0.16 | 0.902 | 0.087 | 79.711 | 145.697 |
| JPE-01 | ROSL | 865.4 | 901.27 | 35.89 | 35.89 | 1 | 0.128 | 0.964 | 0.05 | 72.063 | 30.643 |
| WEP-01 | ROSL | 1536.48 | 1639.46 | 102.95 | 102.91 | 1 | 0.193 | 0.932 | 0.08 | 81.367 | 463.268 |
| IJD-01 | ROSL | 2252.41 | 2338.02 | 85.66 | 85.66 | 1 | 0.144 | 0.996 | 0.118 | 73.708 | 50.817 |
| PKP-01 | ROSL | 2199.29 | 2263.41 | 64.12 | 64.12 | 1 | 0.062 | 0.99 | 0.07 | 62.885 | 0.322 |
| HST-02-S1 | ROSL | 2169.97 | 2231.45 | 61.49 | 61.49 | 1 | 0.067 | 0.989 | 0.064 | 64.156 | 0.234 |
| WLK-01 | ROSL | 2299.02 | 2359.33 | 60.17 | 60.17 | 1 | 0.073 | 0.99 | 0.062 | 65.885 | 0.412 |
| KWK-01 | ROSL | 2864.33 | 2911.42 | 47.1 | 47.1 | 1 | 0.025 | 0.999 | 0.039 | 59.553 | 0.015 |
| BLA-01-S1 | ROSL | 1443.4 | 1562.29 | 118.77 | 118.63 | 0.999 | 0.183 | 0.989 | 0.087 | 80.645 | 275.497 |
| MRK-01 | ROSL | 2403.94 | 2485.93 | 81.99 | 81.99 | 1 | 0.093 | 0.973 | 0.06 | 67.513 | 1.234 |
| BKH-01 | ROSL | 1504.85 | 1528.51 | 23.65 | 23.19 | 0.981 | 0.093 | 0.986 | 0.109 | 70.011 | 2.92 |
| WGD-01 | ROSL | 2045.56 | 2056.54 | 10.99 | 9.54 | 0.868 | 0.094 | 0.777 | 0.159 | 74.015 | 2.794 |

**Tabel 3-6: Petrofysische gemiddelden per laag in beoogde reservoirs ROSL met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, watersaturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit. $$ geeft aan dat er een incompleet data-interval is.**

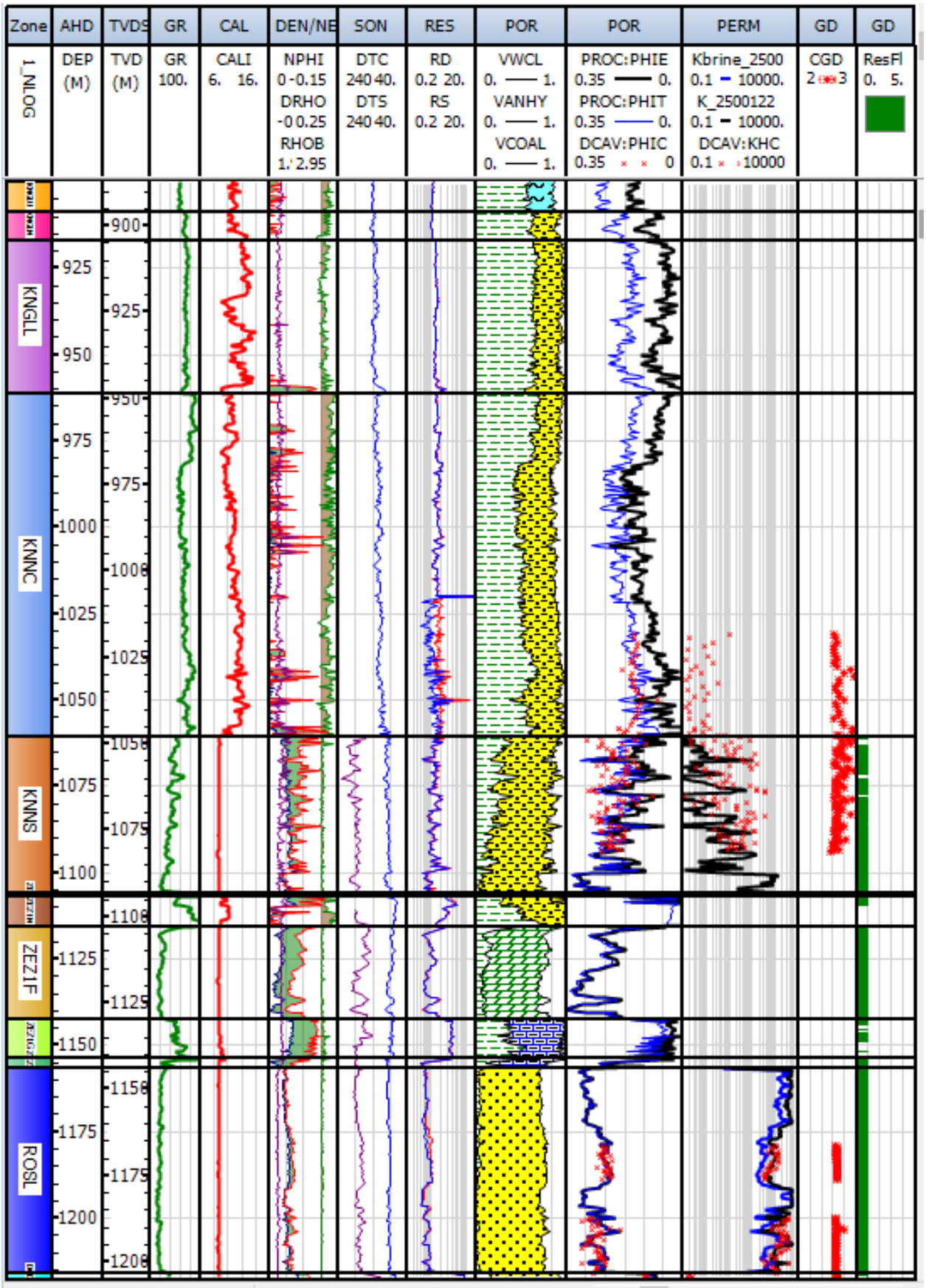
De evaluatieresultaten voor geselecteerde putten worden weergegeven als boorprofielen in Appendix nn. De resultaten voor de recente SCAN-putten AMS-01, BLT-01 en EDE-01 worden weergegeven in respectievelijk Figuur 3-24 tot en met Figuur 3-26.




**Figuur 3-24: Logplot met evaluatieresultaten voor SCAN-put AMS-01 in het belangrijkste Formatie van Slochteren-interval. Tracks 1-3 tonen zones, gemeten diepte en TVDss, tracks 4-7 bewerkte logs, track 8 lithologie, track 9 log/boorkernporositeit, track 10 log/boorkernpermeabiliteit, track 11 korrel dichtheid van de boorkern en track 12 netto reservoirindicator.**




**Figuur 3-25: Logplot met evaluatieresultaten voor SCAN-put BLT-01 Rijnland tot Rotliegend Groepen. Tracks 1-3 tonen zones, gemeten diepte en TVDss, tracks 4-7 bewerkte logs, track 8 lithologie, track 9 log/boorkernporositeit, track 10 log/ boorkernpermeabiliteit, track 11 korrel dichtheid van de boorkern en track 12 netto reservoirindicator.**




**Figuur 3-26: Logplot met evaluatieresultaten voor SCAN-put EDE-01. Tracks 1-3 tonen zones, gemeten diepte en TVDss, tracks 4-7 bewerkte logs, track 8 lithologie, track 9 log/boorkernporositeit, track 10 log/ boorkernpermeabiliteit.**

## 3.8 Beperkingen en onzekerheden methode

De onzekerheid van analyses op logs, zijn relatief laag, met name het porositeitsresultaat. Dat komt doordat de gegevens hiervan enkel komen van kerndata over de reservoirintervallen. Ook de onzekerheid over de kleivolumes is laag, aangezien de reservoirzones voor het grootste deel uit schone lithologieën bestaan. Hoewel dit niet het onderwerp van deze studie is, brengt analyse in ondiepere horizonten meer onzekerheid met zich mee, aangezien de kwaliteit en beschikbaarheid van boorgegevens afneemt en vaak alleen akoestische/GR-gegevens beschikbaar zijn.

De belangrijkste onzekerheden in de petrofysische analyse doen zich voor bij de verwerking en modellering van kerngegevens voor permeabiliteitsvoorspelling op logschaal. De onderliggende kerngegevens bestrijken meerdere decennia en er zijn dan ook inherente onzekerheden in het type en de kwaliteit van de metingen. Dit leidt tot spreiding in de gegevens, waarvan sommige mogelijk onjuist zijn, met als gevolg dat de robuustheid van elke regressie afneemt. Dit kan worden ondervangen door lage en hoge trends te schatten om het bereik van de onzekerheid te kwantificeren of door gegevens per porositeitsstap te binnen. Voor het laatste is voldoende gegevens over het porositeitsbereik nodig om statistisch betrouwbaar te zijn. De nieuwe SCAN-putgegevens zijn van onschatbare waarde gebleken bij het kalibreren van oude gegevens, met name bij in-situ spanningen en vloeistofpermeabiliteit.

Afgezien van meetonzekerheid ontstaan er nog meer onzekerheden wanneer faciesveranderingen kunnen leiden tot meer dan één mogelijke permeabiliteitstrend in een reservoir, wat mogelijk kan leiden tot een over- of onderschatting van de effectieve permeabiliteit van de laag. Hoewel significante faciesveranderingen niet onmiddellijk zichtbaar zijn in de beschikbare kerngegevens, althans in de ROSL, wijzen de resultaten van boortests en PLT's op heterogeniteit die niet in de kern te zien is.

De kwestie van schaalgrootte in de analyse, van boorkern tot reservoir, kan alleen worden aangepakt door alle beschikbare gegevens te integreren, waaronder boorlogs, afbeeldingen, boorkerngegevens en puttestgegevens.

De fout die gepaard gaat met de akoestische snelheidsverhogingsmethode werd in detail besproken in paragraaf 3.5.1 en is voornamelijk het gevolg van de niet-unieke uniforme begravingslijnen die kunnen worden gegenereerd.

## 3.9 Conclusies onderzoek reservoirkwaliteit

Er is een uitgebreide petrofysische dataset samengesteld om inputparameters te leveren ter ondersteuning van Petrel geothermische vermogenskaarten voor in totaal 44 putten in het onderzoeksgebied. De dataset omvat de dikte van het reservoir, de gemiddelde porositeit, de permeabiliteit (lucht en brijn), de watersaturatie en het kleigehalte voor elk van de beoogde stratigrafische eenheden.

De gegevens van de SCAN-putten hebben een onschatbare bron van informatie opgeleverd voor het ontwikkelen en beperken van de resultaten, met name wat betreft de permeabiliteitsmodellering.

# 4 Geothermische vermogenskaarten

Dit hoofdstuk beschrijft de technische stappen die gezet zijn voor het opstellen van de geothermische vermogenskaarten. Daarbij worden eerst de ondergrondse eigenschappen in kaart gebracht, op basis van de seismische interpretatie en analyse voor de reservoirkwaliteit. Alle gegevens worden vervolgens geïntegreerd in de vermogenskaarten.

## 4.1 Doelstelling kaarten ondergrondse eigenschappen

Er is een eigenschappenkaart gemaakt van de Slochteren-formatie en twee van de reservoirs binnen de Boven- en Onder- Germaans Trias Groepen (Onder Volpriehausen & Röt Randzandsteen Laagpakket) om de reservoir-eigenschappen in de provincies Utrecht en Gelderland en Regio Foodvalley te evalueren. Met deze kaart kan uiteindelijk het potentieel voor geothermisch vermogen worden berekend met behulp van een vergelijkbare methode als die van de DoubletCalc1D-tool van TNO. Vermogenskaarten worden gebruikt om kansrijke gebieden te identificeren die in aanmerking komen voor mogelijke ontwikkeling van geothermische energiebronnen, hoewel ze onzekerheid met zich meebrengen in verband met de gebruikte methoden en zorgvuldig moeten worden geanalyseerd. Voor de vermogensberekeningen worden meerdere eigenschappenkaarten gebruikt. De eigenschappenkaarten omvatten reservoirtemperatuur, porositeit, permeabiliteit, netto-brutoverhouding, bruto dikte, netto dikte, kaarten van de diepte bovenkant reservoir en kaarten van de maximale begravingsdiepte.

## 4.2 Inleiding verschillende ondergrondse eigenschappen

In het volgende hoofdstuk wordt beschreven hoe de verschillende kaarten met reservoirkenmerken het energiepotentieel van een geothermisch systeem kunnen beïnvloeden en hoe deze kaarten kunnen helpen bij de interpretatie ervan.

Het vermogen van een geothermische systeem is afhankelijk van of geothermische vloeistoffen/brijn met een hoge temperatuur om met voldoende stroomsnelheden door een gesteentelaag kunnen stromen om economisch rendabel te zijn, evenals van de temperatuur van de geproduceerde vloeistoffen in relatie tot de verschillende toepassingen (glastuinbouw, stadsverwarmingsnetten). Over het algemeen geldt dat hoe hoger de stroomsnelheid en het temperatuurverschil tussen de injectie- en productieput (uit de geothermische brijn gewonnen energie) zijn, hoe groter het geothermische vermogen in MW is.

De stroomsnelheid die een gesteentelaag kan bieden, hangt af van de kwaliteit van het reservoir, waarbij de belangrijkste variabelen de permeabiliteit en de netto dikte zijn. Deze twee worden gecombineerd tot één parameter: de transmissiviteit (permeabiliteit x netto dikte). De permeabiliteit is de mate waarin vloeistof gemakkelijk door een gesteentelaag kan stromen, terwijl de netto dikte het deel van het totale gesteente is dat kan bijdragen aan de stroming. De transmissiviteit is de snelheid waarmee de vloeistof door de sedimentaire gesteentelaag kan stromen en wordt berekend op basis van de permeabiliteit en de netto reservoirdikte. Zowel de permeabiliteit als de nettodikte moeten gunstig zijn voor een voor voldoende transmissiviteitswaarden en dus voor efficiënte winning van geothermische energie. In extreme gevallen, bijvoorbeeld als het reservoir een hoge nettodikte maar een lage permeabiliteit heeft, of een lage nettodikte en een hoge permeabiliteit, bestaat de kans op onvoldoende stroming en dus een lage transmissiviteitswaarde. Over het algemeen wordt een transmissiviteitswaarde van 10 Dm beschouwd als een minimumwaarde voor een succesvolle standaard geothermische doublet (Mijnlief et al., 2020). Er zijn echter nog twee andere factoren die deze waarde kunnen beïnvloeden: (1) de

‘doorbraaktijd van het koufront’, dat wil zeggen de tijd die het koude geïnjecteerde water nodig heeft om de productieput te bereiken met een afkoeling van 1 °C, en (2) de diepte van het reservoir (een grotere diepte verhoogt de boorkosten).

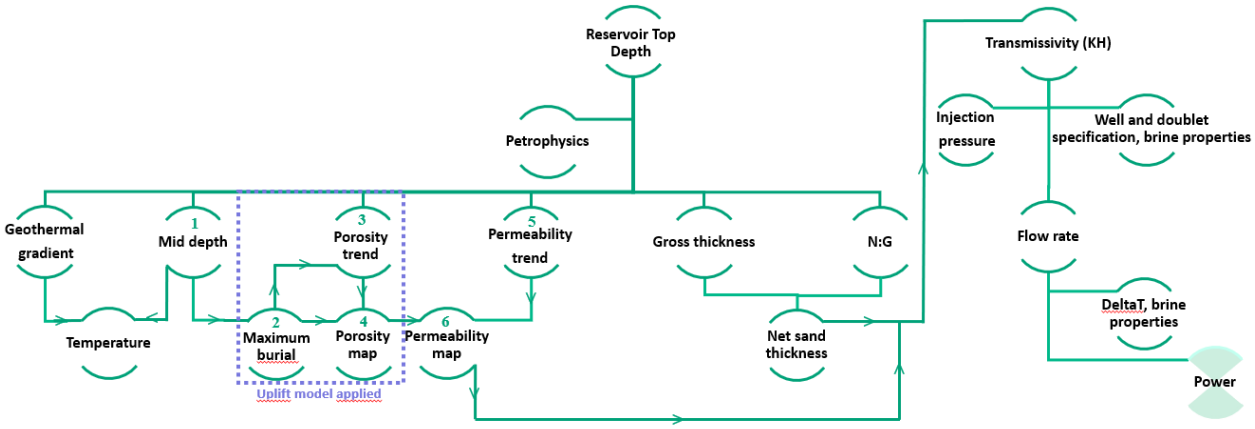
Andere factoren die van invloed zijn op het debiet van een geothermisch systeem zijn onder meer: de toegestane injectiedruk en de viscositeit van het injectiewater. De injectiedruk is beperkt om de kans op breukvorming in de bovenliggende afdichting te verkleinen, zodat verontreiniging van ondiepe watervoerende lagen wordt voorkomen en het risico op reactivering van breuken die geïnduceerde seismische activiteit kunnen veroorzaken, wordt verminderd. De werkdrukken worden gereguleerd door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). De toegestane injectiedruk aan het oppervlak wordt beperkt door de bovenste diepte van de injectieput en het verschil tussen de hydrostatische gradiënt minus de SodM-drukgradiënt van 0,135 bar/m. In het algemeen geldt dus dat hoe groter de reservoirdiepte, hoe groter de toegestane injectiedruk. Een hogere injectiedruk zou hogere stroomsnelheden mogelijk maken in een project voor een reservoir van een bepaalde kwaliteit. Deze benadering is enigszins conservatief.

De temperatuur in een geothermisch reservoir is afhankelijk van de geothermische gradiënt van de ondergrond. Nederland heeft een gemiddelde diepe geothermische gradiënt van 31 °C/km en een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 10 °C. Daarom kan de reservoirtemperatuur gemiddeld 30 - 70 °C bedragen op dieptes tussen respectievelijk 500 m en 2 km. De temperatuur van een reservoir kan een grote invloed hebben op de specifieke toepassingen van geothermische energie, variërend van glastuinbouw, de stedelijke omgeving en lichte industrie. In gevallen waarin de temperatuur van het geproduceerde water onvoldoende is voor direct gebruik, kan een warmtepomp nodig zijn om de warmte-energie op te waarderen voor toepassingen waarbij een hogere temperatuur vereist is. De hoeveelheid warmte-energie die uit de geothermische brijn wordt gewonnen, hangt voornamelijk af van de temperatuurdaling van de brijn aan de oppervlakte-installatie en de specifieke warmtecapaciteit. Als bijvoorbeeld het temperatuurverschil tussen de productieput en de injectieput toeneemt, neemt ook de hoeveelheid gewonnen energie toe en vice versa. Het debiet bepaalt de hoeveelheid geothermische pekel die beschikbaar is om warmte uit te winnen, waardoor het potentieel aan geothermische energie kan worden berekend. Geothermische projecten zijn doorgaans beperkt tot een ΔT van 40 °C, maar dit kan worden verhoogd als de injectiedruk opnieuw wordt geëvalueerd.

Samengevat zijn er meerdere factoren die een rol spelen bij het succes en uiteindelijk de totale geothermische vermogen die uit een systeem kan worden gehaald. Deze factoren variëren van de geologische kwaliteit van het reservoir (bijv. permeabiliteit, netto reservoirdikte, transmissiviteit) tot de operationele parameters van een doublet (bijv. injectiedrukken, temperatuurverschil). De totale geothermische energie is de combinatie van deze factoren, terwijl voor de individuele eigenschappenkaarten aanvullende parameters nodig zijn om hun gunstigheid te beoordelen.

## 4.3 Methode voor het in kaart brengen van eigenschappen

De werkwijze voor het opstellen van de eigenschappenkaarten werd onderverdeeld in drie hoofdonderdelen: 1) invoergegevens (kaarten van de bovenste diepte van het reservoir, petrofysische trends), 2) eigenschappenkaarten van het reservoir en 3) berekening van het geothermisch vermogen (Figuur 4-1). De werkwijze werd uitgevoerd in Petrel 2020.




**Figuur 4-1: PanTerra werkwijze voor de ondergrondse eigenschappen, die worden gebruikt om de vermogenskaarten op te stellen.**

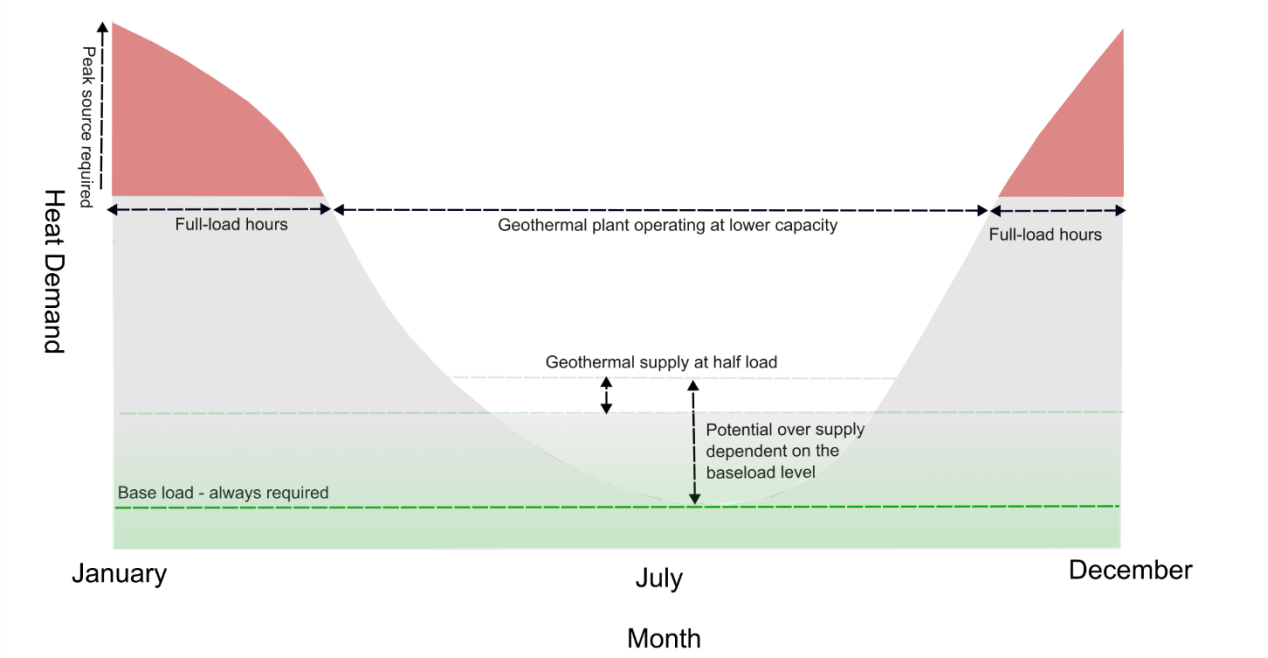
Om de werkwijze voor het in kaart brengen van eigenschappen te vereenvoudigen, zijn de volgende aannames gedaan:

- Wrijving in putten en pomp werd buiten beschouwing gelaten.
- Temperatuurdaling langs de put werd buiten beschouwing gelaten.
- Drukdaling langs de put werd buiten beschouwing gelaten.
- Er werd geen COP berekend. Een hoge injectiedruk leidt tot een hoger vermogen, maar is minder efficiënt.
- Anisotropie in permeabiliteit werd buiten beschouwing gelaten.
- De putten zijn verticaal, zonder deviatie.
- Er is 1500 m afstand tussen de twee putten op reservoirniveau.
- Een 8,5 inch buitendiameter van de put in het reservoirgedeelte.
- Er wordt uitgegaan van een enkele waterviscositeit bij 15 graden °C, ook als er met een hogere temperatuur wordt geïnjecteerd.

De kaarten geven een doubletsysteem weer dat is geoptimaliseerd voor de maximaal toegestane injectiedruk, of het maximaal toegestane drukverschil in de boorput bij het raakvlak tussen injector en reservoir. Deze drukgrens maakt deel uit van het SodM-protocol (Paalvast & Thienen-Visser, 2014). Deze bovenste injectiedrukgrens voorkomt het ontstaan van breuken op de locatie van de injector. Deze wordt normaal gesproken berekend met de Geomech-tool voor individuele doubletten, maar in dit geval werd de berekening geïntegreerd in de PTG werkwijze. Vanwege de gemaximaliseerde injectiedruk geeft de vermogenskaart de bovenste geothermische vermogenslimiet weer die kan worden opgegeven voor een SDE-aanvraag voor een bepaalde set ondergrondse eigenschappen en putontwerpparameters. Onder realistische operationele omstandigheden zou het systeem minder vermogen kunnen leveren. Om met al deze aannames rekening te houden, werden de definitieve vermogenskaarten met 20% in vermogen verlaagd.

De door een geothermisch systeem opgewekte energie is ook gedeeltelijk afhankelijk van het aantal vollasturen per jaar, dat weer afhankelijk is van de jaarlijkse variatie in de warmtevraag. Het aantal vollasturen kan oplopen tot 6000 per jaar voor de glastuinbouw, die een continu warmteprofiel heeft. Ter vergelijking: koolstofarme verwarming voor de stedelijke omgeving kan minder vollasturen hebben

vanwege seizoensgebonden vraag (Figuur 4-2) en kan afhankelijk zijn van de omvang van het stadsverwarmingsnetwerk (~3500 vollasturen) (SDE++, 2023; Schoof et al., 2018). De weergegeven vermogenskaarten zijn in MW (momentaan vermogen), terwijl de hoeveelheid energie die gedurende het jaar wordt gewonnen, afhankelijk is van het aantal vollasturen.



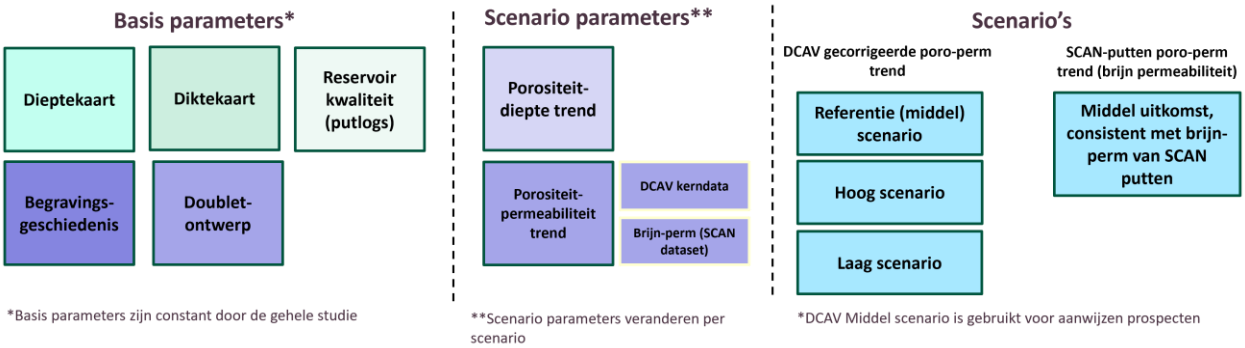

**Figuur 4-2: Conceptuele weergave van geothermische energie voor de stedelijke omgeving, aangepast naar Schoof et al. (2018). Seizoensgebonden variaties in de warmtevraag binnen de stedelijke omgeving kunnen ertoe leiden dat de geothermische centrale op een lager vermogen moet draaien.**

### 4.3.1 Petrofysische trends en onzekerheden in ondergrondse eigenschappen

De vermogenskaarten zijn op de schaal van de provincie opgesteld, om een algemeen overzicht te geven van de potentie in de provincie en de gevolgen op de potentie in van verschillende scenario's. Hierdoor wordt er rekening gehouden met onzekerheden in de eigenschappen van de ondergrond. Er worden vier scenario's gegeven:

1. Standaard referentie scenario, ook wel het middel scenario genoemd
2. Standaard hoog-scenario, ook wel hoog scenario genoemd
3. Standaard laag-scenario, ook wel laag scenario genoemd, en
4. Standaard scenario op basis van brijn-permeabiliteit uit SCAN putten, geothermische brijn scenario genoemd.

De verschillende scenario's en de onderliggende variaties worden gevisualiseerd Figuur 4-3 en Tabel 4-1. In dit deel van het rapport worden enkel het middel scenario en het geothermische brijn scenario getoond. Er moet altijd rekening gehouden worden met het laag scenario, dat hieronder nader is toegelicht. De petrofysische trends waarop deze scenario's zijn gebaseerd, worden gegeven in het hoofdstuk over petrofysica, Hoofdstuk 3 in de Technische Bijlage.



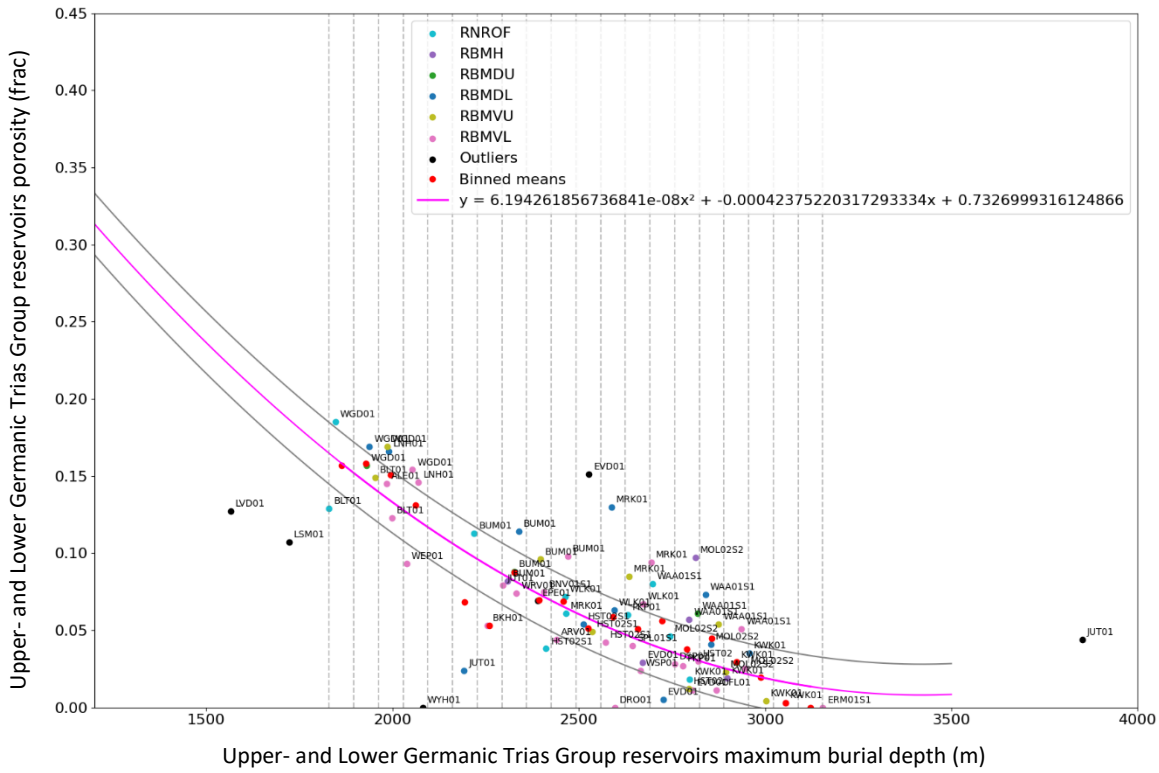

**Figuur 4-3: Scenario's vermogenskaart, waarbij aangegeven is welke ondergrondse eigenschappen worden gebruikt in de scenario's.**

**Tabel 4-1: Uitleg scenario's voor de vermogenskaarten.**

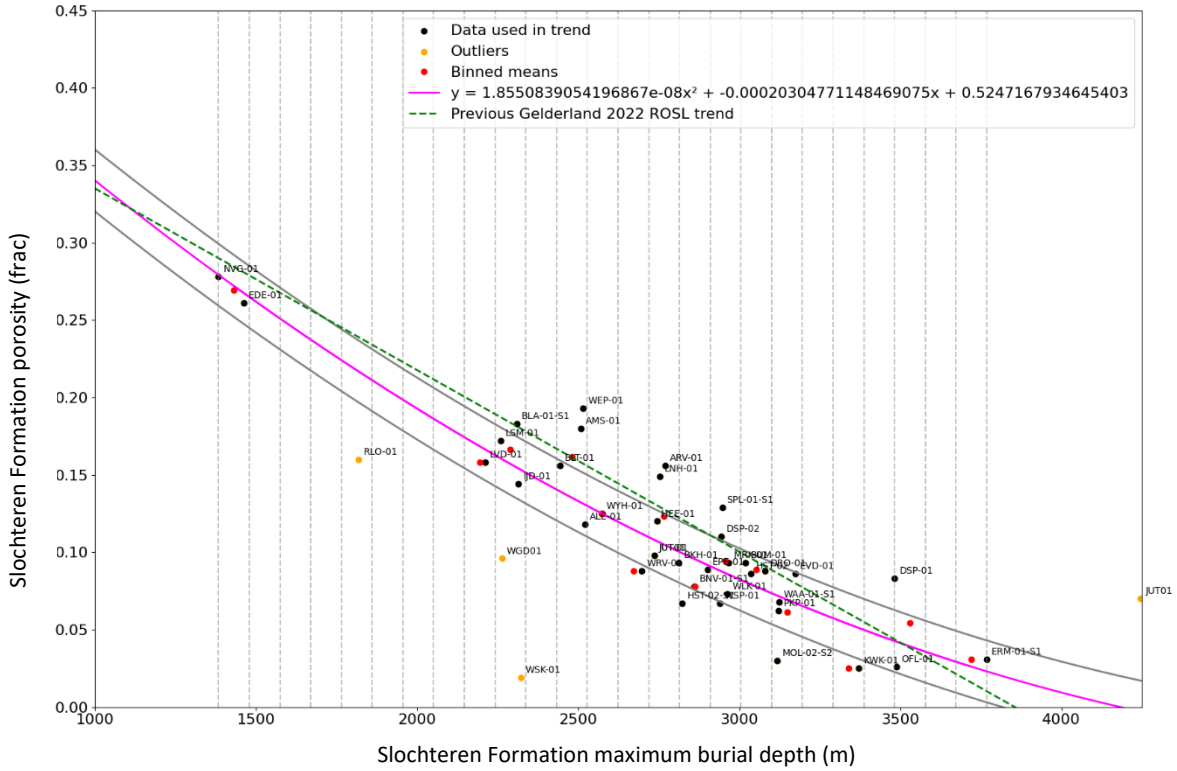
| Scenario | Reservoirs | Porositeit-diepte | Porositeit-permeabiliteit | Toelichting |
|---|---|---|---|---|
| Middel (referentie) scenario (Standard - DCAV) | ROSL, RN & RB | Referentie-waarden | Porositeit-permeabiliteitstrend afgeleid van gecorrigeerde DCAV data | Basisaannames en verwerken gegevens op een vergelijkbare manier als de eerdere studies uit 2021 en 2022. Dit scenario wordt gebruikt voor de aanwijzing van prospecten |
| Middel scenario zonder WHY-01 | ROSL | Referentie-waarden | Porositeit-permeabiliteitstrend afgeleid van gecorrigeerde DCAV data | Basis scenario zonder de brutodikten van de WHY-01 put, omdat deze als anomalie wordt gezien. Op verzoek van de opdrachtgever gebruikt als hoofdkaart. |
| Hoog scenario (Standard - DCAV) | ROSL, RN & RB | Referentie-waarden + 2 porosity units | Porositeit-permeabiliteitstrend afgeleid van gecorrigeerde DCAV data (+ 3 porosity units) | Waarde bovengrens met een positieve porositeit-diepte en porositeit-permeabiliteitstrend. |
| Laag scenario (Standard - DCAV) | ROSL | Referentie-waarden - 2 porosity units | Porositeit-permeabiliteitstrend afgeleid van gecorrigeerde DCAV data (- 3 porosity units) | Waarde ondergrens met een conservatieve trend van porositeit-diepte en porositeit-permeabiliteit. Laag scenario vermogenskaarten voor de Triasreservoirs zijn niet uitgevoerd vanwege het lage vermogenspotentieel dat in het referentiegeval al is waargenomen. |
| SCAN brijn permeabiliteit, middelste scenario | ROSL | Referentie-waarden | Brijn permeabiliteit (SCAN putten) | Het geval van de SCAN brijn permeabiliteit, vertegenwoordigt de referentie-uitkomst, met een lagere fysieke parameter (brijn permeabiliteit). De brijn permeabiliteit is gebaseerd op metingen van de AMS-01, EDE-01 en BLT-01 SCAN-putten, wat een lagere porositeits-permeabiliteitstransformatie illustreert vergeleken met het referentiegeval van DCAV. |

In de lage en hoge standaardscenario's, waarbij DCAV data werd gebruikt, is gekozen voor een onzekerheid van ± 2 porositeitseenheden in de porositeit-diepte-trend voor zowel de reservoirs binnen de Boven- en Onder Germaans Trias Groepen als het Slochteren-reservoir om de belangrijkste variabiliteit van de samengevoegde gemiddelden weer te geven. Alle Boven- en Onder Germaans Trias Groepen-reservoirs (Hoofd Bontzandsteen Subgroep & Röt Randzandsteen) werden opgenomen in één enkele porositeit-diepte trend om een robuustere diepte trend te verkrijgen op basis van een grotere dataset, en er werd vastgesteld dat geen van beide (individuele) Boven- en Onder Germaans Trias Groepen-reservoirs een significant verschillende trend vertonen. De porositeit-diepte trendlijn voor beide reservoirs is aangepast aan de gegevens op basis van maximale begravingscorrecties die zijn toegepast met de standaard lokale begravingslijn zoals beschreven in het hoofdstuk over petrofysica (Technische Bijlage Hoofdstuk 3.4).

Onzekerheden met betrekking tot deze maximale begravingscorrectie (zoals besproken in hoofdstuk 3.5.1) zijn niet opgenomen in de onzekerheidskaart. De onzekerheid van deze methode kan groot zijn en kan het vermogen met lokaal maximaal 14 MW verminderen. Daarom is aanvullend onderzoek nodig om deze onzekerheid verder te beperken. RLO-01, WGD-01, WSK-01 en JUT-01$_{diep}$ werden als uitschieters geclassificeerd en niet gebruikt in de Slochteren-porositeit-diepte-trend vanwege hun lage porositeit op een bepaalde diepte. Voor de Trias-dieptetrend werden uitschieters verwijderd op basis van een netto-bruto-cutoff van 0,35 (Figuur 4-4; Figuur 4-5). Voor meer details over hoe de porositeit-dieptetrends zijn afgeleid, zie het hoofdstuk over petrofysica (Technische Bijlage Hoofdstuk 3.4).




**Figuur 4-4: Porositeit-diepte trend voor de Hoofd Bontzandsteen Subgroep en Röt Randzandsteen reservoirs, met behulp van de lokale uniforme begravingslijn die in dit onderzoek is gegenereerd (zie het hoofdstuk 3.4 over petrofysica voor meer informatie).**




**Figuur 4-5: Porositeit-diepte trend voor het Slochteren reservoir (Rotliegend), met behulp van de lokale uniforme begravingslijn die in dit onderzoek is gegenereerd (zie het hoofdstuk 3.4 over petrofysica voor meer informatie).**

De volgende vergelijkingen zijn afgeleid voor de porositeit-dieptetrends van de Formatie van Slochteren (ROSL) en zijn gebruikt in de geothermische vermogenskaarten:

$$ROSL_{refPOR} = 1.8550839054196867e^{-08} \times ROSL_{Maximumburial}{}^{2} - 0.00020304771148469075 \times ROSL_{Maximumburial} + 0.5247167934645403$$

$$ROSL_{lowPOR} = 1.8550839054196867e^{-08} \times ROSL_{Maximumburial}{}^{2} - 0.00020304771148469075 \times ROSL_{Maximumburial} + (0.5247167934645403 - 0.02)$$

$$ROSL_{highPOR} = 1.8550839054196867e^{-08} \times ROSL_{Maximumburial}{}^{2} - 0.00020304771148469075 \times ROSL_{Maximumburial} + (0.5247167934645403 + 0.02)$$

De volgende vergelijkingen zijn afgeleid voor de porositeit-dieptetrends in het Trias (reservoirs binnen de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen: Onder Volpriehausen Laagpakket, Röt Randzandsteen Laagpakket) en gebruikt in de geothermische vermogenskaarten:

$$TRIAS_{refPOR} = 6.194261856736841e^{-08} \times TRIAS_{Maximumburial}{}^{2} + -0.00042375220317293334 \times TRIAS_{Maximumburial} + 0.7326999316124866$$

$$TRIAS_{lowPOR} = 6.194261856736841e^{-08} \times TRIAS_{Maximumburial}{}^{2} + -0.00042375220317293334 \times TRIAS_{Maximumburial} + (0.7326999316124866 - 0.02)$$

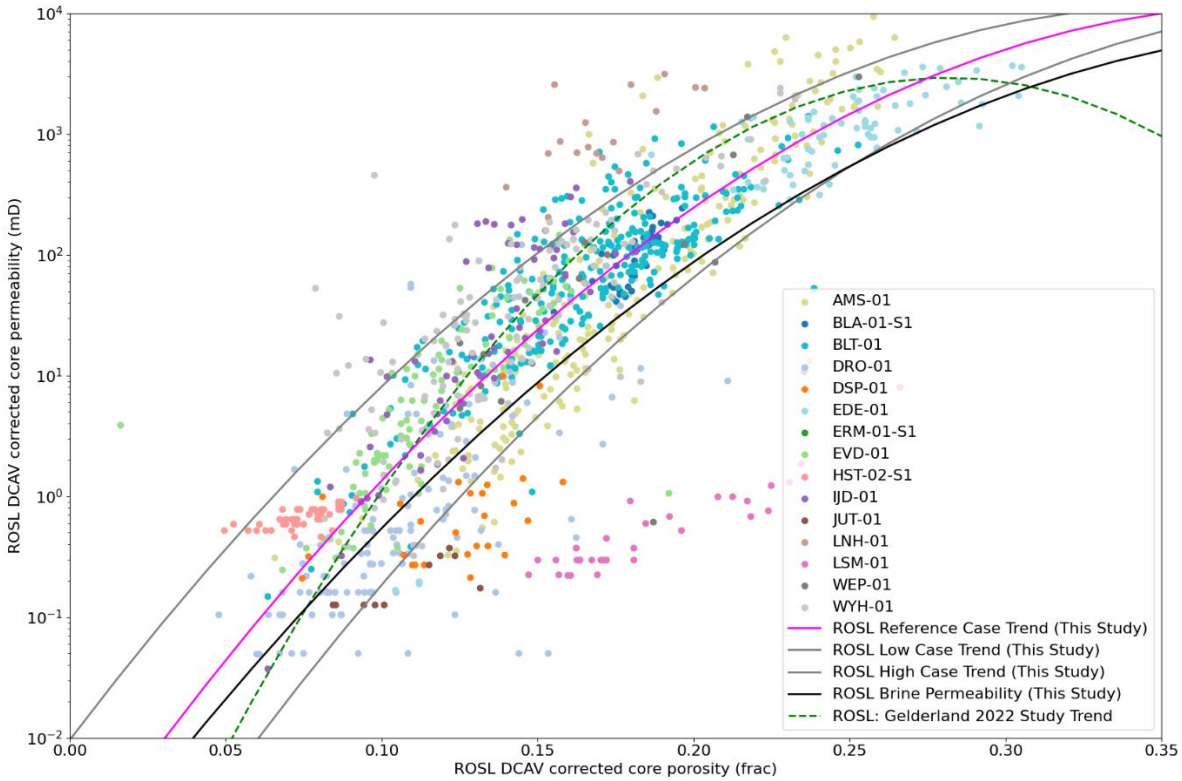
$$TRIAS_{highPOR} = 6.1942618567368 41e^{-08} \times TRIAS_{Maximumburial}{}^{2} + -0.00042375220317293334 \times TRIAS_{Maximumburial} + (0.7326999316124866 + 0.02)$$

In de standaard scenario's, waarbij gebruik wordt gemaakt van de DCAV-methode, zijn de porositeits-permeabiliteittrends gebaseerd op de gecorrigeerde porositeits- en permeabiliteitsmetingen van kernpluggen, zoals beschreven in het Hoofdstuk 3.4 over petrofysica, waarbij gebruik wordt gemaakt van de methode van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) voor in-situ stresscorrecties op porositeit en conversie van luchtpermeabiliteitsgegevens naar de permeabiliteit van in-situ brijn. Er werd een onzekerheid van ± 3 porositeitseenheden toegepast op de porositeit-permeabiliteitstrends om rekening te houden met de variatie in de metingen.

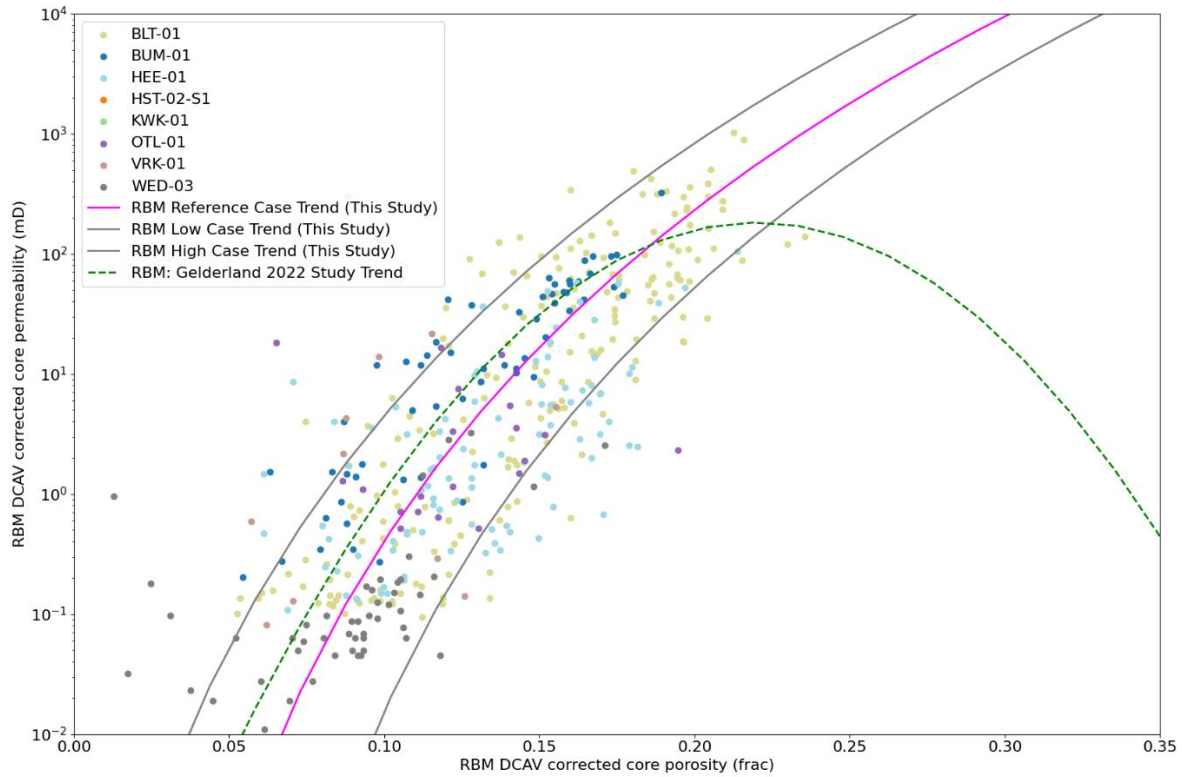
Er werden twee afzonderlijke trends ontwikkeld voor de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs, één voor de Hoofd Bontzandsteen-subgroep en één voor het Röt Randzandsteen Laagpakket. Voor de porositeit-permeabiliteit-trend van de Hoofd Bontzandsteen-subgroep bieden de BLT-01-gegevens aanzienlijk meer gegevensdichtheid voor een verbeterde trend, maar zijn ze conservatiever in vergelijking met de vorige Gelderland 2022-trend. De Röt Randzandsteen-trend is optimistischer dan eerdere interpretaties en is gebaseerd op een aanzienlijk grotere hoeveelheid putgegevens in Gelderland en Utrecht (Figuur 4-7; Figuur 4-8).

Voor de trend van de Slochteren-formatie laten de pluggegevens van AMS-01 en EDE-01 twee verschillende trends zien, waarbij AMS-01 een hogere gradiënt vertoont. De resultaten van EDE-01 kregen de voorkeur omdat deze put centraler in het studiegebied ligt. Het gevolg hiervan is dat de trendlijn bij hogere porositeit en permeabiliteit vlakker wordt. In vergelijking met de eerdere Slochteren-trends Gelderland 2022 en Utrecht 2021 is de in deze studie ontwikkelde base case trend conservatiever. De in deze studie ontwikkelde trends zijn robuuster door het omvatten van de nieuwe SCAN-gegevens (Figuur 4-6).

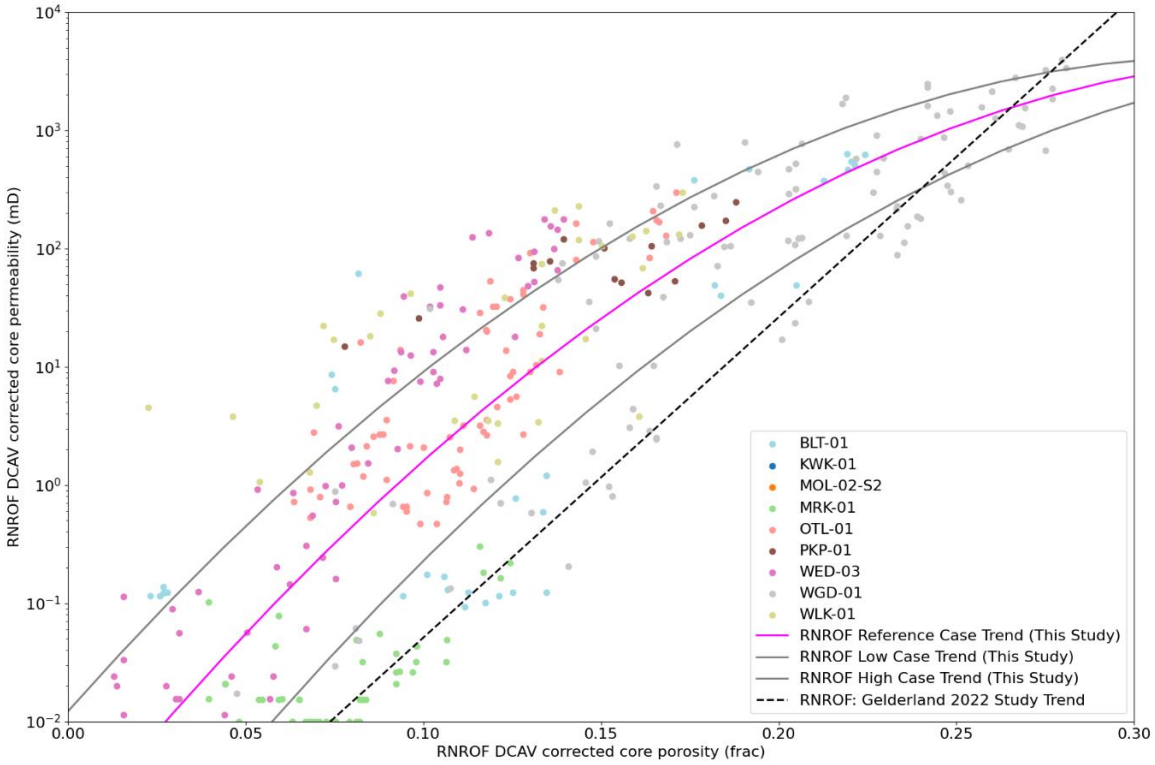
Het scenario voor geothermisch brijn werd uitsluitend gebruikt voor de Slochteren-formatie. Deze porositeit-permeabiliteitstrend is gebaseerd op de porositeit- en permeabiliteitsmetingen van kernpluggen, gecorrigeerd met behulp van de porositeit onder stress en de permeabiliteit onder stress omgezet naar permeabiliteit bij voor brijn, zoals afgeleid uit metingen in de SCAN-putten. Zie het hoofdstuk over petrofysica (paragraaf 3.4.4) voor meer details en een overlay met de brijntrend, zie Figuur 4-6.




**Figuur 4-6: Formatie van Slochteren (ROSL) porositeit-permeabiliteitstrends uitgezet tegen kernmetingen gecorrigeerd met behulp van de methodologie van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) (DCAV). De permeabiliteitstrend voor brijn is uitgezet ter vergelijking – zie het hoofdstuk over petrofysica voor de onderliggende gegevens.**




**Figuur 4-7: Porositeit-permeabiliteitstrends van de Hoofd Bontzandsteen Subgroep (RBM) uitgezet tegen kernmetingen gecorrigeerd met behulp van de methode van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) (DCAV).**




**Figuur 4-8: Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF) porositeit-permeabiliteit trends uitgezet tegen kernmetingen gecorrigeerd met behulp van de methode van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) (DCAV).**

De volgende vergelijkingen zijn afgeleid voor de porositeit-permeabiliteittrends voor van de Formatie van Slochteren (ROSL) en zijn gebruikt in de geothermische vermogenskaarten in het middel, hoog, laag en brijn scenario:

$$ROSL_{refPERM} = 10^{(-3.08228+36.8922 \times POR_{stress} - 47.6061 \times POR_{stress}{}^2)}$$

$$ROSL_{lowPERM} = 10^{(-3.08228+36.8922 \times (POR_{stress}-0.03) - 47.6061 \times (POR_{stress}-0.03)^2)}$$

$$ROSL_{highPERM} = 10^{(-3.08228+36.8922 \times (POR_{stress}+0.03) - 47.6061 \times (POR_{stress}+0.03)^2)}$$

$$ROSL_{brinePERM} = 10^{(-3.3012+34.5254 \times POR_{stress} - 41.5594 \times POR_{stress}{}^2)}$$

De volgende vergelijkingen zijn afgeleid voor de porositeit-permeabiliteittrends voor van het Hoofd Bontzandsteen Subgroep (RBM) en zijn gebruikt in de geothermische vermogenskaarten in het middel, hoog en laag scenario:

$$RBM_{refPERM} = 10^{(ln\left(\frac{POR_{stress}}{0.11032}\right)/0.251423}$$

$$RBM_{lowPERM} = 10^{(ln\left(\frac{(POR_{stress}-0.03)}{0.11032}\right)/0.251423}$$

$$RBM_{highPERM} = 10^{(ln\left(\frac{(POR_{stress}+0.03)}{0.11032}\right)/0.251423}$$

De volgende vergelijkingen zijn afgeleid voor de porositeit-permeabiliteittrends voor van het Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF) en zijn gebruikt in de geothermische vermogenskaarten in het middel, hoog en laag scenario:

$$RNROF_{refPERM} = 10^{(-2.98124+37.0447 \times POR_{stress} - 51.9239 \times POR_{stress}{}^{2})}$$

$$RNROF_{lowPERM} = 10^{(-2.98124+37.0447 \times (POR_{stress} - 0.03) - 51.9239 \times (POR_{stress} - 0.03)^{2})}$$

$$RNROF_{lowPERM} = 10^{(-2.98124+37.0447 \times (POR_{stress} + 0.03) - 51.9239 \times (POR_{stress} + 0.03)^{2})}$$

### 4.3.2 Kaart met reservoirdiepte

Zoals beschreven in Hoofdstuk 2 over seismische interpretatie, werden in totaal acht horizonten geïnterpreteerd op seismische lijnen. Drie daarvan, Basis Altena Groep, Basis Onder-Germaanse Trias Groep en Basis Zechstein Groep (Top Formatie van Slochteren), zijn gebruikt om potentiële geothermische reservoirs in kaart te brengen en zijn gebruikt als basis voor het genereren van topreservoirkaarten, samen met isochorepunten uit putgegevens daar waar nodig.

De Slochteren-topdieptekaart werd rechtstreeks bepaald op basis van de seismische interpretatie van de Basis Zechstein.

De topreservoirdieptekaarten voor de Trias-reservoirs werden gemaakt met behulp van een isochore-methodologie met NLOG-puttoppen en seismische oppervlakken. Met andere woorden, een isochore-interval (gekozen uit een reeks well tops) werd toegevoegd aan een bestaand seismisch oppervlak om een topreservoirkaart te berekenen. De dikte tussen de gekozen set well tops werd omgezet tot een isochore met behulp van een convergent gridding algoritme in Petrel. Daarbij is een variatie van ± 10% van de invoergegevens toegestaan.

Dieptekaarten gemaakt op basis van de isochore-methode:

- Bovenkant (top) Röt Randzandsteen Laagpakket (Boven Trias Groep):
  - Basis Altena Groep seismic surface + ‘top Röt Randzandsteen - Basis Altena Groep’ isochore
- Bovenkant Onder Volpriehausen Zandsteen Laagpakket (Onder Trias Groep):
  - Basis Onder-Germaanse Trias Groep seismic surface - ‘top Onder Volpriehausen - Basis Onder-Germaanse Trias Groep ’ isochore

### 4.3.3 Brutodiktekaarten

De brutodiktekaarten van de potentiële reservoirs zijn gegenereerd met behulp van putwaarnemingen en een convergent gridding algoritme in Petrel dat een variatie van ± 10% van de invoergegevens toestaat. De NLOG well tops werden gebruikt als invoergegevens, die de bovenkant en onderkant van de reservoirs op de putlocatie definiëren. Om geen negatieve dikte te genereren, werd een ondergrens van 3 m ingesteld voor de dunne reservoirs, tenzij anders aangegeven.

De volgende brutodiktekaarten zijn gemaakt:

- Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF). In gebieden zonder putgegevens zijn een aantal pseudoboorputten met een geringe dikte rond de structurele hogen toegevoegd om een

vergelijkbare geometrie voor de dikte te volgen als aangegeven op ThermoGIS. Voor erosie zijn de surfaces van ThermoGIS gebruikt.

- Onder Volpriehausen Zandsteen Laagpakket (RBMVL): minimaal 3 m TVT op basis van put WSK-01. In gebieden zonder putten zijn een aantal pseudoputten met een geringe dikte rond de structurele hogen toegevoegd om een vergelijkbare geometrie te volgen als aangegeven op ThermoGIS. Voor erosie zijn de surfaces van ThermoGIS gebruikt, tenzij de nieuwe SCAN-putten een lokale aanwezigheid aantonen.

- Formatie van Slochteren (ROSL): DRO-01, ERM-01-S1, HST-02 en OFL-01 zijn uit de dikteanalyse verwijderd omdat het reservoir in die putten onvolledig is. Voor erosie zijn dezelfde gebieden gebruikt als beschreven in de rapporten van Utrecht 2021 en Gelderland 2022.

Dit zijn kaarten met de werkelijke verticale dikte (TVT, true vertical thickness) en geen kaarten met de werkelijke stratigrafische dikte (TST). Als gevolg hiervan kan de dikte enigszins worden overdreven als de structurele helling van een laag aanzienlijk is. Bovendien zijn de diktekaarten uitsluitend gebaseerd op putgegevens, waarbij gebruik wordt gemaakt van de NLOG-stratigrafie. Daarom zijn de voorspelde diktes tussen deze putwaarden gebaseerd op een interpolatiealgoritme, wat onzekerheid met zich meebrengt.

### 4.3.4 Dieptekaart middelpunt reservoir

De kaart met de middelpunt diepte van het reservoir (mid-reservoir depth) werd gemaakt door de helft van de dikte toe te voegen vanaf de bovenkant van het reservoir. De kaart met de middelpunt diepte van het reservoir werd vervolgens gebruikt om de temperatuurkaarten te berekenen.

### 4.3.5 Temperatuur middelpunt reservoir

Om de temperatuur van het reservoir te berekenen, werd een constante geothermische gradiënt van 0,0315 °C/m en een oppervlaktetemperatuur van 10 °C gebruikt. De formule die werd gebruikt voor het in kaart brengen van de temperatuur op halve reservoirdiepte was:

$T=Z_{mid}*0.0315+10$
Waarbij:
T= temperatuur op diepte [°C]
$Z_{mid}$=diepte middelpunt reservoir [m]

### 4.3.6 ΔT-kaart

De ΔT-kaart toont het verschil in productietemperatuur en injectietemperatuur van een fictief doubletsysteem. De minimale injectietemperatuur werd vastgesteld op 15 °C en het maximale temperatuurverschil tussen de productieput en de injectieput op 40 °C. Het temperatuurverschil tussen de injectieput en de productieput werd berekend met de volgende vergelijking:

[1] $\Delta T = T-15$ waarbij T de temperatuur is in het midden van het reservoir
[2] IF $\Delta T > 40°C$, $\Delta T = 40°C$

De bovengrens van 40 °C volgt de regelgeving van SodM. Deze waarde kan echter worden verhoogd als de injectiedruk wordt verlaagd.

Om een vergelijking te kunnen maken met de eerdere studies in Gelderland en Utrecht, is een aanvullende vermogenskaart gegenereerd met een minimale injectietemperatuur van 35 °C en een maximaal temperatuurverschil tussen de injector en de producent van 35 °C.

### 4.3.7 Porositeitskaarten

Het genereren van de porositeitskaarten verloopt in twee fasen: 1) het creëren van de maximale begravingsdieptekaarten met behulp van geïnterpreteerde opheffingswaarden uit de sonic velocity van de Hoofd Kleisteen Formatie, en 2) het toepassen van de porositeitsdieptetrend.

De maximale begravingsdieptekaart per reservoir werd gegenereerd door een correctie voor opheffing toe te voegen aan de huidige topdieptekaart van het reservoir. De correctie werd gegenereerd op basis van de putcontrolepunten en met behulp van convergente interpolatie tussen de putten (± 10%). De methode en de bijbehorende onzekerheid van deze methode worden beschreven in het hoofdstuk over petrofysica in paragraaf 3.5.1. De waarden voor opheffing die zijn afgeleid van de lokale begravingslijn werden in alle scenario's gebruikt en houden daarom geen rekening met de onzekerheid van deze methode. De uniforme begravingslijn werd als volgt gedefinieerd:

$$V = Z_{mid} + 1380/0.195$$

Waarbij *V* de interval snelheid is van de Hoofd Kleisteen Formatie, en *Z_mid* de gemiddelde reservoirdiepte is.

De porositeit-dieptetrends werden per reservoirinterval toegepast op de maximale begravingsdieptekaarten. De kaarten werden vervolgens well-tied met een straal van 2000 m met behulp van de opgeschaalde waarden (rekenkundig gemiddelde) uit de petrofysische analyse. Daarbij geldt er een cut-off waarden van minder dan 0,025% of meer dan 30% porositeit voor de Slochteren-formatie, en bij waarden van minder dan 0,025% of meer dan 21% porositeit voor de Boven en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs, in overeenstemming met de waarden die in de kerngegevens werden waargenomen.

Voor alle scenario’s van de porositeitskaarten van het Slochteren-reservoir werd een lokale verbetering tot 27% porositeit toegevoegd rond het Peel-Maasbommel Complex. Deze lokale verbeteringen werden aangebracht in een gebied van 2 km rond het complex en nemen geleidelijk af met de afstand. Dit werd gedaan omdat verbeterde reservoir-eigenschappen worden verwacht als gevolg van geringere begravingsdieptes en mogelijke reservoiruitloging rond de Basis Krijt discordantie. Een voorbeeld van verbeterde reservoirs is te zien in NVG-01 en EDE-01, die een uitstekende kwaliteit kennen in het Slochteren. Deze lokale verbeteringen werden ook toegepast op de vorige 2022 Gelderland Slochteren-kaarten en werden in deze studie opgenomen omwille van de consistentie. De recent geboorde EDE-01-put bevestigd en verantwoord deze keuze. Er moet echter worden opgemerkt dat er geen controlepunten zijn aan de westelijke grens van het Peel-Maasbommel Complex en dat HEE-01, gelegen in het zuidwesten van het complex, een slechter potentieel aangeeft. Om de aanname van een verbeterde reservoirkwaliteit rond het complex te verbeteren, wordt aanbevolen om een gedetailleerde kartering van de discordantie uit te voeren door een subcropkaart te genereren en deze te correleren met putgegevens in het gebied, zowel voor de Boven en Onder Germaanse Trias Groep-reservoirs als de Slochteren-reservoir, en om de recent geboorde MLZ-01 SCAN-put in deze analyse op te nemen. Verder kunnen aanvullende beperkingen op de maximale begraving van het complex worden verkregen uit de vitrinietreflectiegegevens van BLT-01.

Kaarten met hoge en lage porositeit werden berekend op basis van de basisporositeitskaart met een porositeit van ± 2%, zoals beschreven in paragraaf 4.3.

### 4.3.8 Permeabiliteitskaarten

De porositeit-permeabiliteitsrelaties die in paragraaf 4.3.1 zijn beschreven, werden vervolgens gebruikt om de well-tied porositeitskaart om te zetten in een permeabiliteitskaart. De permeabiliteitskaarten werden vervolgens well-tied binnen een straal van 2000 m met behulp van de opgeschaalde waarden (rekenkundig gemiddelde) uit de petrofysische analyse. Daarbij werd een cut-off waarden van 2000 mD voor de Slochteren-formatie en bij waarden van meer dan 1000 mD voor de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs gebruikt, in overeenstemming met de waarden die in de kerngegevens werden waargenomen. Er werd een minimale permeabiliteitswaarde van 0,001 mD ingesteld om negatieve en nulwaarden te vermijden.

De hoge en lage permeabiliteitstrends werden berekend op basis van de permeabiliteitstrend van het basisscenario ± 3% porositeit, om de variabiliteit in de dataset mee te nemen (paragraaf 4.3.1). Deze hoge en lage permeabiliteitstrends werden toegepast op de respectieve hoge en lage porositeitskaart, wat een totale onzekerheid van ± 5% opleverde op basis van de trends. Voor het Slochteren brijn scenario werd de porositeit-brijnpermeabiliteitstrend gebruikt om de referentiekaart (middengeval) te maken.

### 4.3.9 Kaarten netto-brutoverhouding (N/G)

Voor de Formatie van Slochteren-vermogenskaarten werd één netto-brutoverhouding van 1 gebruikt, vergelijkbaar met de Gelderland 2022-studie. De gemiddelde petrofysische eigenschappen voor het Slochteren-reservoir laten een hoge netto-brutoverhouding van 0,97 zien. Opvallende uitzonderingen hierop zijn echter de putten DRO-01 en WSK-01, die een netto-brutoverhouding hebben van respectievelijk 0,43 en 0,56. De ERM-01-S1 en WGD-01 putten hebben netto-bruto-waarden van respectievelijk 0,89 en 0,86, alle andere putten hebben waarden >0,9. Als gevolg hiervan kunnen de kaarten enigszins gunstige netto-diktewaarden hebben en is verder onderzoek nodig om sedimentaire variaties mee te nemen om de trends beter te begrijpen.

Er is een variabele netto-bruto-kaart gegenereerd voor de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs vanwege de grote variabiliteit in waarden uit de petrofysische analyse. Het netto-bruto surface is gegenereerd met behulp van de petrofysische analyse van de putgegevens en een convergente interpolatiemethode met een variatie van ± 10% in de invoergegevens. Deze netto-bruto-waarden volgen geen sedimentaire afzettingspatronen en zijn daarom onzeker.

### 4.3.10 Netto zanddikte

De netto zanddikte werd berekend met de brutodikte en de N/G. Hiervoor werd de volgende vergelijking gebruikt:
H=bruto dikte* netto-brutoverhouding
Waarbij:
H= netto zanddikte [m]
G= bruto dikte [m]
N/G= netto-brutoverhouding [-]

### 4.3.11 KH

KH is de transmissiviteit van het reservoir (in Dm). Deze werd berekend met behulp van de volgende vergelijking:

KH=K*H
Waarbij:
KH= transmissiviteit [Dm]
K= permeabiliteit [D]
H= netto zanddikte [m]

### 4.3.12 Saliniteit

De samenstelling (zoutgehalte) van het formatiewater werd berekend met behulp van dezelfde methodologie als in ThermoGIS. Het zoutgehalte/saliniteit werd bepaald aan de hand van de volgende formule:

Saliniteit = 70000/1500 * mid-reservoir diepte

### 4.3.13 Druk

Het drukverschil bij de injectieput werd gebruikt om het debiet te berekenen. Hiervoor werd het maximaal toegestane drukverschil bij de injectieput gebruikt, zoals gedefinieerd door TNO en SodM (Paalvast & Thienen-Visser, 2014) in de Geomech-tool (Tools | NLOG).

$dP = P_{injection} - P_{reservoir}$

$P_{injection} = 0.135*Z_{top\ reservoir}$

$P_{reservoir} = 0.106*Z_{top\ reservoir}$

Waarbij:
dP = drukverschil bij de injectieput [bar]
$P_{injection}$ =injectiedruk [bar]
$P_{reservoir}$ =reservoirdruk bij de injectieput [bar]
$Z_{top\ reservoir}$=diepte bovenkant reservoir [m]

### 4.3.14 Dichtheid

De formule voor dichtheid volgt de handleiding van DoubletCalc (Mijnlieff et al., 2014; Batzle and Wang, 1992):

$\rho_{fw} = 1+10^{-6} (-80T-3.3T^2 + 0.00175T^3 + 489p - 2Tp + 0.016T^2p - 1.3*10^{-5}T^3p - 0.333p^2 - 0.002Tp^2)$

$\rho = \rho_{fw} + s\{0.668+0.44s + 10^{-6} [300p – 2400ps + T(80 + 3T – 3300s – 13p +47ps)]\}$

Waarbij:
$\rho_{fw}$ = dichtheid zoetwater [kg/m$^3$]
$\rho$= dichtheid brijn [kg/m$^3$]
p= druk [MPa]
S= saliniteit [ppm/1.000.000 or kg/kg]
T= temperatuur [°C]

### 4.3.15 Viscositeit

De formule voor viscociteit volgt de handleiding van DoubletCalc (Mijnlieff et al., 2014; Batzle and Wang, 1992):

$\mu = 0.1 +0.333s + (1.65 + 91.9s^3) \exp(-[0.42(s^{0.8} – 0.17)^2 + 0.045]T^{0.8})$

Waarbij:
$\mu$= viscositeit van water [cP]
S= saliniteit [ppm/1.000.000 or kg/kg]
T= temperatuur [°C]

### 4.3.16 Warmtecapaciteit

De specifieke warmtecapaciteit werd berekend aan de hand van de temperatuur, het zoutgehalte en de druk. DoubletCalc (Mijnlieff et al., 2014) benadert dit door gebruik te maken van de gecorrigeerde formule van Grunberg (1970). De formule is als volgt:

$C_p =$ $(+5.328 - 9.760 * 10^{-2}s + 4.040*10^{-4}s^2)$

$+(-6.913*10^{-3}+7.351*10^{-4}s-3.150*10^{-6}s^2)T$

$+(+9.600*10^{-6} - 1.927*10^{-6}s +8.230*10^{-9}s^2)T^2$

$+ (+2.500*10^{-9} + 1.666*10^{-9}s - 7.125*10^{-12}s^2)T^3$

Waarbij:
$C_p$= warmtecapaciteit water [kJ/(kg*K)]
S= saliniteit [ppm/1.000.000 of kg/kg]
T= Temperatuur [°K]

### 4.3.17 Debiet

Het debiet is berekend aan de hand van de volgende formule (Mijnlieff et al., 2014):

$$Qv = \frac{\Delta P * 2 * \pi * k * G * (\frac{N}{G})}{\mu * \ln(\frac{L}{r})}$$

Waarbij:
Qv= debiet [$m^3$/sec)
ΔP=dP = drukverschil bij de injectieput [Pa]
k= permeabiliteit [$m^2$]
G= bruto dikte [m]
N/G= netto-brutoverhouding [-]
μ= viscositeit [Pa*s]
L= afstand tussen putten op reservoirdiepte = 1500 [m]
r= diameter buitenkant putten = 0.2159 [m] (8.5”)

Het debiet werd omgerekend van $m^3$/sec naar $m^3$/uur door het te vermenigvuldigen met 3600. De debieten werden beperkt vanwege de technische beperkingen van productieputten (~500 $m^3$/uur).

### 4.3.18 Vermogen

Het vermogen is berekend met de volgende vergelijking (Mijnlieff et al., 2014):
$E_{geothermisch} = Q_v * \rho * C_P * \Delta T$
Waarbij:
$E_{Geothermisch}$= geothermisch vermogen [MW]
Qv= debiet [$m^3$/sec]
ρ= dichtheid brijn [kg/$m^3$]
$C_p$= specifieke warmtecapaciteit water [J/K]
ΔT= temperatuurverschil [K]

De uiteindelijke vermogenskaarten werden met 20% verminderd om gedeeltelijk rekening te houden met de bovengenoemde aannames en de geoptimaliseerde injectiedruk.

## 4.4 Aannames bij de vermogenskaarten

De vermogenskaarten hebben onzekerheden en aannames als het gaat om de invoerparameters en de gegevensdichtheid. Deze worden hieronder beschreven en daar moet rekening mee worden gehouden bij het lezen van de resultaten:

- Gebieden met een lage gegevensdichtheid kennen een grotere onzekerheid. In gebieden waar geen putgegevens aanwezig zijn, kunnen de trends in de voorspelde ondergrondse eigenschappen niet worden bevestigd. Voor gebieden rond putten die uitgesloten waren voor de porositeit-diepte trend, omdat deze putten als uitschieters worden , zijn aanvullende analyses nodig om de mindere reservoirkwaliteit te verklaren. Nabij gebruikte putten is de onzekerheid kleiner en zijn de eigenschappen gekoppeld binnen een straal van 2 kilometer rond de put.
- De kaarten van de dikte van de Formatie van Slochteren en de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs zijn gebaseerd op putgegevens, waarbij de dikte van het reservoir tussen de putten is geïnterpoleerd. Hoe verder men zich van deze putcontrolepunten bevindt, hoe groter de onzekerheid over de dikte wordt. Bovendien zijn de kaarten van de diepte van de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs gebaseerd op een isochore-methodologie in combinatie met de interpretatie van de basis van de Onder-Germaanse Trias Groep en Altena Groep op seismische lijnen. Daarom neemt de onzekerheid over de reservoirdiepte toe naarmate men verder verwijderd is van putcontrolepunten.
- Omdat het om een regionale studie gaat, is er bij de beoordeling van de reservoirkwaliteit geen rekening gehouden met geologische trends in afzetting en verspreiding van facies. Als gevolg hiervan werd voor de Formatie van Slochteren één enkele netto-brutowaarde toegepast. Voor Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen-reservoirs is er een convergente interpolatie toegepast tussen putten. Er is in werkelijkheid meer dan één permeabiliteitstrend in een reservoir mogelijk, bijvoorbeeld door faciesveranderingen, wat tot een over- of onderschatting van de effectieve permeabiliteit kan leiden.
- Voor alle scenario's van de porositeitskaarten van de Formatie van Slochteren is een lokale verbetering van 27% porositeit toegevoegd rond het zogenaamde Peel-Maasbommel-complex. Deze lokale verbeteringen werden aangebracht in een gebied van 2 km rond het complex en nemen geleidelijk af naarmate de afstand toeneemt. Dit werd gedaan omdat betere reservoireigenschappen worden verwacht als gevolg van de geringere begravingsdieptes. Daarnaast kunnen andere processen de reservoirkwaliteit positief beïnvloed hebben, zoals uitloging rond de Krijt-discordantie. Deze verbetering is een aanname, die wordt ondersteund door putgegevens van NVG-01 en EDE-01, afkomstig uit het EBN SCAN-project
- De gemodelleerde porositeiten zijn gekoppeld aan een opheffingsmodel dat sonische snelheden in de kleisteeninterval van de Onder-Germaanse Trias Groep als proxy gebruikt. Onzekerheden met betrekking tot dit opheffingsmodel kunnen het vermogen met maximaal 14 MW verminderen in het P50 scenario, wat leidt tot zeer lage vermogensvoorspellingen in de regio. De onzekerheid hieromtrent is niet meegenomen in de vermogenskaartscenario's en er is aanvullend onderzoek nodig om deze onzekerheden verder te beperken. Zie hoofdstuk X voor een uitgebreidere toelichting.
- Het referentie middel scenario, hoog scenario en laag scenario voor de vermogenskaart zijn gebaseerd op gecorrigeerde kerngegevens, dat is consistent met de eerdere geothermische studies van Gelderland (2022) en Utrecht (2021), met behulp van analoge correcties uit de literatuur. Door de toevoeging van nieuwe gegevens uit het SCAN-project van AMS-01, BLT-01 en EDE-01 kan een

robuustere trend voor de permeabiliteit van brijn worden gegenereerd in het studiegebied. De vermogenskaart voor de brijn-permeabiliteit met gemiddelde resultaten, gegenereerd op basis van de SCAN-gegevens, geeft een lager vermogenspotentieel aan dan het referentie P50 scenario. Vanwege de beschikbaarheid van gegevens werd het standaard scenario met gemiddelde referentie gebruikt om de potentiële locaties te onderzoeken.

- Een vergelijkbare methode als DoubletCalc1D wordt gebruikt om het potentiële debiet van een fictief doublet te berekenen, maar houdt geen rekening met hoe de temperatuur van het reservoir in de loop van de tijd verandert. Vanwege dit verschil is een meer uitgebreide analyse nodig om de levensduur van het doublet te bepalen op basis van de doorbraaktijd van het koudefront, die voornamelijk kan worden beïnvloed door het debiet en de dikte van het reservoir.
- Onzekerheid over de locatie van breuken, veroorzaakt door de kwaliteit van de 3D-seismische acquisitie, schaduweffecten van breuken en het ontbreken van 3D-seismische gegevens (alleen 2D-lijnen beschikbaar), kan van invloed zijn op de potentiële locaties van doubletten. De breuken die op de vermogenskaarten zijn weergegeven, zijn overgenomen uit de Gelderland-studie uit 2022.

Over het algemeen benadrukken deze kaarten waar op een regionale schaal kansrijke gebieden zijn, om een inzicht te krijgen in de impact van de nieuw beschikbare SCAN-datasets ten opzichte van de voorgaande studies van Utrecht (2021) en Gelderland (2022). De kaarten illustreren tevens dat er nog steeds onzekerheid bestaat en laten zien dat er gebieden blijven waar verder de-risken van de ondergrond nuttig kan zijn.

## 4.5 Alternatieve ontwerpen voor meer vermogen

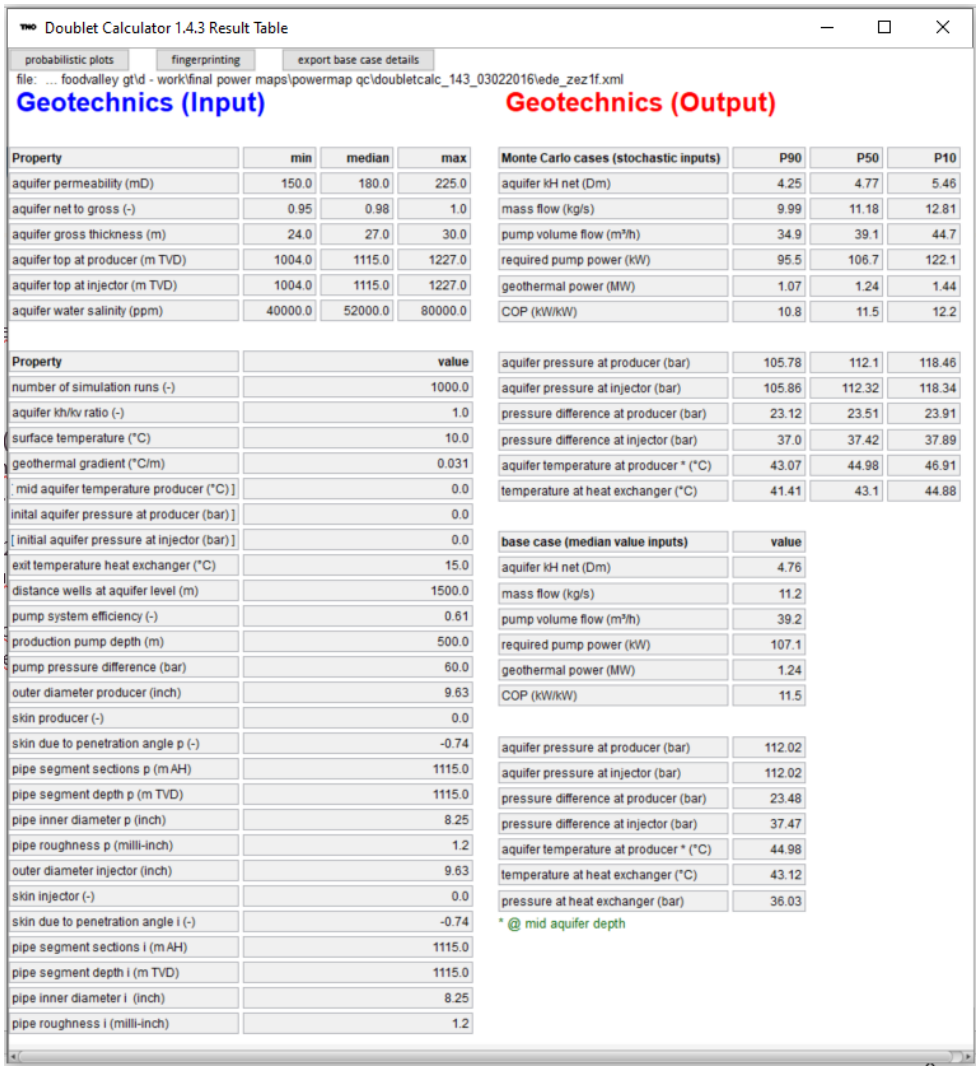
Voor EDE-01 is een DoubletCalc1D simulatie uitgevoerd voor het Zechstein 1 Randcarbonaat, omdat van deze formatie bleek dat er goed water doorheen kan stromen, op basis van de productietest. Er is weinig bekend over de potentie van het Zechstein carbonaat. In het hoofdrapport is gesteld dat de formatie mogelijk interessant is als toevoeging op geothermie uit het Rotliegend reservoir.

### 4.5.1 Coproductie ZEZ1F

Met coproductie bedoelen we dat de productieput en injectieput niet één, maar twee of meer formaties tegelijkertijd aanspreken voor het aanstromen van water. Putten kunnen dusdanig ontworpen worden dat er over verschillende gesteentepakketten productie mogelijk is, zelfs als daartussen verticale afstand zit. Figuur 4-9 toont het resultaat van de DoubletCalc simulatie. Daarop is te zien dat er in het P50 scenario een vermogen van 1.24 MW mogelijk is. Bij coproductie kan dat bovenop het vermogen van het Slochteren reservoir geteld worden, wat ter plaatse van EDE-01 ongeveer 16 MW is. Het vermogen uit het Zechstein carbonaat is beperkt, omdat het reservoir bij EDE-01 dun is. De maximale dikte van het pakket is 127 meter (DINOloket). Een aanvullend onderzoek naar de geologie van het Zechstein carbonaat en de implicaties voor geothermie kan daarom interessant zijn.

### 4.5.2 Horizontaal boren

Een alternatief voor een standaard doublet zou zijn om één horizontale injectieput te boren in plaats van twee verticale of ‘slanted’ (gedevieerde) injectoren. Een sub-horizontale (met een inclinatie van 80°) injectieput vergroot de productie slechts met ongeveer 20% ten opzichte van een conventioneel doublet. DoubletCalc1D is niet in staat een volledig horizontale put te simuleren.



Doublet Calculator 1.4.3 Result Table

probabilistic plots | fingerprinting | export base case details

file: ... foodvalley gt\d - work\final power maps\powermap qc\doubletcalc_143_03022016\ede_zez1f.xml

**Geotechnics (Input)**

| Property | min | median | max |
|---|---|---|---|
| aquifer permeability (mD) | 150.0 | 180.0 | 225.0 |
| aquifer net to gross (-) | 0.95 | 0.98 | 1.0 |
| aquifer gross thickness (m) | 24.0 | 27.0 | 30.0 |
| aquifer top at producer (m TVD) | 1004.0 | 1115.0 | 1227.0 |
| aquifer top at injector (m TVD) | 1004.0 | 1115.0 | 1227.0 |
| aquifer water salinity (ppm) | 40000.0 | 52000.0 | 80000.0 |

| Property | value |
|---|---|
| number of simulation runs (-) | 1000.0 |
| aquifer kh/kv ratio (-) | 1.0 |
| surface temperature (°C) | 10.0 |
| geothermal gradient (°C/m) | 0.031 |
| [ mid aquifer temperature producer (°C) ] | 0.0 |
| inital aquifer pressure at producer (bar) ] | 0.0 |
| [ initial aquifer pressure at injector (bar) ] | 0.0 |
| exit temperature heat exchanger (°C) | 15.0 |
| distance wells at aquifer level (m) | 1500.0 |
| pump system efficiency (-) | 0.61 |
| production pump depth (m) | 500.0 |
| pump pressure difference (bar) | 60.0 |
| outer diameter producer (inch) | 9.63 |
| skin producer (-) | 0.0 |
| skin due to penetration angle p (-) | -0.74 |
| pipe segment sections p (m AH) | 1115.0 |
| pipe segment depth p (m TVD) | 1115.0 |
| pipe inner diameter p (inch) | 8.25 |
| pipe roughness p (milli-inch) | 1.2 |
| outer diameter injector (inch) | 9.63 |
| skin injector (-) | 0.0 |
| skin due to penetration angle i (-) | -0.74 |
| pipe segment sections i (m AH) | 1115.0 |
| pipe segment depth i (m TVD) | 1115.0 |
| pipe inner diameter i (inch) | 8.25 |
| pipe roughness i (milli-inch) | 1.2 |

**Geotechnics (Output)**

| Monte Carlo cases (stochastic inputs) | P90 | P50 | P10 |
|---|---|---|---|
| aquifer kH net (Dm) | 4.25 | 4.77 | 5.46 |
| mass flow (kg/s) | 9.99 | 11.18 | 12.81 |
| pump volume flow (m³/h) | 34.9 | 39.1 | 44.7 |
| required pump power (kW) | 95.5 | 106.7 | 122.1 |
| geothermal power (MW) | 1.07 | 1.24 | 1.44 |
| COP (kW/kW) | 10.8 | 11.5 | 12.2 |
| aquifer pressure at producer (bar) | 105.78 | 112.1 | 118.46 |
| aquifer pressure at injector (bar) | 105.86 | 112.32 | 118.34 |
| pressure difference at producer (bar) | 23.12 | 23.51 | 23.91 |
| pressure difference at injector (bar) | 37.0 | 37.42 | 37.89 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 43.07 | 44.98 | 46.91 |
| temperature at heat exchanger (°C) | 41.41 | 43.1 | 44.88 |

| base case (median value inputs) | value |
|---|---|
| aquifer kH net (Dm) | 4.76 |
| mass flow (kg/s) | 11.2 |
| pump volume flow (m³/h) | 39.2 |
| required pump power (kW) | 107.1 |
| geothermal power (MW) | 1.24 |
| COP (kW/kW) | 11.5 |
| aquifer pressure at producer (bar) | 112.02 |
| aquifer pressure at injector (bar) | 112.02 |
| pressure difference at producer (bar) | 23.48 |
| pressure difference at injector (bar) | 37.47 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 44.98 |
| temperature at heat exchanger (°C) | 43.12 |
| pressure at heat exchanger (bar) | 36.03 |

* @ mid aquifer depth

**Figuur 4-9: DoubletCalc1D simulatie voor het ZEZ1F Randcarbonaat, op basis van de reservoir-eigenschappen bij EDE-01.**

### 4.5.3 Aanbeveling alternatieve ontwerpen geothermie

Hoewel DoubletCalc1D een eerst orde analyse biedt, is de simulatie bedoeld voor een doublet en kent de tripletsimulatie onzekerheden. Andere software programma's, zoals PyFASTWells kunnen beter omgaan met een triplet. Mochten er rond Regio Foodvalley meer concrete vragen komen over de inzetbaarheid van geothermie op alternatieve manieren, dan kunnen andere ontwerpen, zoals een triplet, horizontaal boren of coproductie mogelijk een uitkomst bieden, hoewel hier ook hogere kosten mee gepaard gaan. PanTerra adviseert dit nader te onderzoeken, mocht er een serieuze vraag zijn naar geothermie.

# 5 Screening warmte-opslag en ondiepe aardwarmte

Dit hoofdstuk dient ter aanvulling van Hoofdstuk 6 van het hoofdrapport. Er wordt een meer uitgebreide analyse geboden over de verschillende laagpakketten die eventueel geschikt zijn voor warmte-opslag. De belangrijkste conclusies worden gegeven in van het hoofdrapport.

In dit onderzoek zijn aquifers op ondiepe (<500 meter) en middelmatige diepte (500-1500 meter) in kaart gebracht voor warmte-opslag en ondiepe aardwarmte, in de buurt van doubletlocaties waar aardwarmte mogelijk geproduceerd kan worden. Daartoe is een literatuurstudie uitgevoerd om vast te stellen welke aquifers er in de ondergrond van Regio Foodvalley aanwezig zijn en wat daarvan de eigenschappen zijn. De studie Dinkelman et al. (2020) geeft een regionaal beeld voor zandlagen en hoe kansrijk deze zijn voor warmte-opslag in de ondiepe ondergrond. De volgende kansrijke lagen zijn geïdentificeerd:

De volgende kansrijke lagen zijn geïdentificeerd:

1. Peize en Waalre Formatie
2. Maassluis Formatie
3. Oosterhout Formatie

Overige aquifers, zoals de Peelo Formatie, de Kiezeloöliet Formatie, het Zand van Brussel Laagpakket en de Dethfurth Formatie zijn niet aanwezig in het studiegebied (Dinkelman et al., 2020; ThermoGIS, 2026). De Breda Formatie komt voor in het studiegebied, maar heeft een ongunstige doorlatendheid. Dinkelman et al. (2020) draagt een classificatie aan voor de geschiktheid van hoge temperatuur opslag, zoals weergegeven in de onderstaande tabel (Tabel 5-1). Uit de analyse in Hoofdstuk 4 is gezien dat de temperatuur in het Slochteren reservoir tot ongeveer 45-60 °C is ter plaatse van de mogelijke doubletlocaties. Geproduceerd geothermisch water valt dan binnen het domein van lage temperatuur. Echter is de studie van Dinkelman et al. (2020) wel als relevant gezien, omdat het de onderzochte parameters voor warmte-opslag ook van belang zijn voor middelhoge opslag en omdat het geothermische water mogelijk met warmtepompen opgewaardeerd kan worden, waardoor er wel sprake is van hoge temperatuur opslag.

**Tabel 5-1: Classificatie warmte-opslag van Dinkelman et al. (2020)**

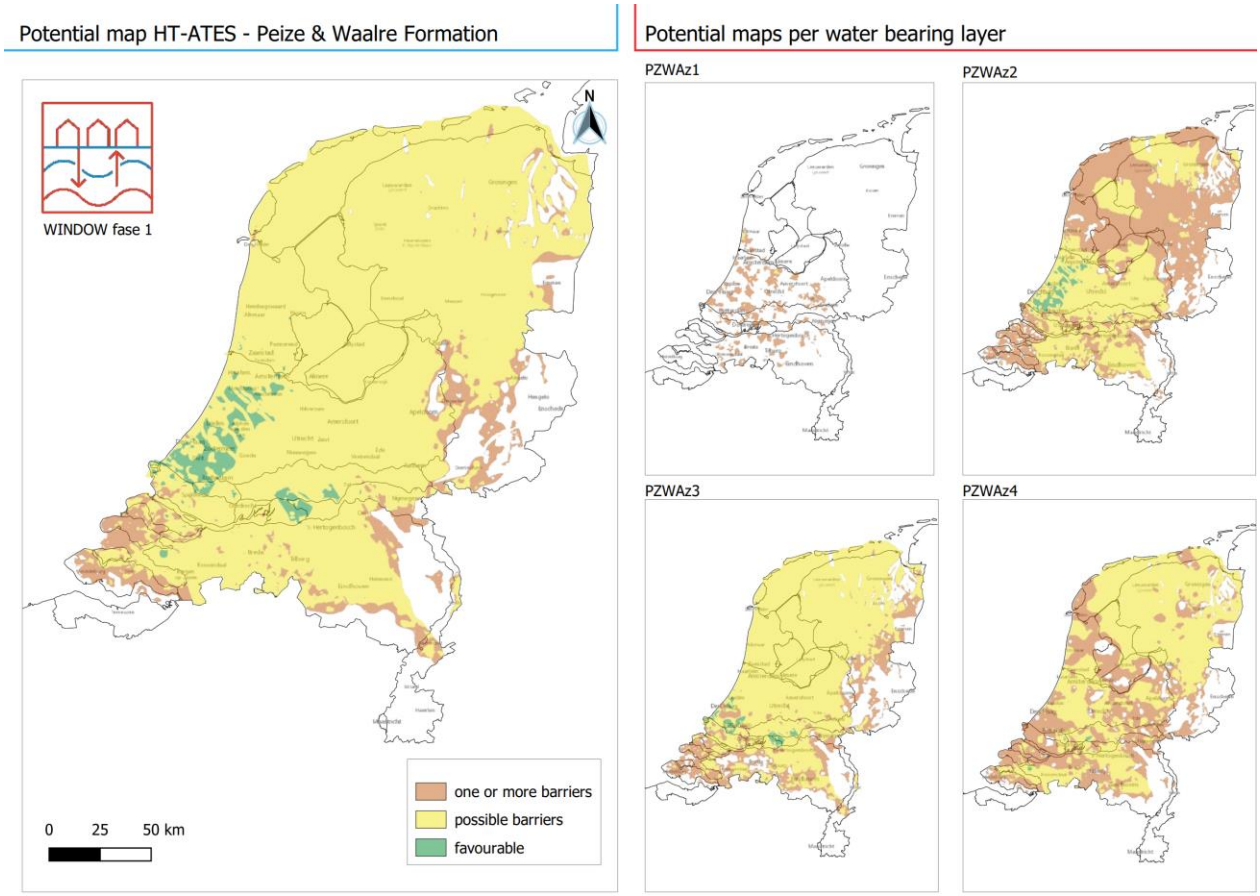
| Parameter | Barrier | Possible barrier | Favourable |
|---|---|---|---|
| Lithology | Silt-clay | Limey sand, glauconite | Sand |
| Depth | | <50, >500 mbgs* | 50-500 mbgs* |
| Thickness sand layer | < 10m | 10-15 m | > 15 m |
| Horizontal hydraulic conductivity – kh value | < 5 m/d | | ≥ 5 m/d |
| Presence of confining cap layer (clay) | | Risk absence cap layer | Certainty about presence |
| Faults | | < 1 km | > 1 km |
| Groundwater flow velocity | | > 20-30 m/y | < 20-30 m/y |
| Chloride concentration | | Fresh and brackish water (saline/fresh water interface) | Saline water |

* meter below ground surface

## 5.1 Peize en Waalre Formatie

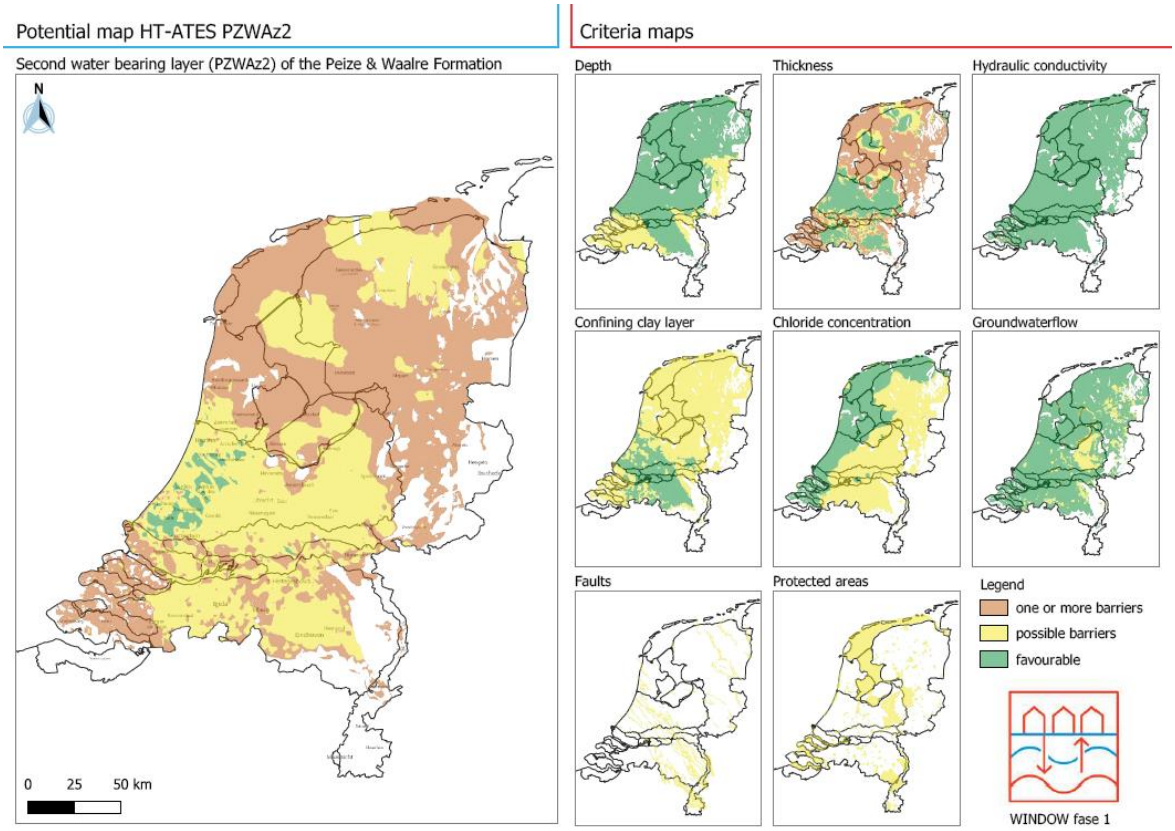
Het onderzoek combineert de lagen binnen de Formatie van Peize en de Formatie van Waalre. De Peize Formatie komt voornamelijk voor in het noordelijke heft van de Nederlandse ondergrond en de Waalre Formatie komt voor door vrijwel het hele land (DinoLoket, 2026). Figuur 5-1 toont de potentie van de Peize en Waalre Formatie.

**Figuur 5-1: Peize en Waalre warmte-opslag**

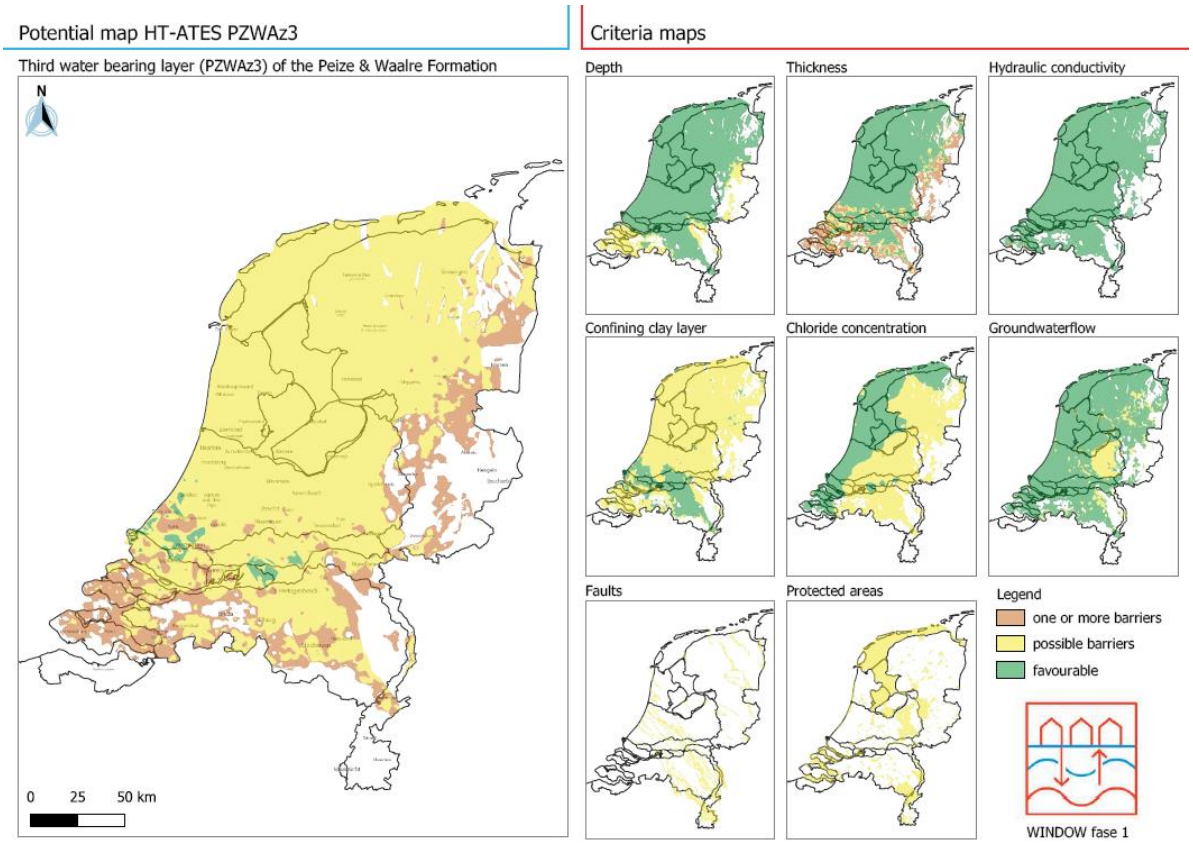



Binnen de Peize en Waalre zijn er vier zandlagen die onderzocht zijn: PZWAz1 tot PZWAz4. Daarvan komt de eerste zandlaag nauwelijks voor in de provincie Gelderland, zoals te zien in Figuur 5-1 en het zand heeft een geringe dikte. Zand 2 en 3 komen voor in een groter deel van de provincie, met uitzondering van het oosten van Gelderland, en zijn daardoor gunstiger voor warmte-opslag. De onderkant van Zand 3 ligt ter plaatse van de prospecten op 70-150 meter diepte. De diepte van de onderkant neemt toe naar het noorden, tot plaatselijk 200 meter diep in het noorden van Gelderland. Mogelijke beperkingen voor Zand 2 zijn de afwezigheid en/of dikte van een afsluitende kleilaag en een lage chloride concentratie in het formatiewater, zie Figuur 5-2 (Dinkelman et al. 2020). Zand 3 (Figuur 5-3) kent dezelfde beperkingen als Zand 2, met een groter gebied waar de afsluitende kleilaag onzekerder is en een lage chloride concentratie in het formatiewater (Dinkelman et al. 2020). Zand 4 ziet er minder gunstig uit voor warmte-opslag (Figuur 5-1), door een minder gunstige distributie van het zand en een sterke variatie in de dikte van het zand (Dinkelman et al. 2020).

**Figuur 5-2: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het PZWA2 zand (Zand 2), Dinkelman et al., 2020.**



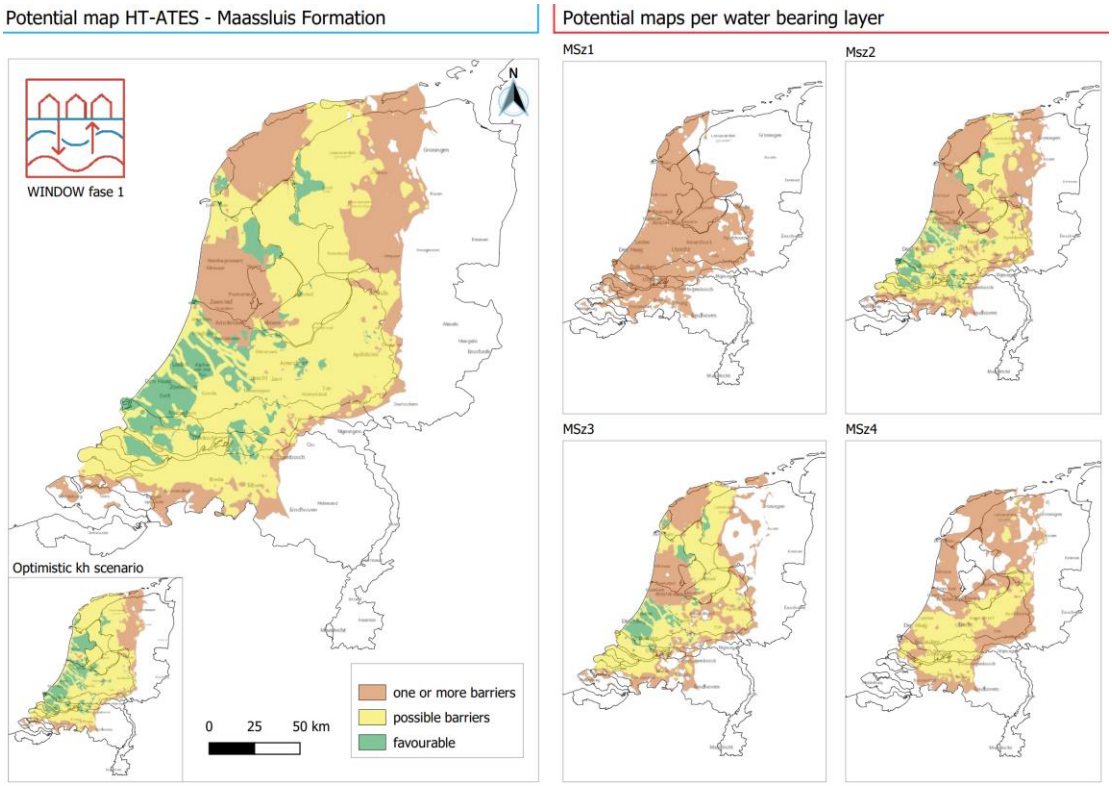

**Figuur 5-3: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het PZWA3 zand (Zand 3), Dinkelman et al., 2020.**



## 5.2 Maassluis Formatie

De Maassluis Formatie omvat opnieuw vier zanden: MSz1-MSz4. De Maassluis Formatie heeft een dikte tot 250 meter (DinoLoket, 2026). Zanden 2 en 3 zijn het meest gunstig voor warmte-opslag, terwijl Zanden 1 en 4 minder gunstig zijn (Dinkelman et al. 2020). De onderkant van Zand 3 ligt rond de prospecten gedefinieerd in Gelderland op zo'n 100-200 meter diepte. Zand 2 binnen de Maassluis Formatie heeft een variabele dikte, wat lokaal een beperkingen vormt volgens Dinkelman et al. (2020). Daarnaast kan de chloride concentratie in het formatiewater een beperking vormen (Figuur 5-5). Zand 3 kent vergelijkbare beperkingen (Figuur 5-6): de dikte is variabel en toont heterogeniteit, naast een lage concentratie chloride in het formatiewater (Dinkelman et al. 2020).

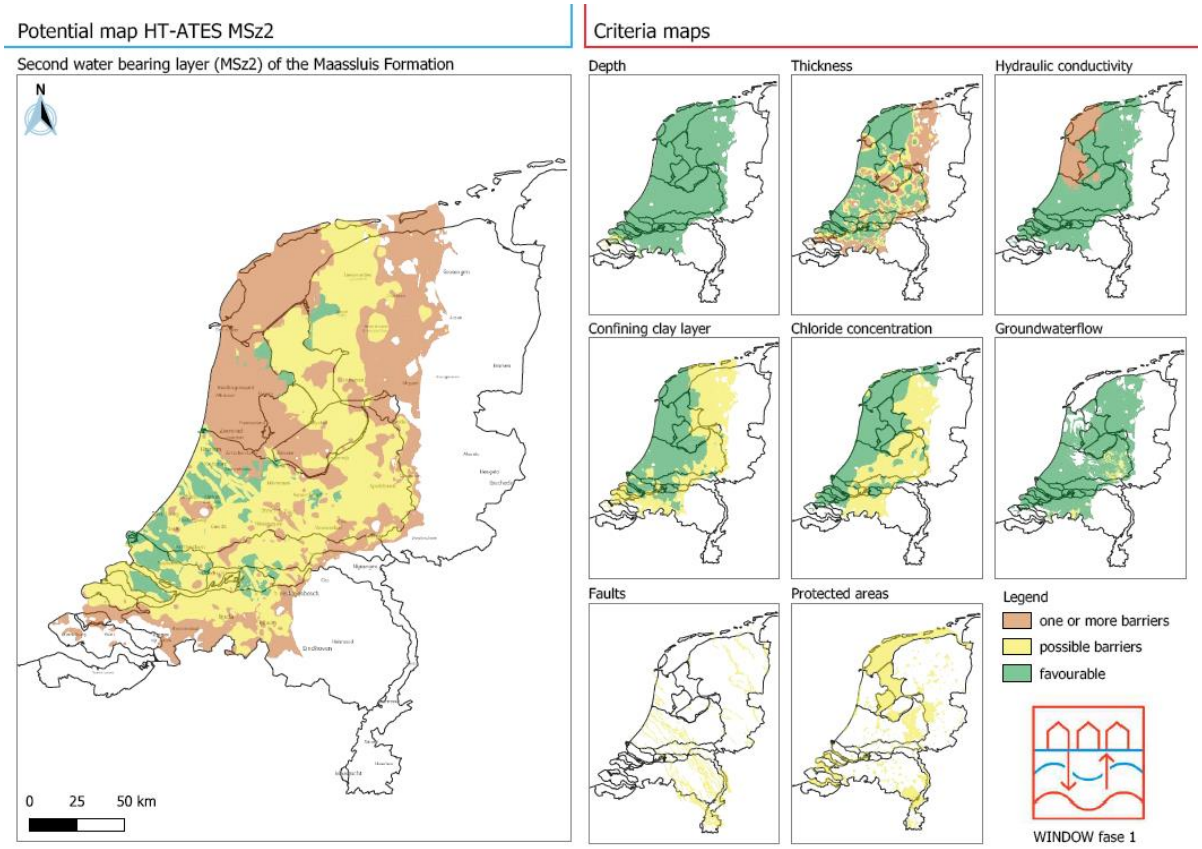
**Figuur 5-4: Maassluis Formatie warmte-opslag**



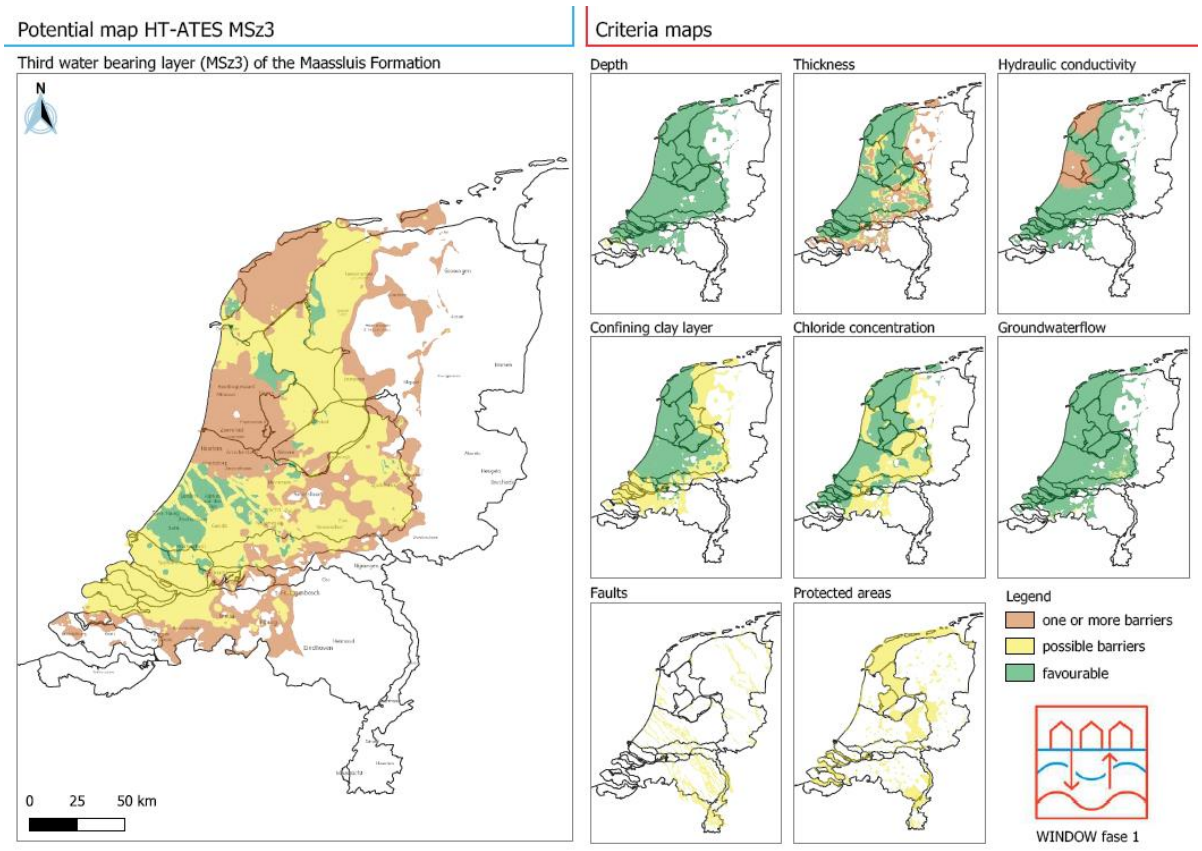

## 5.3 Oosterhout Formatie

De Oosterhout Formatie is binnen de ondiepe aardlagen met 150-250 meter diepte het meest diep gelegen rond de gedefinieerde prospecten. Er zijn twee zanden binnen de Oosterhout Formatie, waarvan enkel Zand 2 positieve indicaties laat zien (Figuur 5-7). Zand 1 heeft een beperkte distributie en een geringe dikte, waardoor het zand over het algemeen minder goed scoort in de analyse van Dinkelman et al. (2020). Zand 2 heeft gunstigere parameters (Figuur 5-8). Lokaal in Prospect 1 is het zand afwezig. In de andere prospecten scoort het zand echter positief (Figuur 5-7). Ter plaatse van de prospecten is de afwezigheid en dikte van een afsluitende kleilaag een mogelijke beperking.

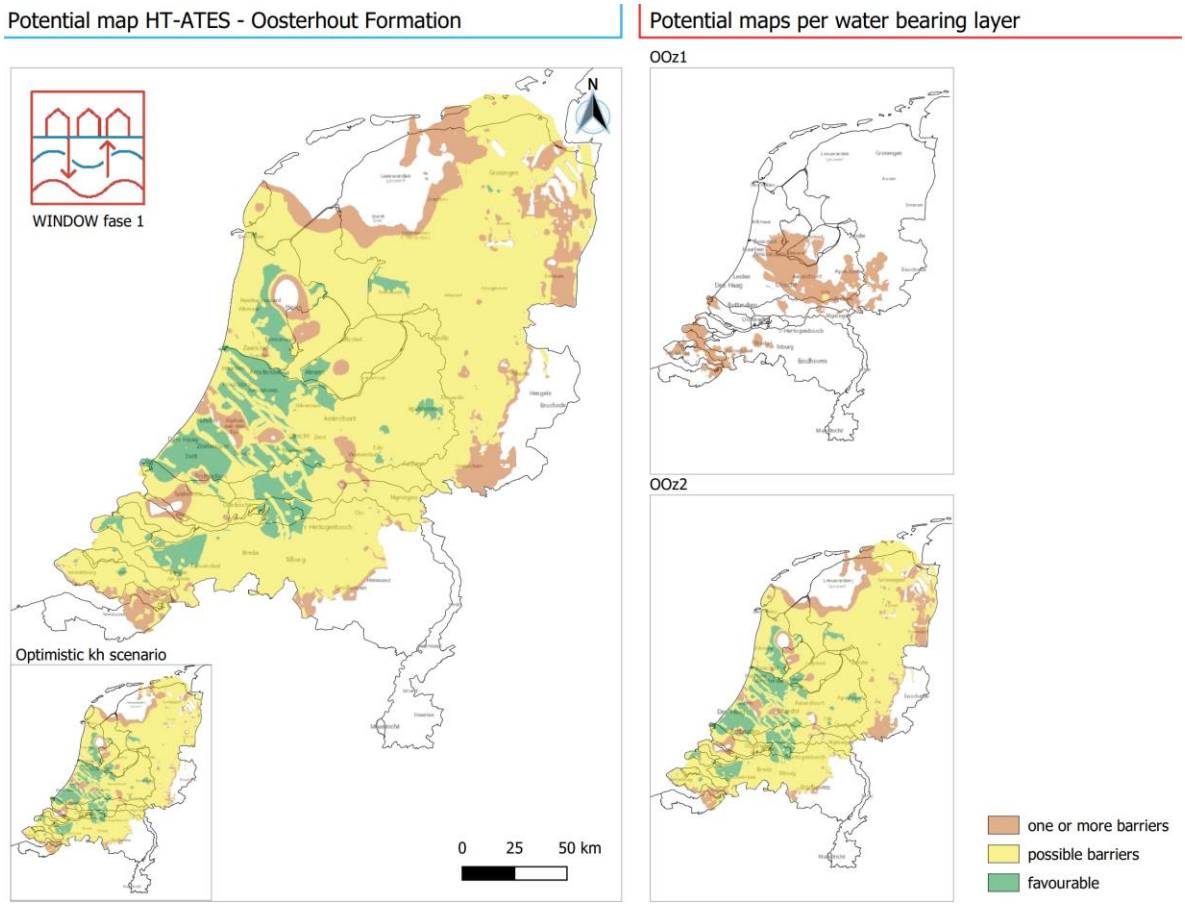
**Figuur 5-5: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het MSz2 zand (Zand 2), Dinkelman et al., 2020.**



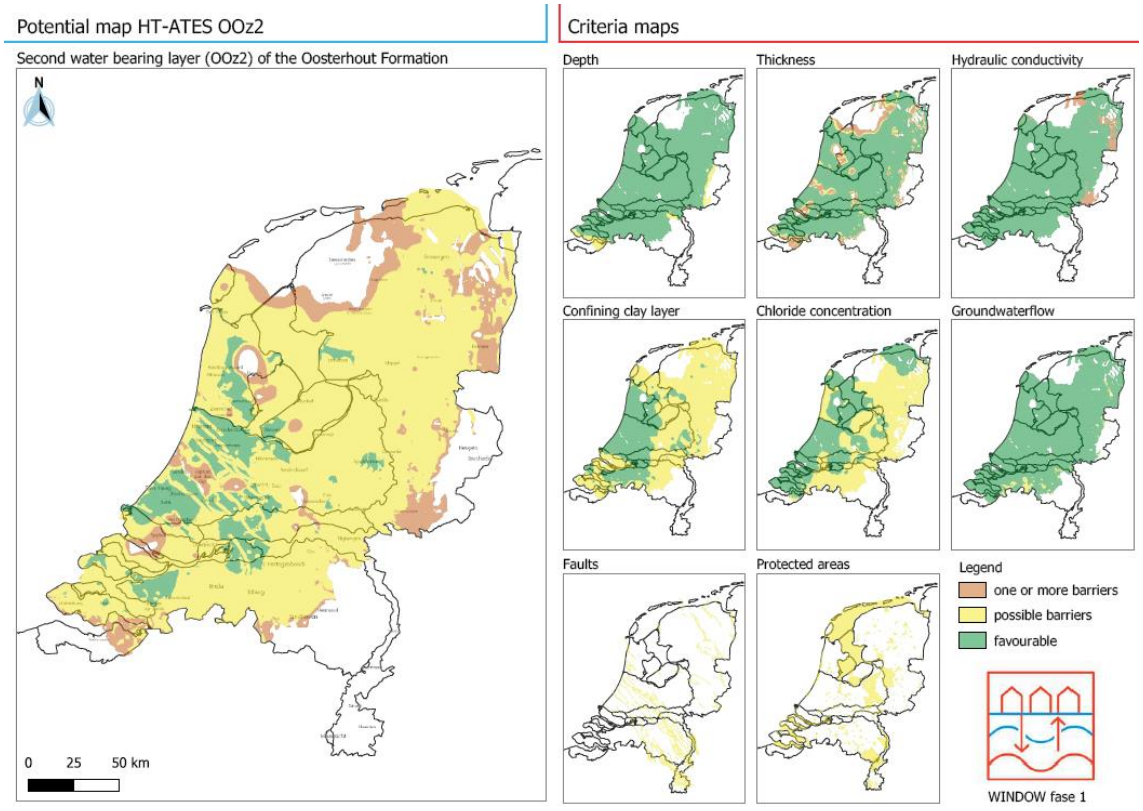

**Figuur 5-6: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het MSz3 zand (Zand 3), Dinkelman et al., 2020.**



**Figuur 5-7: Oosterhout Formatie warmte-opslag (Dinkelman et al. 2020).**




**Figuur 5-8: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het OOz2 zand (Zand 2), Dinkelman et al., 2020.**



## 5.4 Conclusies screening warmte-opslag

Binnen het studiegebied van de provincie Gelderland zijn de volgende aardlagen kansrijk voor warmte-opslag ter plaatse van de prospecten: zanden 2 en 3 van de Peize en Waalre Formatie, zanden 2 en 3 van de Maassluis Formatie en zand 2 van de Oosterhout Formatie. Deze zanden komen allen voor op een diepte van <500 meter en vallen dus in het bereik van de ondiepe ondergrond. Hoewel de genoemde zanden het meest kansrijk zijn, kennen ze ook mogelijke beperkingen. Hoofdzakelijk zijn dit de afwezigheid en/of dikte van een afsluitende kleilaag en de lage concentratie van chloride in het formatiewater. Een meer gedetailleerd onderzoek op het niveau van de prospecten of doubletlocaties moet uitwijzen of de zanden kansrijk zijn voor warmte-opslag, ondanks de mogelijke beperkingen.

# 6 Geologische trends

In dit hoofdstuk worden geologische trends in de provincie Gelderland besproken. Het doel van het hoofdstuk is om algemeen te beschrijven waarom er laterale heterogeniteit is binnen reservoirs in de provincie en wat het effect is op de potentie voor geothermie.

## 6.1 Zechstein 1 Randcarbonaat (ZEZ1F)

### 6.1.1 Zechstein algemeen

De Zechstein Groep omvat een pakket sedimenten uit het Laat Perm. De groep bestaat voornamelijk uit mariene evaporieten zoals steenzout en anhydriet, kalkstenen en enkele kleistenen en zandstenen (DinoLoket, 2026). De Zechstein Groep is afgezet in 5 cycli, die in de naam worden aangeduid door Z1, Z2 etc. De cycli zijn gerelateerd aan zeespiegel variaties waarbij zeespiegel stijgingen (transgressie) worden gevolgd door perioden van opdroging en zeespiegel daling. De Zechstein Groep is in Nederland zeer relevant, omdat het de belangrijkste afsluitende laag vormt voor de Formatie van Slochteren reservoir. Daarnaast zijn er enkele olie- en gasvelden aangetroffen in Zechstein carbonaten.

Carbonaten in de oudste en stratigrafisch onderste cyclus, de Z1 cyclus, zijn afgezet op platforms en hellingen. De carbonaten komen lokaal voor en zijn van relatief kleine omvang. Vergeleken met de andere cycli binnen de Zechstein Groep is de Z1 cyclus het meest naar het zuiden afgezet. Figuur 6-1 toont een kaart met de locatie van afzettingen van de Z1 carbonaten (Bouroullec and Geel, 2025).

### 6.1.2 ZEZ1F reservoirkwaliteit

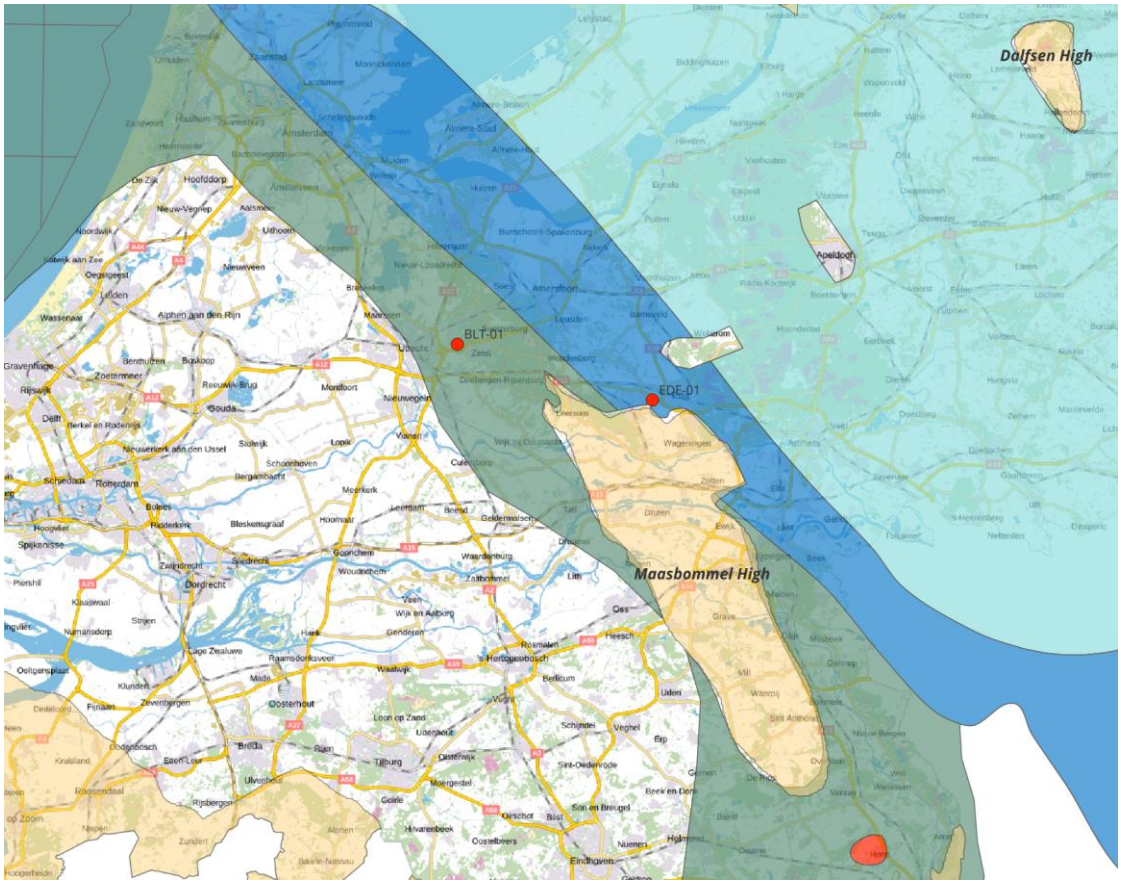
De reservoirkwaliteit van carbonaten in de Zechstein Groep is sterk afhankelijk van het afzettingsmilieu en van diagenese. Carbonaten afgezet aan de randen van de platforms kunnen meer dan 20% porositeit hebben (GEODE Atlas, 2026). Het ZEZ1F is een voorbeeld van zo'n carbonaat. De Zechstein 1 Randcarbonaat (ZEZ1F) is aangetroffen in de EDE-01 put. Figuur 6-2 toont dat de EDE-01 put in het afzettingsgebied ligt van het randcarbonaat. Uit de puttest is gebleken dat deze laag poreus is en doorlatend is voor water. De laag heeft een dikte van 27 meter en een doorlatendheid van 4 tot 6 Dm in EDE-01. De temperatuur in het ZEZ1F is 47 °C (SCAN nieuwsbericht, Productie- en injectietesten onderzoeksboring Ede afgerond - SCAN aardwarmte). Figuur 6-2 toont verder dat de afzetting van het ZEZ1F zich uitstrekt in een smalle band over heel Nederland, met een noordwest, zuidoost oriëntatie. Binnen deze band bestaat de kans om het ZEZ1F van goede reservoirkwaliteit aan te treffen.

Daarnaast ligt de EDE-01 put op de rand van het Peel-Maasbommel Complex, waar het Randcarbonaat deels geërodeerd is (Figuur 6-2). Dat is te zien doordat de contour van het Peel-Maasbommel complex zich insnijdt in de band waar het Zechstein carbonaat voorkomt. Erosie kan de reservoirkwaliteit positief beïnvloed hebben, bijvoorbeeld door uitloging van het carbonaat, waardoor de porositeit hoger kan zijn.

Door de beperkte dikte van het carbonaat is het reservoir op zichzelf niet interessant voor de ontwikkeling van geothermie. Het reservoir kan echter wel gezien worden als toevoeging, bijvoorbeeld coproductie uit het Rotliegend en Zechstein carbonaat. Dit is beschreven in hoofdstuk 4.5.1 van de geologische bijlage.




**Figuur 6-1: Sedimentaire facieskaart voor het Zechstein 1 carbonaat (Bouroullec & Geel in ten Veen et al., 2025).**

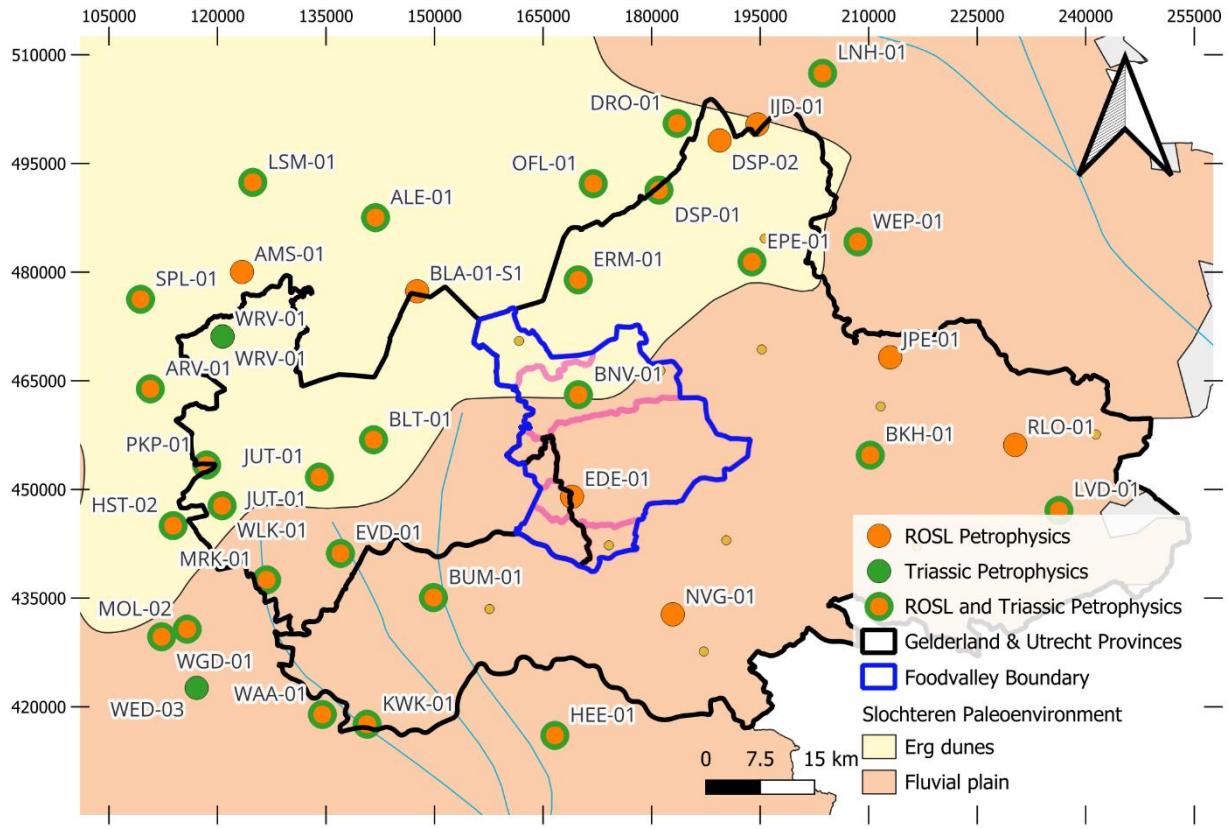



**Figuur 6-2: Facieskaart van Z1 carbonaten, met het randcarbonaat in donkerblauw, ten opzichte van de EDE-01 put en het Maasbommel Hoog (oranje) op basis van (Bouroullec & Geel in ten Veen et al., 2025).**

## 6.2 Formatie van Slochteren trends

De Slochteren-formatie maakt deel uit van de Rotliegend-groep en werd afgezet in een groot continentaal bekken in een warm en droog klimaat. Vanwege dit paleoklimaat bestaat de Slochteren-formatie voornamelijk uit fluviatiele en eolische zandstenen (Figuur 6-3).

Het reservoir is uitgebreid bestudeerd in de EBN Rotliegend Legacy Core Study, waarbij 34 putten in en rond de provincies Utrecht en Gelderland en meer noordelijke delen van het land zijn onderzocht. Uit het onderzoek bleek dat het kernmateriaal over het algemeen wordt gedomineerd door lateraal continue zandsteenintervallen, die grotendeels passen bij droge eolische afzettingsmilieus. Deze facies worden soms onderbroken door dunne afzettingen van natte eolische zandvlaktes. Rivierafzettingen komen zelden voor, ze komen voornamelijk voor aan de basis van het Slochteren, met een maximale dikte van 15 m in kernen. Uit de samengestelde logs van put DSP-02 blijkt echter dat er lokaal een dikkere laag van ongeveer 40 m voorkomt. Uit de analyse van dunne doorsnedes bleek dat de detritische mineralenassemblage voornamelijk bestaat uit kwarts, met kleine tot matige hoeveelheden sedimentaire, metamorfe en plutonische gesteentefragmenten. Kaliumveldspaat en plagioklaas komen minder vaak voor, deels als gevolg van alteratie- en/of secundaire oplossingsprocessen (PanTerra & EBN, 2025).

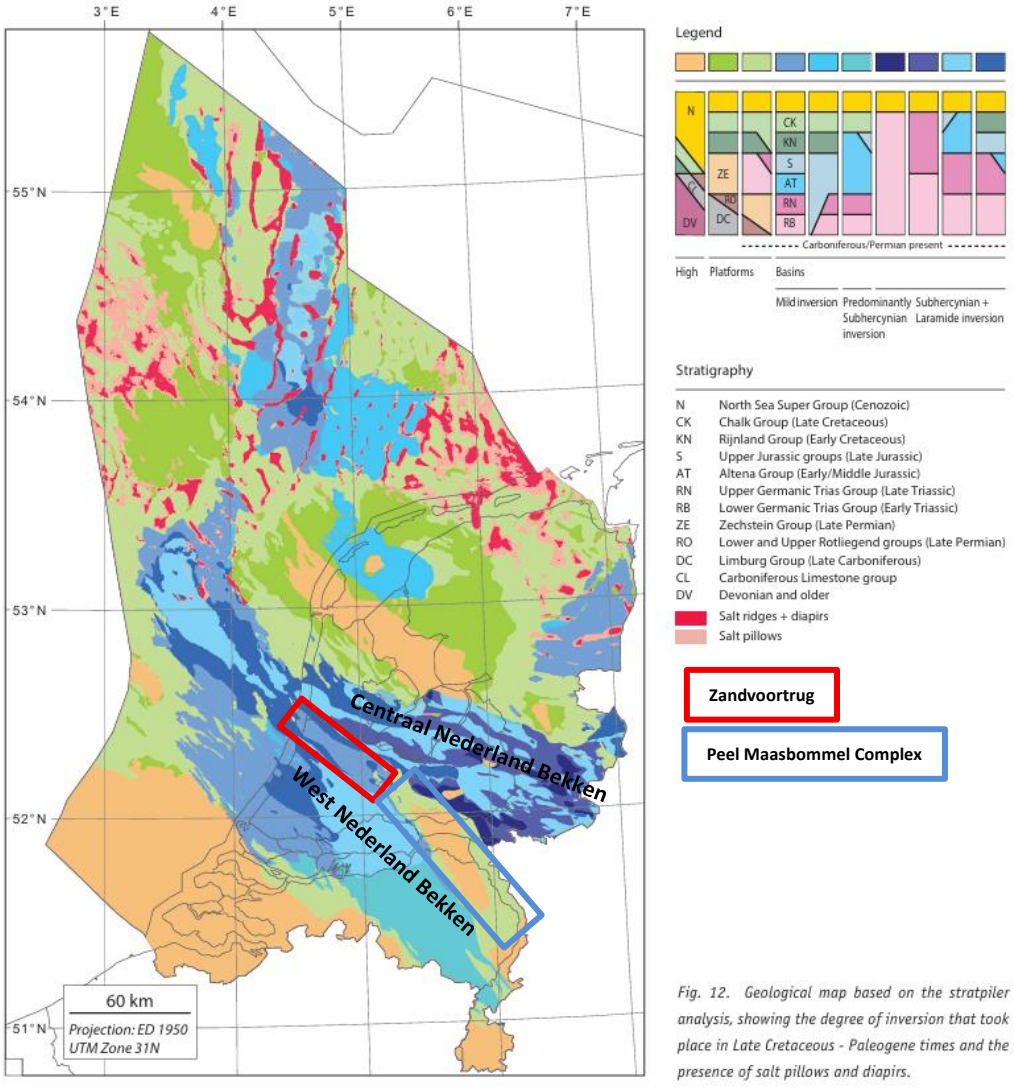



**Figuur 6-3. Afzettingsmilieu van het Boven-Slochteren Laagpakket (Rotliegend) (ten Veen et al., 2025).**

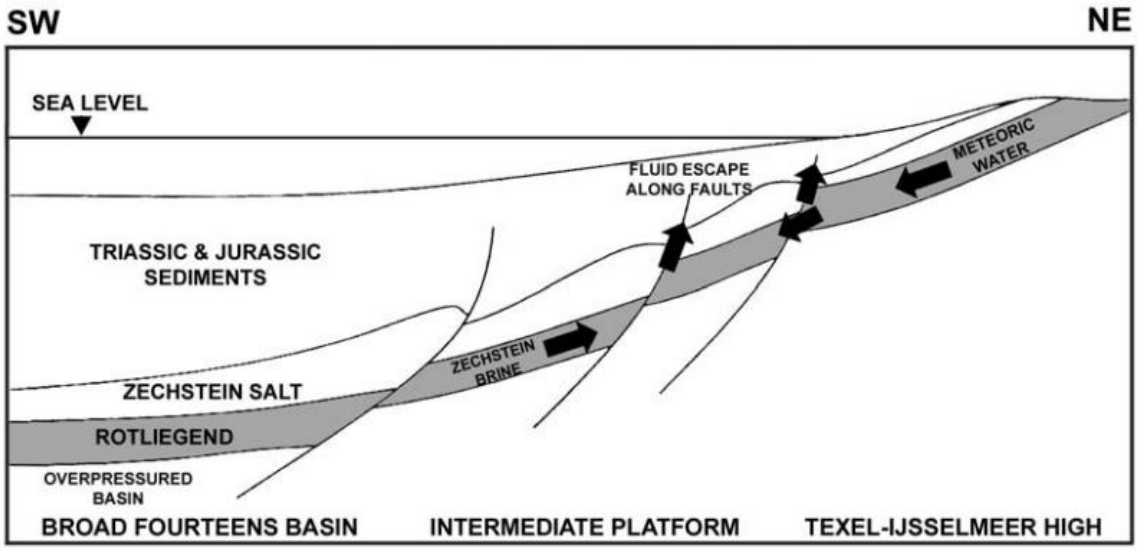
Uit het onderzoek bleek ook dat de complexe begravingsgeschiedenis van de verschillende structurele elementen in de ondergrond een belangrijke invloed heeft op de reservoirkwaliteit van het Slochteren. De variabele begravingsdiepte beïnvloed de diagenetische evolutie van het reservoir, waarbij inklinking, cementatie en korreloplossing de belangrijkste processen waren die van invloed waren op de reservoirkwaliteit. Op basis van de reservoirkwaliteit en dunne doorsnedes werd vastgesteld dat het reservoir het diepst begraven in het West Nederland Bekken, waarbij vijf putten een sterke verdichting en cementatie lieten zien, wat leidde tot een slechte reservoirkwaliteit in dit bekken. Ter vergelijking: het Centraal Nederland Bekken vertoont een meer gevarieerde begravingsgeschiedenis op basis van de kerngegevens, waarbij de noordelijke rand het minst begraven is geweest. Wat de cementatie betreft, hebben blokvormige cementen lokaal geleid tot een vermindering van de porieruimtes, en illiet correleert met een horizontale permeabiliteitsafname van 1,5 tot 4 ordes van grootte, met een beperkte impact op de porositeit. Factoren die gunstig zijn voor de reservoirkwaliteit zijn onder meer een beperkte begravingsdiepte en korreloplossing en de ontwikkeling van dunne illietcoatings op korrels (PanTerra & EBN, 2025).

Binnen het studiegebied bevinden zich het West Nederland Bekken, het Centraal Nederland Bekken en het Peel-Maasbommel Complex. De gebieden met de minste begraving bevinden zich waarschijnlijk op het Peel-Maasbommel Complex en het gebied tussen de twee bekkens. Het Peel-Maasbommel Complex is vermoedelijk verbonden met de Zandvoortrug in het westen (Figuur 6-4). Hoewel er in het gebied maar weinig putten zijn geboord, laten twee putten goede reservoirkenmerken op het complex zien, wat erop wijst dat door de lage begravingsdieptes de goede reservoirkwaliteit is behouden (NVG-01, EDE-01). Verder wordt het Peel-Maasbommel Complex gekenmerkt door sterke erosie van de basale Krijt-discordantie die zich uitstrekt tot in het Trias en dieper. Deze ondergrens van het Krijt heeft er mogelijk

toe geleid dat meteorisch water door de Formatie van Slochteren reservoir kon stromen en kaliumveldspaat kon oplossen, wat mogelijk heeft geleid tot de vorming van kaoliniet- en kwartsovergroeiingen (Figuur 6-5) (Ziegler, 2006). De impact hiervan op de reservoirkwaliteit is moeilijk te beoordelen, maar kan mogelijk de reservoirkwaliteiten in dit gebied beïnvloeden.




**Figuur 6-4: Geologische kaart op basis van de stratpiler-analyse. De kaart geeft de mate van inversie weer die plaatsvond in het late Krijt – Paleogeen (Kombrink et al., 2006).**



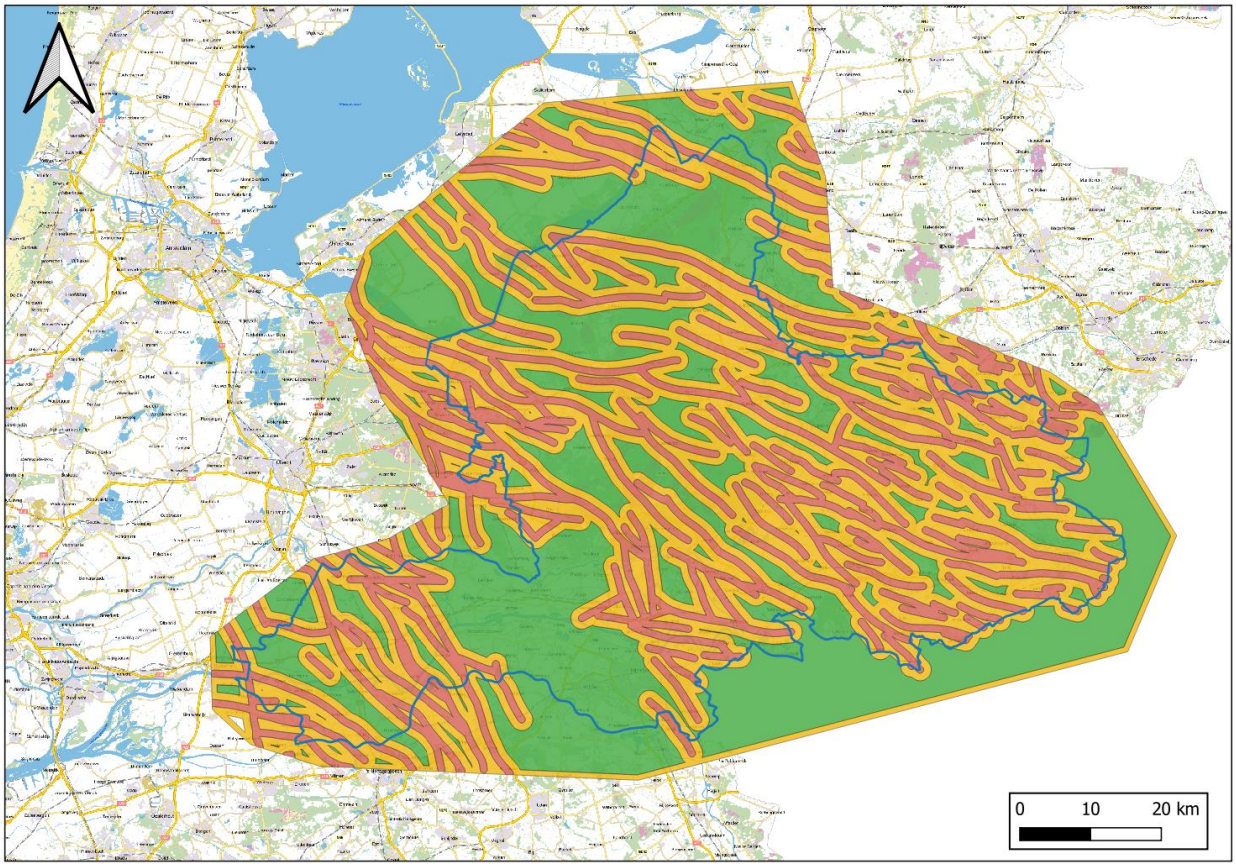

**Figuur 6-5: Schematische weergave van de structurele relaties in het Trias, met de geërodeerde structurele hogen en de blootstelling van het Rotliegend aan meteorisch water (Ziegler, 2006).**

# 7 Onzekerheidskaarten

Dit hoofdstuk vat de resultaten en de aanpak samen die zijn gebruikt om de risico's en onzekerheden onder het oppervlak in het studiegebied in kaart te brengen. Drie componenten – het risico van geologische complexiteit, het risico van de aanwezigheid van reservoirs en de onzekerheid van de gegevens – werden afzonderlijk geëvalueerd en vervolgens gecombineerd in een totale risico- en onzekerheidskaart met behulp van een bull's-horn-matrix. Alle kartering en ruimtelijke analyse werden uitgevoerd in QGIS.

## 7.1 Geologische complexiteit / nabijheid van breuken

Geologische complexiteit weerspiegelt het risico dat gepaard gaat met de nabijheid van in kaart gebrachte breuken. Omdat breuken voornamelijk worden geïnterpreteerd op 2D-seismische lijnen, is hun exacte positie inherent onzeker. Daarom werden afstandsbuffers gebruikt om het niveau van geologisch risico toe te wijzen. Bij deze analyse is uitgegaan van breuken op het niveau van de Formatie van Slochteren reservoir.




**Figuur 7-1: De kaart toont het risico van geologische complexiteit. De kleuren geven het geologische risico weer ten opzichte van in kaart gebrachte breuken: groene gebieden staan voor een laag risico, gele voor een matig risico en rode voor een hoog risico.**

Gebieden die meer dan 1,5 km van in kaart gebrachte breuken liggen, worden geclassificeerd als een laag risico (groen). Op deze afstand is de invloed van breuken minimaal en is er voldoende ruimte beschikbaar voor een veilige plaatsing van injectie- en productieputten. De tussenliggende zone, tussen ongeveer 0,5 en 1,5 km van breuken, vertegenwoordigt een matig risico (oranje). Binnen deze gebieden ontstaat onzekerheid door zowel de nauwkeurigheid van breukkartering als de mogelijke interactie met het

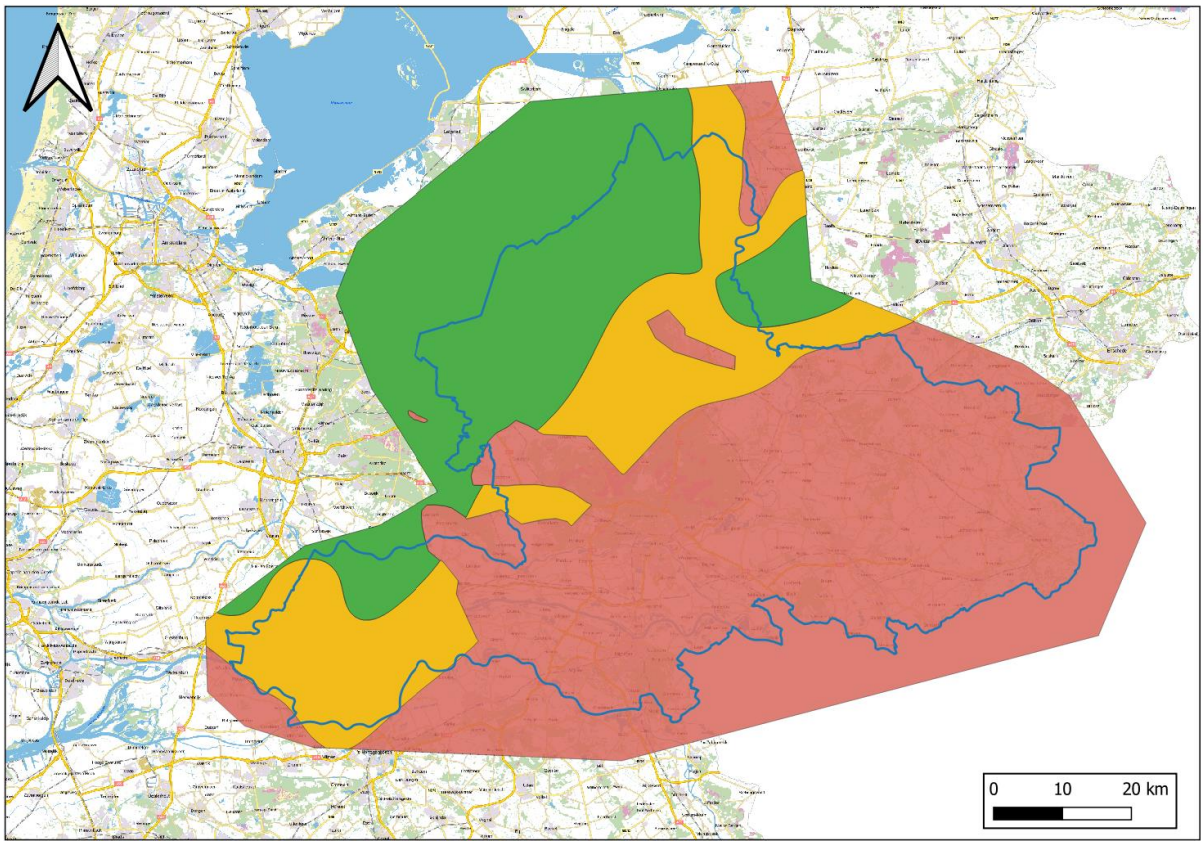
koudefront. Gebieden binnen 0,5 km van in kaart gebrachte breuken worden als hoog risico beschouwd (rood). Deze locaties combineren een sterke structurele complexiteit met de hoogste kans op hydraulische of thermische interactie en zijn over het algemeen ongeschikt voor boren of injectie in de regionale screeningfase (Figuur 7-1).

Deze kaart is opzettelijk gegeneraliseerd en komt overeen met het regionale schaalniveau van de studie. Gedetailleerdere structurele analyses, zoals het beoordelen van individuele breukverschuivingen, moeten worden uitgevoerd tijdens latere prospectevaluatie- en putplanningsfasen.

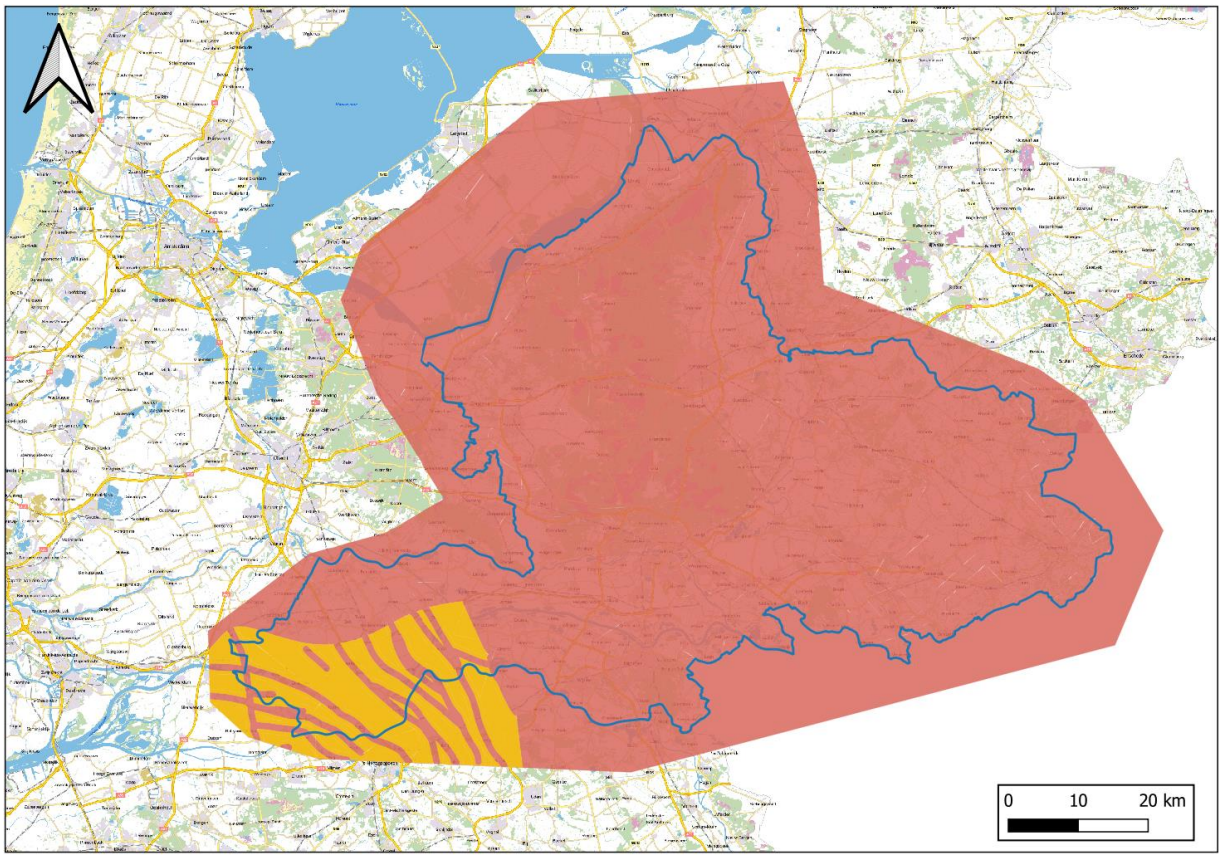
## 7.2 Aanwezigheid van een voldoende dik reservoir

De aanwezigheid van een voldoende dik reservoir wordt weergegeven aan de hand van de geïnterpreteerde bruto dikte van het reservoir, wat een duidelijke indicatie geeft van de potentiële geothermische productiviteit. Gebieden met een reservoirdikte van meer dan 70 m worden geïnterpreteerd als een laag risico (groen), 40-70 m als een matig risico (oranje) en minder dan 40 m als een hoog risico (rood). Deze aanpak maakt een snelle regionale screening mogelijk zonder dat er gedetailleerde modellering van de reservoirkwaliteit nodig is, wat buiten de scope van deze studie valt (Figuur 7-2, Figuur 7-3).

Er zijn risicokaarten voor de aanwezigheid van reservoirs gegenereerd voor twee geothermische reservoirs: Formatie van Formatie van Slochteren (ROSL), Figuur 7-2 en Onder Volpriehausen (RBMVL), Figuur 7-3.




**Figuur 7-2: Kaart van het regionale risico voor de aanwezigheid van een voldoende dik ROSL-reservoir, gebaseerd op geïnterpreteerde reservoirdikte. Groen = laag risico (voldoende dikte), geel = matig risico (dunner reservoir), rood = hoog risico (dun of afwezig reservoir).**

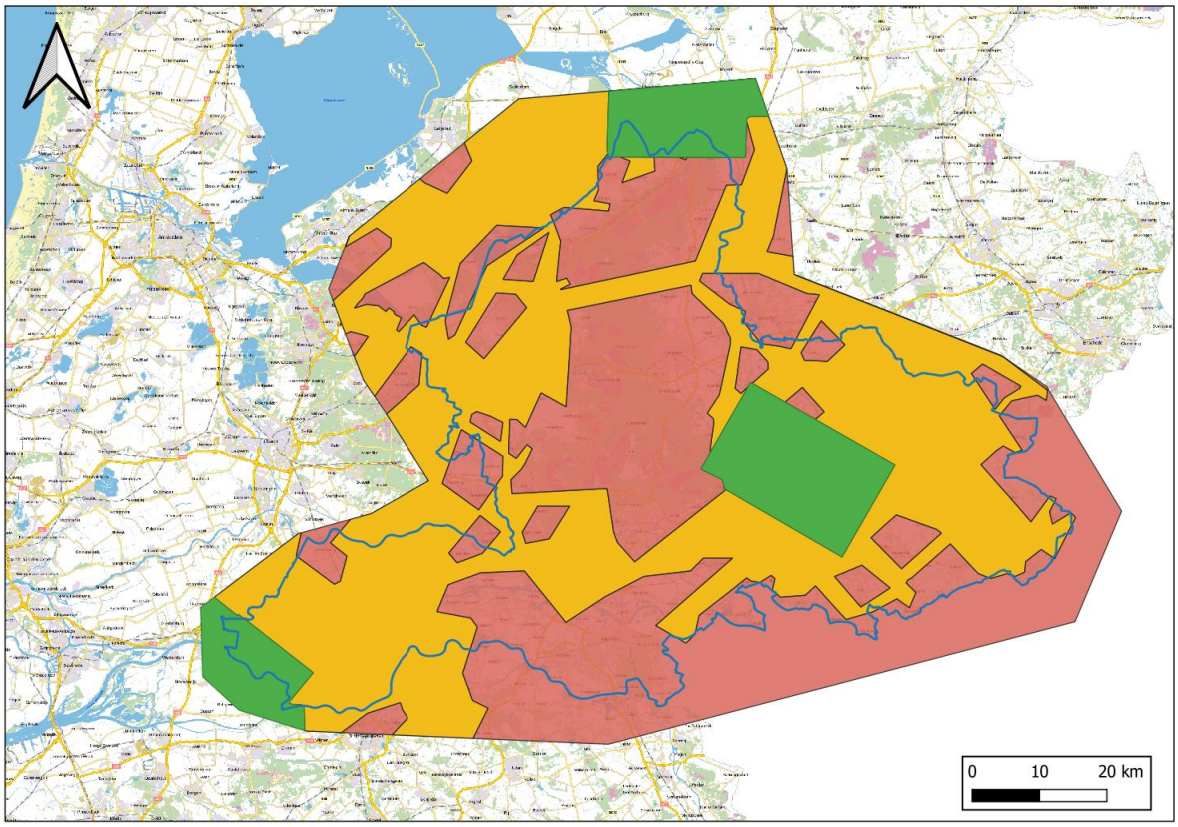



**Figuur 7-3: Kaart van het risico op aanwezigheid van voldoende dikke Onder Volpriehausen-reservoirs. Rood = hoog risico (<40 m dikte), geel = matig risico (40–70 m), groen = niet aanwezig. Blauwe lijn = provinciale grens.**

## 7.3 Onzekerheid ondergrondse gegevens

De kaart met onzekerheid van ondergrondse gegevens geeft het betrouwbaarheidsniveau van de interpretatie van de ondergrond weer, voornamelijk op basis van de beschikbaarheid en het type seismische gegevens. Gebieden die worden gedekt door 3D-seismiek hebben de hoogste betrouwbaarheid (groen), aangezien deze over het algemeen de meest betrouwbare interpretaties opleveren. Zones die alleen door digitale 2D-seismische lijnen gedekt worden, zijn geclassificeerd als matig zeker (oranje). 2D-lijnen bieden controle langs de lijn, maar in het gebied tussen seismische lijnen is er geen data en dus een aanzienlijke onzekerheid. Regio's zonder digitale seismische dekking krijgen een hoge onzekerheid toegekend (rood), aangezien interpretaties in deze gebieden sterk afhankelijk zijn van interpolatie en regionale geologische trends (Figuur 7-4).

Omdat dit een regionaal onderzoek is, zijn individuele seismische lijnen in deze onzekerheidsanalyse niet één voor één beoordeeld of op kwaliteit gerangschikt. Digitale 2D-lijnen werden weergegeven met behulp van buffers van ongeveer 500 meter, waarmee de typische zone werd vastgelegd waarbinnen de lijn structureel geologische beperkingen biedt. Deze gebufferde zones werden vervolgens vereenvoudigd tot continue polygonen om een duidelijk beeld te krijgen van gebieden met relatief betere of slechtere gegevensdekking. Oudere of analoge seismische gegevens – die niet interpreteerbaar zijn en niet in digitale vorm beschikbaar zijn – werden gegroepeerd in de categorie met de hoogste onzekerheid.



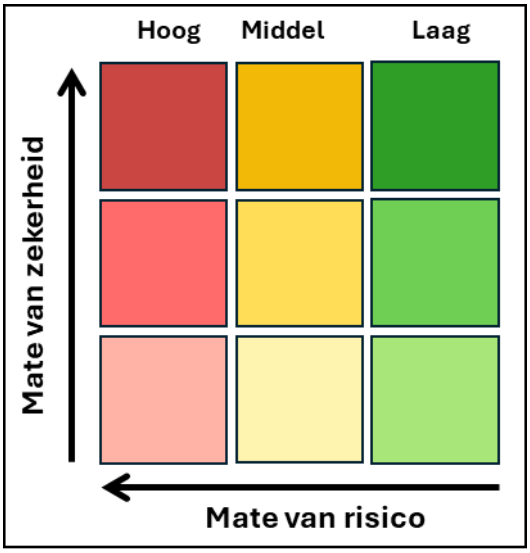

**Figuur 7-4: Kaart van onzekerheid in de ondergrondinterpretatie op basis van seismische dekking. Groen = hoge betrouwbaarheid (3D-seismiek), geel = matige betrouwbaarheid (digitale 2D-seismiek), rood = lage betrouwbaarheid (geen digitale seismiek, afhankelijk van interpolatie).**

## 7.4 Totale risico- en onzekerheidskaart

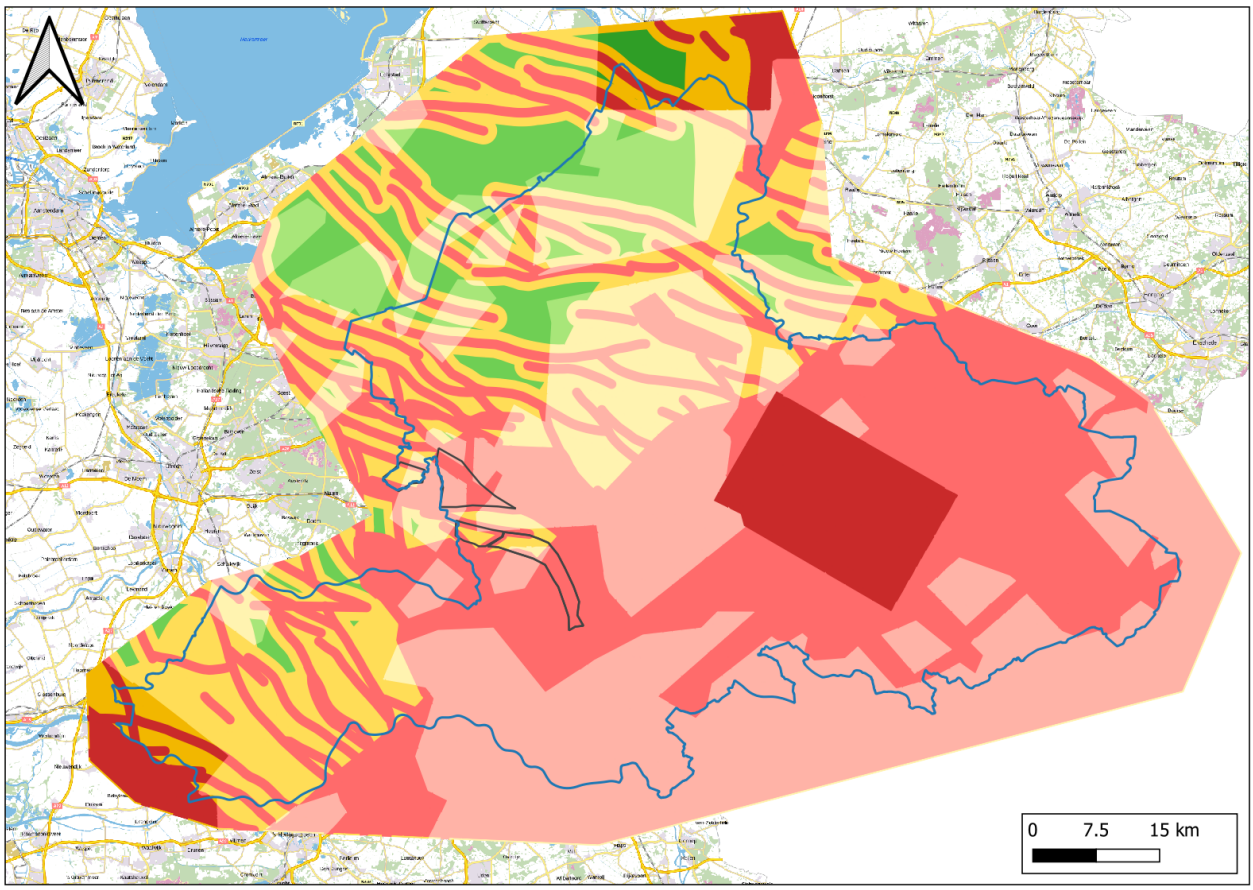
De drie hierboven gepresenteerde kaarten werden gecombineerd tot één algemene risico- en onzekerheidskaart met behulp van een risico-versus-zekerheid matrix (Figuur 7-5). Bij deze methode bepalen de geologische complexiteit en de aanwezigheid van reservoirs de onderliggende risicocategorie, weergegeven door de groen-geel-rode kleurenschaal. De kleurtint geeft de mate van gegevensondersteuning aan en daarmee hoe zeker we zijn van de interpretatie. Donkerdere tinten geven aan dat de interpretatie wordt ondersteund door veel data en daarom een hogere mate van zekerheid heeft; lichtere tinten geven aan waar de interpretatie meer afhankelijk is van interpolatie of schaarse informatie, en daarom een lagere mate van zekerheid heeft.

De risico-versus-zekerheid matrix geeft informatie in twee dimensies weer. Op de horizontale as is de verandering in risico weergegeven (van laag naar hoog), terwijl verticale as de zekerheid weergeeft (van laag naar hoog). Hierdoor kan onderscheid worden gemaakt tussen gebieden met hetzelfde risiconiveau, maar met een verschillende mate van zekerheid. Als gevolg hiervan geeft de kaart duidelijk zones aan die bijvoorbeeld een hoog risico hebben en goed gedefinieerd zijn, een hoog risico hebben maar zeer onzeker zijn, of omgekeerd een laag risico hebben maar onzeker zijn vanwege beperkte gegevensdekking (Figuur 7-6, Figuur 7-7).

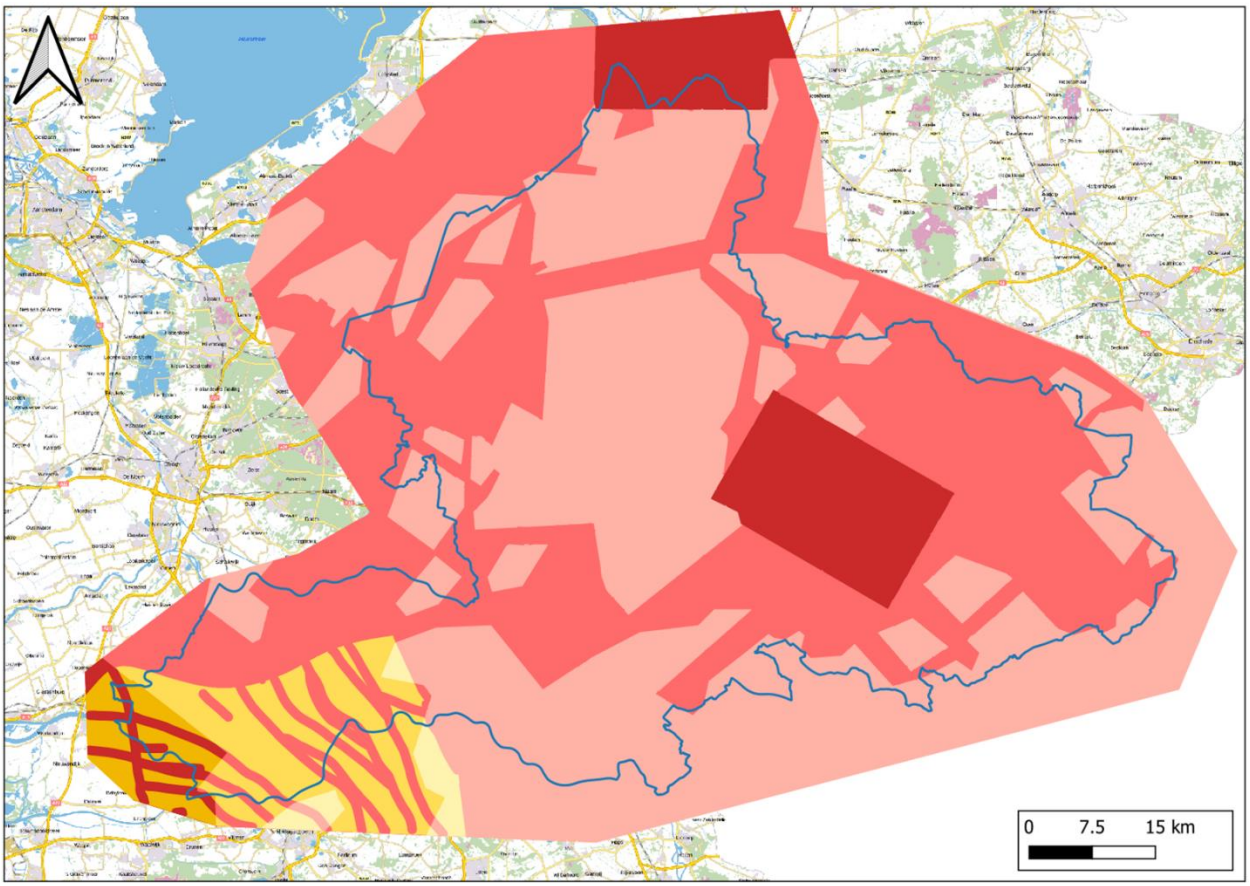
Door deze factoren in één visueel product te integreren, biedt de kaart screening in een vroeg stadium van geothermie ontwikkeling op een regionale schaal. De kaart laat niet alleen zien waar de ondergrondse omstandigheden gunstig of uitdagend lijken, maar ook waar interpretatie het meest zou profiteren van aanvullende gegevensverzameling.




**Figuur 7-5: Risico-versus-zekerheid matrix die risico en zekerheid combineert in één classificatie. Risico neemt toe van rechts naar links, zekerheid van onder naar boven. Kleuren geven gelijktijdig risiconiveau (laag, gemiddeld, hoog) en zekerheid (laag, gemiddeld, hoog) aan.**




**Figuur 7-6: Totale risico- en zekerheidskaart voor het Slochteren-reservoir, die gecombineerde geologische en reservoirrisico's weergeeft, gecorrigeerd voor datagestuurde zekerheid. Kleuren: groen = laag risico, geel = matig, rood = hoog; lichtere tinten = lagere zekerheid, donkerdere tinten = hogere zekerheid.**




**Figuur 7-7: Totale risico- en zekerheidskaart voor het Onder-Volpriehausen reservoir, die gecombineerde geologische en reservoirrisico's weergeeft, gecorrigeerd voor datagestuurde zekerheid. Kleuren: groen = laag risico, geel = matig, rood = hoog; lichtere tinten = lagere zekerheid, donkerdere tinten = hogere zekerheid.**

# 8 Technische vervolgstappen en -onderzoeken

De geothermische vermogenskaarten bieden de mogelijkheid om op een regionale schaal potentiële gebieden voor geothermie ontwikkeling aan te geven. Dit legt een basis voor vervolgstudies, maar identificeert tegelijkertijd ook missende puzzelstukken die in vervolgstudies moeten worden aangepakt. Dit hoofdstuk geeft een kort overzicht van technisch onderzoek dat uitgevoerd kan worden om de ondergrond verder te de-risken.

De begravingsgeschiedenis vormt een belangrijke onzekerheid die in toekomstige studies kan worden aangepakt. Deze onzekerheid bestaat doordat: 1) er verschillende methoden bestaan om de begravingsgeschiedenis te voorspellen, maar deze leiden niet tot een consensus, 2) elke methode heeft zijn eigen aannames en onzekerheden, 3) de studiegebieden liggen in een structureel complex gebied, tussen drie structurele elementen (West Nederland Bekken, Centraal Nederland Bekken en het Peel-Maasbommel Complex). Voor de methode die in dit onderzoek gebruikt is, is een onzekerheidsanalyse uitgevoerd. Uit de analyse bleek dat de belangrijkste gebieden tot 14 MW aan vermogen kunnen verliezen, waardoor de provincie een veel laag potentieel heeft. Deze voorlopige analyse wordt nader toegelicht in het hoofdstuk over petrofysica, zie hoofdstuk 3.5.1. Er worden een aantal aanbevelingen gedaan om de voorspellingen te verbeteren en de daarmee samenhangende onzekerheden beter te begrijpen:

- Literatuuronderzoek naar de begravings- en opheffingsgeschiedenis
- Interpretatie van vitrinietreflectie in SCAN putten, om de maximale begravingstemperatuur en -diepte vast te stellen
- Vergelijking van de verschillende opheffingsmodellen met de in dit onderzoek gebruikte methode
- Verdere ontwikkeling van de sonic velocity van kleilagen, door extra putten mee te nemen, inzicht in de impact van de gebruikte interpolatiemethode (bijv. diffuse versus scherpe grenzen rond de geologische structuren) en de impact van de JUT-01-put.
- De analyse van de onzekerheid over de begraving opnemen in de vermogenskaarten in het hoge en lage scenario

Overige aanvullende onderzoeken zijn: 1) de impact van mogelijk hogere reservoirtemperaturen zoals aangetroffen in de SCAN-putten, 2) aanvullende onzekerheidsanalyse met betrekking tot brijn permeabiliteit en 3) inzicht in de onzekerheid over de aanwezigheid van reservoirs in het gebied.

# 9 Bronnenlijst


Alles over Aardwarmte, https://www.allesoveraardwarmte.nl/

Batzle, M., & Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, *57*(11), 1396-1408.

Bouroullec R., Geel C.R. in in Ten Veen, J., Vis G.J., de Jager J., Wong T.E., 2025. Geology of the Netherlands chapter 4. Permian.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zusmann, J. (2013). An Introduction to the Rock-forming Minerals (3rd ed.). London: Mineralogical Society.

Dinkelman D., van Bergen F., Veldkamp J.G., 2020. Geologisch model, temperatuurmodel voor de ondiepe ondergrond en potentieelkaarten voor HTO in Nederland, *TNO*

ECW Energy, https://www.ecwenergy.nl/

Ganguly, S., Janszen, A., van de Broek, J., ter Borgh, M., de Groot, L., & Kozlowski, M. (2025). Integrated Approach to Characterise Geothermal Reservoir Flow Potential: An example from De Bilt-01. GET2025. Rotterdam, Netherlands: GET2025.

Geothermie Nederland, DAGO, Warmtenetwerk, & EBN. (2018). Master Plan Geothermal Energy in the Netherlands.

Geothermie Nederland, https://geothermie.nl/

Hakvoort, R. (2006). In-situ stress corrections on core porosity – a cookbook. Shell EP Journal of Technology, 7002(17).

Juez-Larré J., Groenenberg R.M., Dinkelman D., Huijskes T.D., Koornneef J.M., van Gessel S.F., Bos C.F.M., in in Ten Veen, J., Vis G.J., de Jager J., Wong T.E., 2025. Geology of the Netherlands chapter 20. Underground storage.

Juhasz, I. (1986). Conversion of routine air permeability data into stressed brine permeability data. Transactions of the SPWLA 10th European Formation Evaluation Symposium (pp. 1-15). Houston: SPWLA.

Kombrink, H., Doornenbal, J. C., Duin, E. J. T., Den Dulk, M., Ten Veen, J. H., & Witmans, N. (2012). New insights into the geological structure of the Netherlands; results of a detailed mapping project. *Netherlands Journal of Geosciences*, *91*(4), 419-446.

Mijnlieff H., Buijze L., Rosendaal E., Schoof F., Vorage R. & van Wees JD., in Ten Veen, J., Vis G.J., de Jager J., Wong T.E., 2025. Geology of the Netherlands chapter 19. Geothermal Energy – from potential plays to successful growth.

Mijnlieff H.F., Obdam A.N.M., van Wees J.D.A.M., Pluymaekers M.P.D., and Veldkamp J.G. (2014). DoubletCalc 1.4 Manual. *TNO*

Nederlands Olie en Gas Portaal, https://www.nlog.nl/

Nelskamp, S., & Littke, R. (2011). Structural evolution, temperature and maturity of sedimentary rocks in the Netherlands: results of combined structural and thermal 2D modelling.

Overheid.nl, Mijnbouwwet, https://wetten.overheid.nl/BWBR0014168/2026-01-01#Hoofdstuk1

Paalvast L., van Thienen-Visser K. (2014). Handleiding geomechanische tool voor breukreactivatie en fracken bij aardwarmtewinning. *TNO*

PanTerra Geoconsultants B.V. & EBN B.V. (2025). EBN SCAN Rotliegend Legacy Core Study – Summary Report

PanTerra Geoconsultants, 2021. Provincie Utrecht Geothermie Potentieel.

PanTerra Geoconsultants, Witteveen+Bos, 2022. Potentieonderzoek geothermie Gelderland.

Peters, E., Reinicke, A., & Omrani, P. S. (2025). Unlocking Low Temperature Geothermal: Key Insights for Exploitation of Geothermal Energy from Medium Depths (500–1500 m). *TNO*

RVO SDE++, https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sde

Schlumberger. (2009). Log Interpretation Charts. Sugarland (TX): Schlumberger.

Schoof, F., van der Hout, M., van Zanten, J., & van Hoogstraten, J. W. (2018). Master Plan Geothermal Energy in the Netherlands. *Stichting Platform Geothermie: Delft, The Netherlands*.

ter Borgh, M., Jansen, A., van den Akker, J., Rehling, J., Gabe van der Weide, J., Zaalberg, G., van den Broek, J. (2025). Dutch Geothermal Potential: Results from the SCAN Exploration Program. Dutch Exploration Day. www.scanaardwarmte.nl.

ThermoGIS, https://www.thermogis.nl/thermogis-mapviewer/

TNO DINOloket, https://www.dinoloket.nl/

Van Dalfsen, W., Doornenbal, J. C., Dortland, S., & Gunnink, J. L. (2006). A comprehensive seismic velocity model for the Netherlands based on lithostratigraphic layers. *Netherlands Journal of Geosciences*, *85*(4), 277-292.

Ziegler, K. (2006). Clay minerals of the Permian Rotliegend Group in the North Sea and adjacent areas. Clay minerals, 41(1), 355-393.

# Appendices

# Lijst van Figuren

Figuur 0-1: Vermogenskaart van de Formatie van Slochteren in de provincie Gelderland. Enkel gebieden met >5 MW zijn weergegeven met kleuren. Niet-gekleurde gebieden kennen geen of te weinig vermogen. Grijs vlak = Formatie van Slochteren niet aanwezig door erosie. Variant van het middel scenario, zonder put WYH-01. ..... 5
Figuur 0-2: De kaart toont een deel van de provincie Gelderland met vijf geïdentificeerde prospecten op basis van de Formatie van Slochteren vermogen groter dan 5 MW. Breuken zijn weergegeven als rode lijnen, de provinciegrens als een zwarte lijn en gebieden waar de Formatie van Slochteren door erosie afwezig is als grijze vlakken. Het geel-gearceerde gebied vormt geen prospect, hier is de ondergrondse onzekerheid te groot. ..... 6
Figuur 0-3: Kaart van de mogelijke doubletlocaties in de provincie Gelderland, weergegeven als zwart omlijnde vlakken van 3000 × 1500 meter op de vermogenskaart. Alleen locaties met een vermogen groter dan 5 MW zijn weergegeven. De zone met een hoog vermogen aan de linkerkant van de kaart is uitgesloten, omdat hier te veel geologische onzekerheid bestaat. ..... 7
Figuur 0-4: Mogelijkheden voor warmte-opslag in de provincie Gelderland (op basis van Dinkelman et al., 2020), zie Tabel 6-1 voor criteria. De geothermie-prospecten zijn aangegeven als zwarte gestippelde lijnen. De blauw omlijnde gebieden duiden kansrijke gebieden aan voor lage temperatuur geothermie, waar >0.5 MW mogelijk is (op basis van ThermoGIS, 2026). ..... 8
Figuur 0-5: Totale risicokaart voor het Formatie van Slochteren-reservoir, gebaseerd op een combinatie van risico en onzekerheid. Kleuren geven het algemene ondergrondse risico voor het succesvol ontwikkelen van geothermie weer (groen: laag, geel: matig, rood: hoog). Tinten geven de zekerheid aan. Zwarte veelhoeken markeren de geïdentificeerde prospecten. ..... 9
Figuur 0-6: De vijf stappen die een aardwarmteproject doorloopt, inclusief de verschillende activiteiten die ondernomen worden per stap (geothermie.nl, ECW.nl). ..... 10
Figuur 1-1: Studiegebied rond de provincie Utrecht, provincie Gelderland en Regio Foodvalley, waarbij seismische lijnen en putten zijn weergegeven die meegenomen zijn in de analyse van dit onderzoek. ..... 15
Figuur 2-1: Overzicht van de dieptes waarop bodemenergie (0-500m), aardwarmte (500-4000m) en ultradiepte aardwarmte (>4000 m) worden gewonnen. De rode put is de productieput, die het warmte water oppompt. De blauwe put is de injector, die het afgekoelde water weer injecteert. ..... 16
Figuur 3-1: Beschrijving van de werkwijze bij de actualisatie van de regionale seismische interpretatie. ..... 18
Figuur 4-1: Schematische dwarsdoorsnede door de ondergrond van provincie Utrecht en Gelderland en Regio Foodvalley (DINOloket), waar het verloop van verschillende aardlagen (kleuren) in de ondergrond zichtbaar is. Hierbij is te zien dat de reservoirs op verschillende diepten voorkomen, doorsneden zijn door breuken en verschillende dikten vertonen langs de dwarsdoorsnede. Zwarte lijnen = breuken, RO = Rotliegend Groep. ..... 21
Figuur 4-2: Stratigrafische kolom van geothermie reservoirs en afsluitende lagen in de Nederlandse ondergrond. Zandsteen reservoirs zijn geel, carbonaat reservoirs zijn blauw. Afsluitende lagen zijn grijs. De lengte van de balken geven de kwaliteit van het gesteente aan (Mijnlieff et al. in ten Veen et al., 2025). Ma = miljoen jaar geleden. ..... 22
Figuur 5-1: Stappen die gezet worden in dit onderzoek om tot een geothermische vermogenskaart te komen. Daarbij wordt gewerkt met data uit seismische interpretatie en putdata. ..... 26
Figuur 5-2: Overzicht van de belangrijke structurele elementen die voorkomen in het studiegebied. Structurele elementen op basis van Kombrink et al., 2012. ..... 27
Figuur 5-3: Onder Volpriehausen Laagpakket (RBMVL) vermogenskaart in het middel scenario. Ook in het hoge scenario is er nauwelijks vermogen. Rode lijnen = breuken. Grijze vlakken = Trias niet aanwezig, op basis van ThermogGIS. ..... 29
Figuur 5-4: Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF) vermogenskaart. Ook in het hoge scenario (gepresenteerd in de appendix) is er nauwelijks vermogen. Rode lijnen = breuken. Grijze vlakken = Trias niet aanwezig, op basis van ThermogGIS. ..... 29
Figuur 5-5: Transmissiviteitkaart (= reservoirdikte * permeabiliteit) voor het Slochteren in het middel scenario. Rode lijnen geven breuken weer; grijze vlakken markeren gebieden waar de Formatie van Slochteren ontbreekt (op basis van seismische lijnen). ..... 30

Figuur 5-6: De Formatie van Slochteren (ROSL) vermogenskaart in een variant van het middel scenario, waar put WHY-01 niet is meegenomen in de berekening van de bruto-reservoirdikte. Rode lijnen geven breuken weer; grijze vlakken markeren gebieden waar de Formatie van Slochteren reservoir ontbreekt (op basis van seismische lijnen). ..... 31
Figuur 5-7: Geothermische brijn scenario voor de Formatie van Slochteren (ROSL), opgesteld op basis van de AMS-01, BLT-01 en EDE-01 productietests. Rode lijnen geven breuken weer; grijze vlakken markeren gebieden waar de Formatie van Slochteren reservoir ontbreekt (op basis van seismische lijnen). ..... 31
Figuur 5-8: Vermogenskaart Formatie van Slochteren (ROSL) voor de provincie Gelderland, bij een injectietemperatuur van 15 °C, waar enkel vermogens >5 MW zichtbaar zijn. ..... 32
Figuur 5-9: De kaart toont een deel van de provincie Gelderland met vijf geïdentificeerde prospecten op basis van het Formatie van Slochteren vermogen groter dan 5 MW. Breuken zijn weergegeven als rode lijnen, de provinciegrens als een zwarte lijn en gebieden waar de Formatie van Slochteren door erosie afwezig is als grijze vlakken. Het geel-gearceerde gebied vormt geen prospect, hier is de ondergrondse onzekerheid te groot. ..... 33
Figuur 5-10: Verdeling van geothermische vermogens dat mogelijk is in prospect 1. ..... 34
Figuur 5-11: Verdeling van geothermische vermogens dat mogelijk is in prospect 2. ..... 35
Figuur 5-12: Kaart met mogelijke doubletlocaties, weergegeven als zwart omlijnde vlakken van 3000 × 1500 m op de vermogenskaart. Alleen gebieden met een vermogen groter dan 5 MW in het middel scenario zijn weergegeven. ..... 36
Figuur 6-1: Mogelijkheden voor warmte-opslag in de provincie Gelderland (op basis van Dinkelman et al., 2020), zie Tabel 6-1 voor criteria. De geothermie prospecten zijn aangegeven als zwarte gestippelde lijnen. De blauw omlijnde gebieden duiden kansrijke gebieden aan voor lage temperatuur geothermie, waar >0.5 MW mogelijk is (op basis van ThermoGIS, 2026). ..... 38
Figuur 7-1: Risico-versus-zekerheid-matrix die risico en zekerheid combineert in één classificatie. Risico neemt toe van rechts naar links; zekerheid neemt toe van onder naar boven. Kleuren tonen zowel het risiconiveau (laag, gemiddeld, hoog) als het bijbehorende zekerheidsniveau (laag, gemiddeld, hoog). ..... 42
Figuur 7-2: Totale risicokaart voor het Formatie van Slochteren-reservoir, gebaseerd op een combinatie van risico en onzekerheid. Kleuren geven het algemene ondergrondse risico weer (groen: laag, geel: matig, rood: hoog). Tinten geven de zekerheid aan. Zwarte veelhoeken markeren de geïdentificeerde prospecten. ..... 42
Figuur 7-3: Totale risicokaart voor het Onder Volpriehausen reservoir (Onder-Germaans Trias Groep), gebaseerd op een combinatie van risico en onzekerheid. Kleuren geven het algemene ondergrondse risico weer (groen: laag, geel: matig, rood: hoog). Tinten geven de zekerheid aan. ..... 43
Figuur 7-4: Deze kaart toont de voorgestelde locaties van 2D-seismische lijnen (paars) in de provincies Utrecht en Gelderland, met als doel de ondergrond verder te de-risken. De tabel in de rechterbovenhoek geeft elk van de 16 seismische lijnen weer met de bijbehorende lengte. ..... 44
Figuur 7-5: Kaart met de voorgestelde locaties van de 2D-seismische lijnen (paars) in de provincie Utrecht en hun relatie tot de geselecteerde prospectieve gebieden (blauw). De tabel in de rechterbovenhoek geeft een overzicht van de 6 seismische lijnen die geheel of gedeeltelijk binnen de provinciegrenzen liggen. ..... 44
Figuur 7-6: Voorgestelde locatie exploratieput 1 in de provincie Gelderland, om geothermie vanuit het oogpunt van de ondergrond verder te de-risken. Daarbij is de locatie, verwachte eigenschappen van de ondergrond en schematisch een boortraject weergegeven. Doelreservoir: Formatie van Slochteren van de Rotliegend Groep. ..... 46
Figuur 7-7: Voorgestelde locatie exploratieput 2 in de provincie Gelderland. Doelreservoir: Formatie van Slochteren van de Rotliegend Groep. ..... 46
Figuur 7-8: De vijf stappen die een aardwarmteproject doorloopt, inclusief de verschillende activiteiten die ondernomen worden per stap (geothermie.nl, ECW.nl). ..... 48
Figuur 3-1: Kaart met provinciegrenzen, de Regio Foodvalley, structurele elementen en de onderzochte putten. De put-symbolen geven de aanwezigheid aan van de primaire reservoirs die zijn geanalyseerd voor de vermogenskaarten: reservoirs binnen de Boven- en Onder Germaanse Trias Groepen en de Formatie van Slochteren. ..... 18
Figuur 3-2: Voorbeeld van Pickett-plot voor de Formatie van Slochteren in SCAN-putten BLT-01, EDE-01 en AMS-01, met een schatting van de in situ-weerstanden van formatiewater omgerekend naar standaardtemperatuur (25 °C). ..... 21
Figuur 3-3: Vergelijking van de temperatuur-diepte trend op basis van NLOG-bodemtemperaturen (Gelderland en Utrecht) en SCAN-putgegevens. Een gradiënt van 31 °C/km is weergegeven, met BHT-metingen in het blauw en SCAN-data in het rood. De onzekerheid van

de BHT-metingen in het blauw en SCAN-data in het rood. De onzekerheid van de BHT-metingen is 10 tot 15 °C (grijze foutbalken). De SCAN-gegevens tonen hogere temperaturen dan de nationale trend. ....22
Figuur 3-4: Illustratie van de stresscorrectiemethode die wordt gebruikt om gemeten ambient porositeiten te corrigeren naar in-situ stressomstandigheden (naar Hakvoort & Schutjens). Stressregime per structurele eenheid aan de linkerkant, schatting van de stressverhouding en regressie versus TVDss, wat resulteert in een correctiefactor voor gemeten porositeit. ....25
Figuur 3-5: Kruisdiagrammen die (a) gemeten spanning versus ambientporositeit in boorput AMS-01 weergeven met regressieaanpassingscorrectiefactor en (b) spanningsgecorrigeerde versus omgevingsporositeit in boorputten AMS-01, BLT-01 en EDE-01 weergeven met behulp van de Hakvoort-methodologie in combinatie met gemeten gegevens uit AMS-01. Regressieaanpassing levert een correctiefactor van 0,95 op. ....25
Figuur 3-6: Overburden gecorrigeerde kern gaspermeabiliteit (KHC) vergeleken met overburden gecorrigeerde boorkernporositeit (PHIC) in ROSL voor drie SCAN-putten: AMS-01 (blauw kruis), BLT-01 (groen kruis) en EDE-01 (rode x). Ook weergegeven zijn de gemeten permeabiliteit voor gas onder spanning (magenta stip) en voor brijn onder spanning (blauwe stip) versus porositeit onder spanning van put AMS-01. Over de gegevens heen (zwarte lijn) is de poro-perm regressiefunctie (alle boorkernputten) weergegeven die is afgeleid voor de ROSL. ....26
Figuur 3-7: Voor overburden gecorrigeerde kern gas permeabiliteit (KHC) tegenover overburden gecorrigeerde boorkernporositeit (PHIC) in ROSL voor drie SCAN-putten: AMS-01 (blauw kruis), BLT-01 (groen kruis) & EDE-01 (rode x). Daarnaast worden de gemeten permeabiliteit voor gas onder spanning (magenta stip) en voor brijn onder spanning (blauwe stip) weergegeven ten opzichte van de porositeit onder spanning van put AMS-01. Over de gegevens heen (zwarte lijn) is de poro-perm regressiefunctie (alle boorkernputten) weergegeven die voor de ROSL is afgeleid. ....27
Figuur 3-8: Kruisdiagram van gecorrigeerde boorkernporositeit versus lucht gemeten permeabiliteit met een regressieaanpassing (y=f(x)) voor de EDE-01-put in het Rijnland (KNNS). ....28
Figuur 3-9: Kruisdiagram van permeabiliteit versus boorkernporositeit voor gegevens in de Nieuwerkerk-formatie en afgeleide poro-perm-relatie (Willems et al., 2020). ....29
Figuur 3-10: Kruisdiagram van permeabiliteit versus boorkernporositeit voor gegevens in de RNROF met afgeleide poro-perm regressietrend (paarse trendlijn). Gegevenspunten gekleurd per put. ....30
Figuur 3-11: Kruisdiagram met gecorrigeerde gegevens over kernporositeit/permeabiliteit en de regressietrendlijn die is aangepast aan de gegevens voor het Onder-Trias, RBM (inclusief sub-eenheden). Afwijkende waarden, zoals zeer lage permeabiliteiten (<0.02 mD) zijn buiten beschouwing gelaten. ....31
Figuur 3-12: Kruisdiagram van gecorrigeerde boorkernporositeit/permeabiliteitsgegevens voor de ROSL met de regressietrendlijn die aan de gegevens is aangepast. De SCAN-putten worden aangegeven met driehoeken (rood = EDE-01, blauw = BLT-01 en magenta = AMS-01), de overige putten met kruisjes. De gegevenspunten zijn gekleurd per put. ....32
Figuur 3-13: Illustratie van de methodiek om de permeabiliteit voor in situ brijn te verkrijgen uit SCAN-putgegevens. (a) corrigeren van de porositeit van de boorkern naar de porositeit onder spanning (SCAN-putten), (b) omzetten van de permeabiliteit voor lucht naar de permeabiliteit voor brijn onder spanning (SCAN-putten), (c) regressieaanpassing van de permeabiliteit voor brijn onder spanning met gegevens over de porositeit onder spanning (alle putten met boorkernboringen) om de poro-perm-transformatie te verkrijgen. ....33
Figuur 3-14: Grafiek van de stressgecorrigeerde brijnpermeabiliteit, geschat op basis van SCAN-putcorrelatie, versus stressgecorrigeerde kernporositeit voor de ROSL. De weergegeven punten zijn per put gekleurd. Ook zijn de regressieaanpassing aan deze gegevens (blauwe curve) en de in-situ luchtpermeabiliteitstrend (rode lijn) weergegeven. De zwarte stippellijn is de luchtpermeabiliteitstrend die is verschoven om overeen te komen met de brijntrend, ter illustratie van de schaalbaarheid. ....34
Figuur 3-15: De grafiek toont de gemiddelde akoestische P-golfinterval snelheden uitgezet tegen gemiddelde reservoirdiepte (TVD). De oranje trendlijn is een regressie door de datapunten van de putten, verschoven om door de putten met nul-opheffing te lopen. De zwarte pijl geeft de richting en omvang van de opheffingscorrectie naar de gemiddelde diepte van het reservoir aan. Ook weergegeven als een grijze stippellijn is een regionale nulbegravingslijn van TNO. ....36
Figuur 3-16: Grafiek die de porositeit-diepte trend voor Formatie van Slochteren (ROSL) weergeeft, gebruikmakend van de voor opheffing gecorrigeerde gemiddelde reservoirdieptes. ....36
Figuur 3-17: Grafiek die de porositeit-diepte trend weergeeft voor de reservoirs van de de Onder- en Boven Germaans Trias Groepen, gebruikmakend van voor opheffing gecorrigeerde gemiddelde reservoirdieptes. ....37

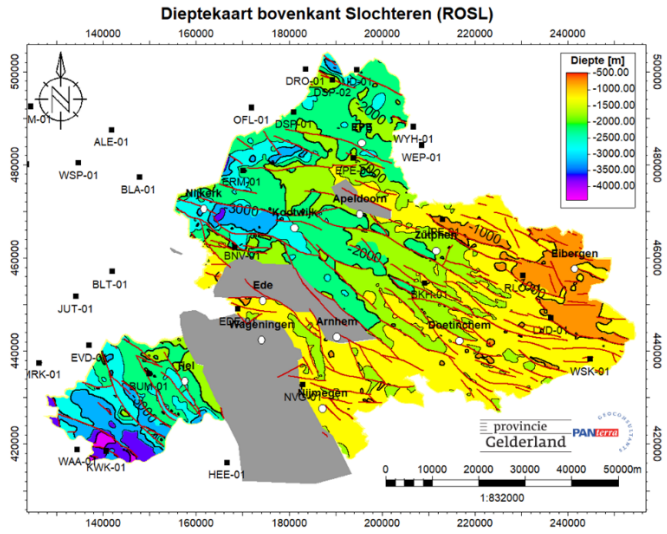
Figuur 3-18: In het model toegepaste correctiekaart voor opheffing. Zwarte contouren geven de provinciegrenzen weer. Magenta contour: Centraal Nederland Bekken; Rode contour: Peel-Maasbommel Complex; Blauwe contour: West Nederland Bekken. ....38
Figuur 3-19: Formatie van Slochteren porositeit-diepte trends met behulp van de lokale begravingslijn gegenereerd in deze studie (rood) en de nationale (Dalftsen et al 2006) begravingslijn (blauw). ....39
Figuur 3-20: Verschil van de Formatie van Slochteren-vermogenskaarten voor het gemiddelde scenario op basis van de twee afzonderlijke porositeit-diepte trends. De kaart laat zien dat de methode van Dalftsen et al. (2006) het verwachte vermogensresultaat aanzienlijk vermindert, met maximaal ~14 MW....41
Figuur 3-21: Permeabiliteit-hoogte (KH) analyses uit boorputtests voor de Bunter- en Rotliegend-zandstenen in boorput BLT-01. Ter vergelijking wordt de gemiddelde permeabiliteit van de laag uit gekalibreerde boorkern weergegeven (met dank aan EBN (Ganguly, et al., 2025)).....42
Figuur 3-22: Logplot van ROSL-interval (Formatie van Slochteren) in EDE-01 met open boorgatlogs track 4-8, geëvalueerde lithologietrack 9, porositeitstrack 10, PLT-injectieprofiel tijdens puttest track 11 en permeabiliteitstrack 12. Injectiepercentage per interval weergegeven in track 11....43
Figuur 3-23: Logplot van ROSL-interval (Formatie van Slochteren) in BLT-01 waarbij het geteste interval (118 m) en geïnterpreteerde Kh links worden weergegeven, en rechterkant weergeeft PLT-injectieprofiel tijdens de test....44
Figuur 3-24: Logplot met evaluatieresultaten voor SCAN-put AMS-01 in het belangrijkste Formatie van Slochteren-interval. Tracks 1-3 tonen zones, gemeten diepte en TVDss, tracks 4-7 bewerkte logs, track 8 lithologie, track 9 log/boorkernporositeit, track 10 log/boorkernpermeabiliteit, track 11 korrel dichtheid van de boorkern en track 12 netto reservoirindicator. ....48
Figuur 3-25: Logplot met evaluatieresultaten voor SCAN-put BLT-01 Rijnland tot Rotliegend Groepen. Tracks 1-3 tonen zones, gemeten diepte en TVDss, tracks 4-7 bewerkte logs, track 8 lithologie, track 9 log/boorkernporositeit, track 10 log/ boorkernpermeabiliteit, track 11 korrel dichtheid van de boorkern en track 12 netto reservoirindicator. ....49
Figuur 3-26: Logplot met evaluatieresultaten voor SCAN-put EDE-01. Tracks 1-3 tonen zones, gemeten diepte en TVDss, tracks 4-7 bewerkte logs, track 8 lithologie, track 9 log/boorkernporositeit, track 10 log/ boorkernpermeabiliteit. ....50
Figuur 4-1: PanTerra werkwijze voor de ondergrondse eigenschappen, die worden gebruikt om de vermogenskaarten op te stellen. ....54
Figuur 4-2: Conceptuele weergave van geothermische energie voor de stedelijke omgeving, aangepast naar Schoof et al. (2018). Seizoensgebonden variaties in de warmtevraag binnen de stedelijke omgeving kunnen ertoe leiden dat de geothermische centrale op een lager vermogen moet draaien. ....55
Figuur 4-3: Scenario's vermogenskaart, waarbij aangegeven is welke ondergrondse eigenschappen worden gebruikt in de scenario's. ....56
Figuur 4-4: Porositeit-diepte trend voor de Hoofd Bontzandsteen Subgroep en Röt Randzandsteen reservoirs, met behulp van de lokale uniforme begravingslijn die in dit onderzoek is gegenereerd (zie het hoofdstuk 3.4 over petrofysica voor meer informatie). ....57
Figuur 4-5: Porositeit-diepte trend voor het Slochteren reservoir (Rotliegend), met behulp van de lokale uniforme begravingslijn die in dit onderzoek is gegenereerd (zie het hoofdstuk 3.4 over petrofysica voor meer informatie). ....58
Figuur 4-6: Formatie van Slochteren (ROSL) porositeit-permeabiliteitstrends uitgezet tegen kernmetingen gecorrigeerd met behulp van de methodologie van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) (DCAV). De permeabiliteitstrend voor brijn is uitgezet ter vergelijking – zie het hoofdstuk over petrofysica voor de onderliggende gegevens.....60
Figuur 4-7: Porositeit-permeabiliteitstrends van de Hoofd Bontzandsteen Subgroep (RBM) uitgezet tegen kernmetingen gecorrigeerd met behulp van de methode van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) (DCAV). ....60
Figuur 4-8: Röt Randzandsteen Laagpakket (RNROF) porositeit-permeabiliteit trends uitgezet tegen kernmetingen gecorrigeerd met behulp van de methode van Juhasz (1986) en Hakvoort (2006) (DCAV). ....61
Figuur 4-9: DoubletCalc1D simulatie voor het ZEZ1F Randcarbonaat, op basis van de reservoir-eigenschappen bij EDE-01....70
Figuur 5-1: Peize en Waalre warmte-opslag....72
Figuur 5-2: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het PZWA2 zand (Zand 2), Dinkelman et al., 2020. ....73
Figuur 5-3: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het PZWA3 zand (Zand 3), Dinkelman et al., 2020. ....73
Figuur 5-4: Maassluis Formatie warmte-opslag ....74
Figuur 5-5: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het MSz2 zand (Zand 2), Dinkelman et al., 2020. ....75
Figuur 5-6: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het MSz3 zand (Zand 3), Dinkelman et al., 2020. ....75
Figuur 5-7: Oosterhout Formatie warmte-opslag (Dinkelman et al. 2020). ....76
Figuur 5-8: Ondergrondse eigenschappen voor warmte-opslag in het OOz2 zand (Zand 2), Dinkelman et al., 2020. ....76

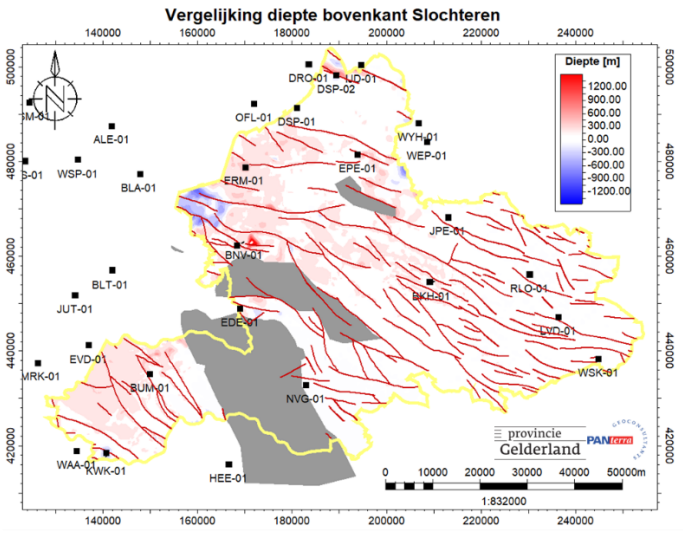
Figuur 6-1: Sedimentaire facieskaart voor het Zechstein 1 carbonaat (Bouroullec & Geel in ten Veen et al., 2025). ..... 79
Figuur 6-2: Facieskaart van Z1 carbonaten, met het randcarbonaat in donkerblauw, ten opzichte van de EDE-01 put en het Maasbommel Hoog (oranje) op basis van (Bouroullec & Geel in ten Veen et al., 2025). ..... 80
Figuur 6-3. Afzettingsmilieu van het Boven-Slochteren Laagpakket (Rotliegend) (ten Veen et al., 2025). ..... 81
Figuur 6-4: Geologische kaart op basis van de stratpiler-analyse. De kaart geeft de mate van inversie weer die plaatsvond in het late Krijt – Paleogeen (Kombrink et al., 2006). ..... 82
Figuur 6-5: Schematische weergave van de structurele relaties in het Trias, met de geërodeerde structurele hogen en de blootstelling van het Rotliegend aan meteorisch water (Ziegler, 2006). ..... 83

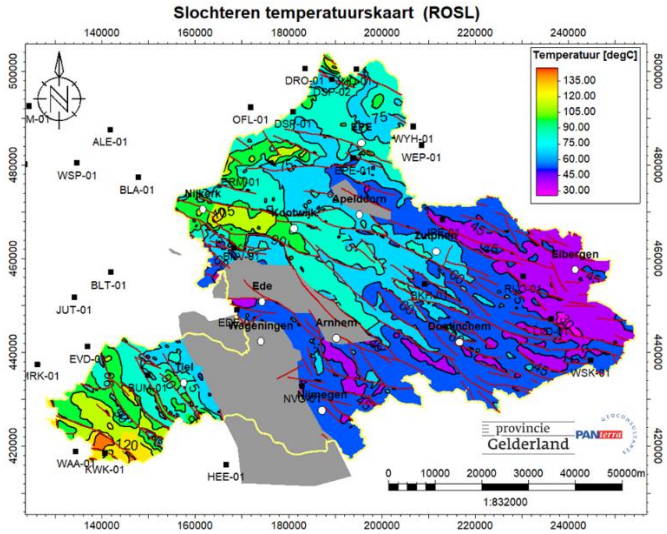
# Lijst van tabellen

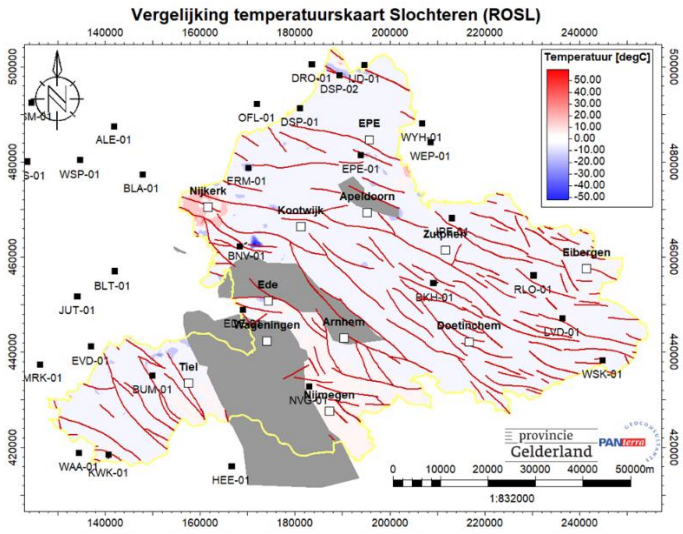
Tabel 0-1: Samenvatting van stratigrafische groepen in de Nederlandse ondergrond en de acties die in dit onderzoek per groep zijn uitgevoerd, inclusief onderbouwing en conclusie. Groene vakken geven aan dat een actie is uitgevoerd in dit rapport; grijze vakken geven aan dat geen actie is uitgevoerd of dat deze niet van toepassing is. ..... 4
Tabel 0-2: Samenvatting van enkele belangrijke ondergrondse eigenschappen per prospect. ..... 7
Tabel 4-1: Samenvatting stratigrafische groepen (geologische eenheden) die voorkomen in de Nederlandse ondergrond, met de acties die worden genomen in dit onderzoek per groep, waar dat op is gebaseerd en de bijbehorende conclusie. Groen vlak = er wordt in dit rapport een actie ondernomen. Grijs vlak = geen, n.v.t. of geen actie. ..... 25
Tabel 5-1: Samenvatting van enkele belangrijke ondergrondse eigenschappen per prospect. ..... 33
Tabel 6-1: Criteria voor de gunstigheid van de ondergrond voor warmte-opslag, uit Dinkelman et al., 2020. ..... 38
Tabel 3-1: Putten met boorkernmonsters die de stratigrafische dekking in elke put weergeven ..... 24
Tabel 3-2: Gemiddelde petrofysische eigenschappen (Phi, Sw, Vclay & permeabiliteit) per hoofdreservoirlaag op basis van individuele gemiddelden per laag van afzonderlijke putten, met een drempelwaarde van Vshale <50% cut-off ..... 45
Tabel 3-3: Petrofysische gemiddelden per put in het beoogde reservoir RNROF met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, water saturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit. ..... 45
Tabel 3-4: Petrofysische gemiddelden per put in het doelreservoir RBMD met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, watersaturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit. ..... 45
Tabel 3-5: Petrofysische gemiddelden per laag in beoogde reservoirs RBMV met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, watersaturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit. ..... 46
Tabel 3-6: Petrofysische gemiddelden per laag in beoogde reservoirs ROSL met een Vshale-grenswaarde <= 50%. Er worden rekenkundige gemiddelden per laag gegeven voor porositeit, Vclay, watersaturatie, akoestische transittijd en permeabiliteit. $$ geeft aan dat er een incompleet data-interval is. ..... 47
Tabel 4-1: Uitleg scenario's voor de vermogenskaarten. ..... 56
Tabel 5-1: Classificatie warmte-opslag van Dinkelman et al. (2020) ..... 71

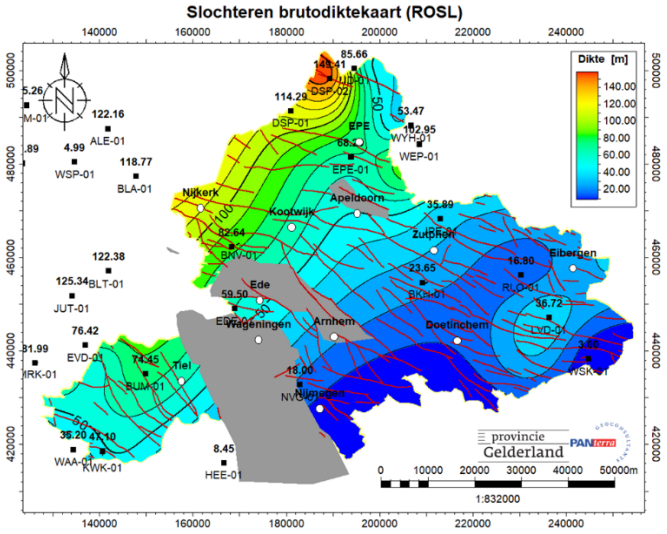
## Formatie van Slochteren (ROSL) kaarten ter ondersteuning van de vermogenskaarten

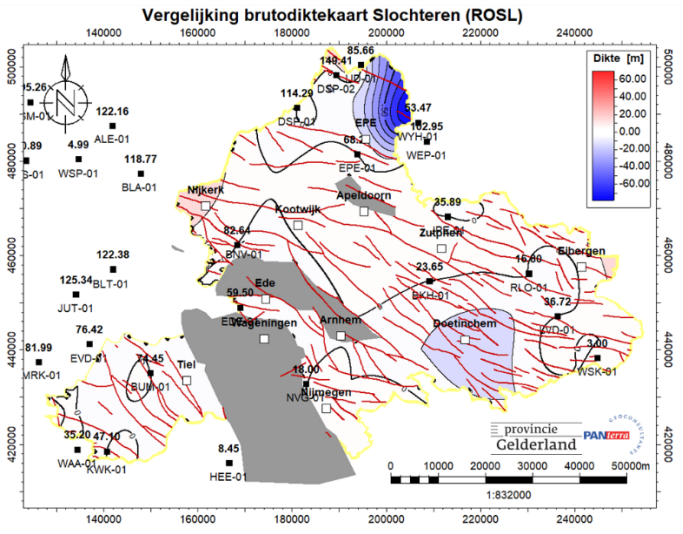


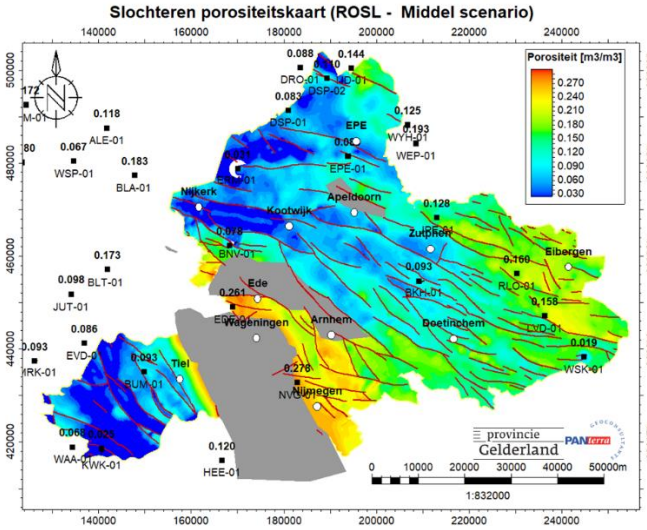



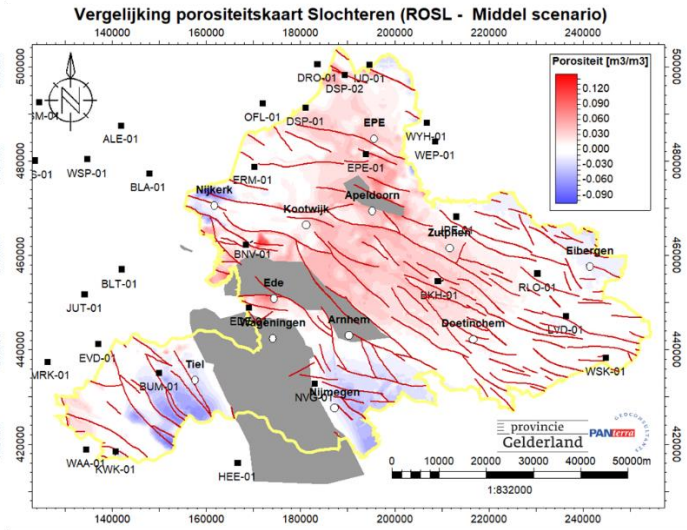



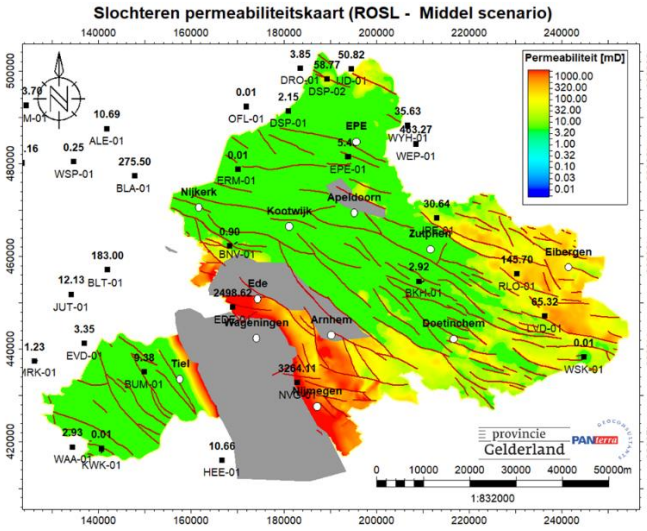



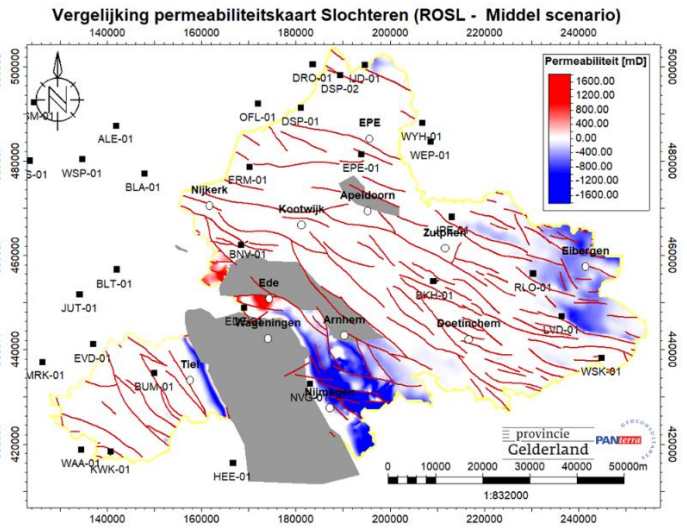



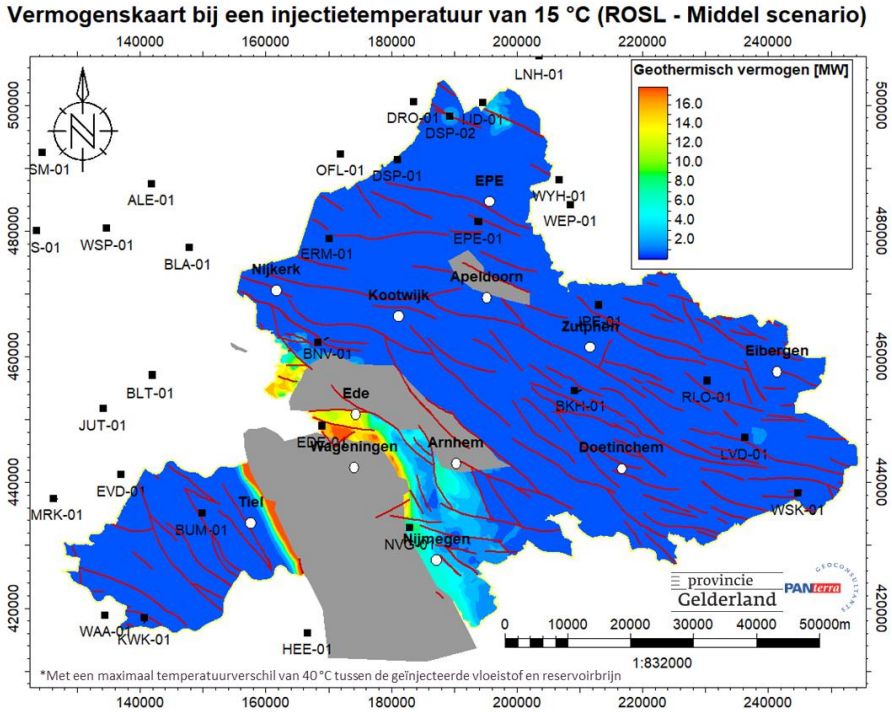




Slochteren porositeitskaart (ROSL - Middel scenario)
Porositeit [m3/m3]
0.270
0.240
0.210
0.180
0.150
0.120
0.090
0.060
0.030
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000

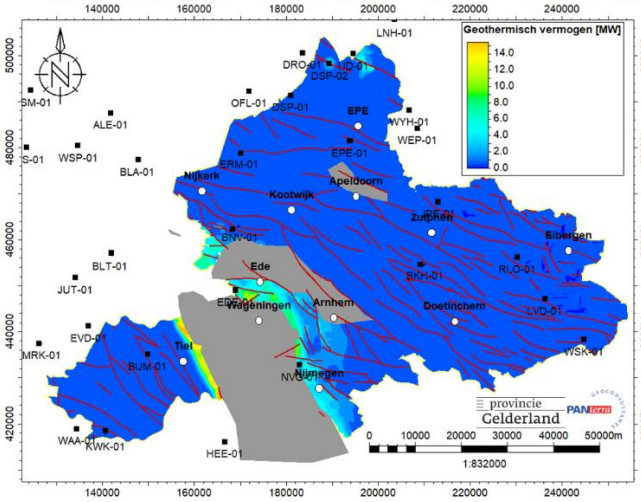

Vergelijking porositeitskaart Slochteren (ROSL - Middel scenario)
Porositeit [m3/m3]
0.120
0.090
0.060
0.030
0.000
-0.030
-0.060
-0.090
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000


Slochteren permeabiliteitskaart (ROSL - Middel scenario)
Permeabiliteit [mD]
1000.00
320.00
100.00
32.00
10.00
3.20
1.00
0.32
0.10
0.03
0.01
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000

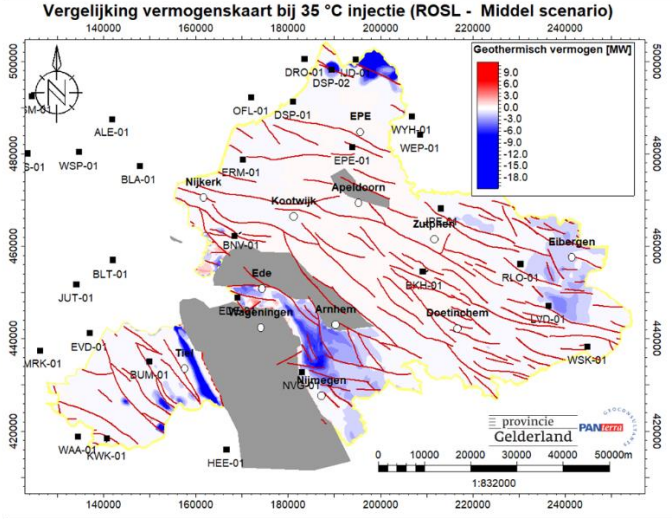

Vergelijking permeabiliteitskaart Slochteren (ROSL - Middel scenario)
Permeabiliteit [mD]
1600.00
1200.00
800.00
400.00
0.00
-400.00
-800.00
-1200.00
-1600.00
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000


Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (ROSL - Middel scenario)
Geothermisch vermogen [MW]
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000
*Met een maximaal temperatuurverschil van 40 °C tussen de geïnjecteerde vloeistof en reservoirbrijn

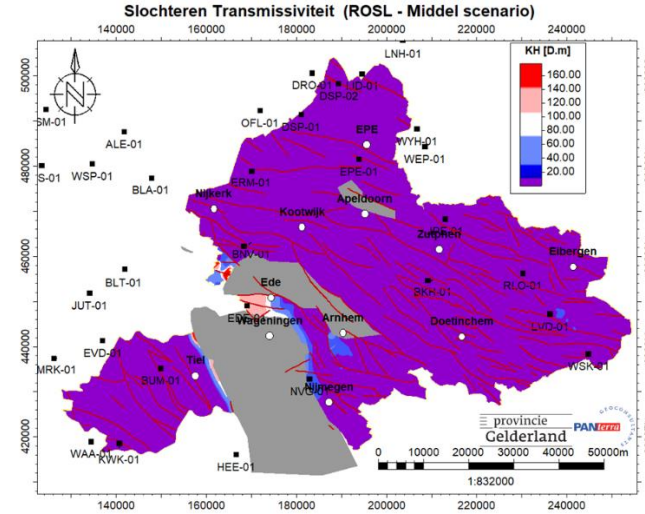
Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 35 °C (ROSL - Middel scenario)



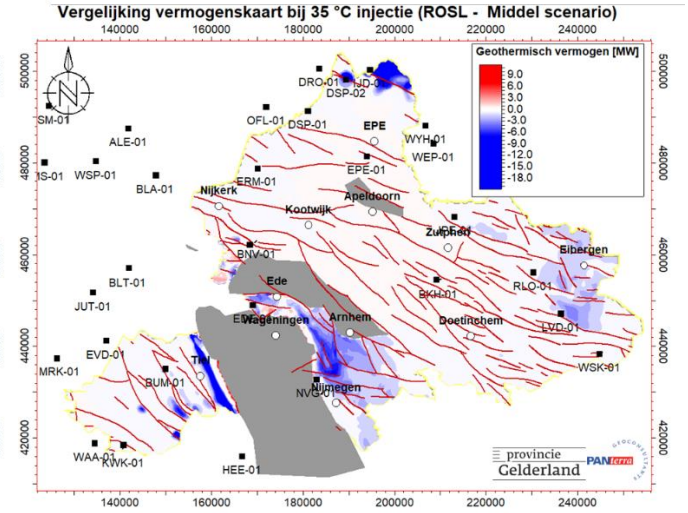

Vergelijking vermogenskaart bij 35 °C injectie (ROSL - Middel scenario)



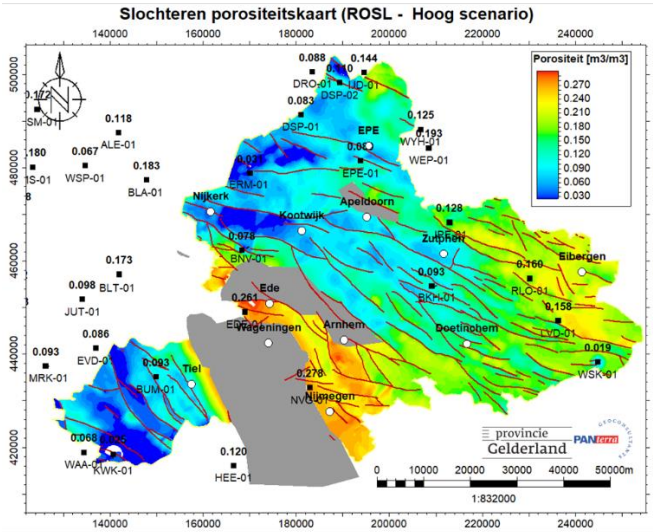

Slochteren Transmissiviteit (ROSL - Middel scenario)



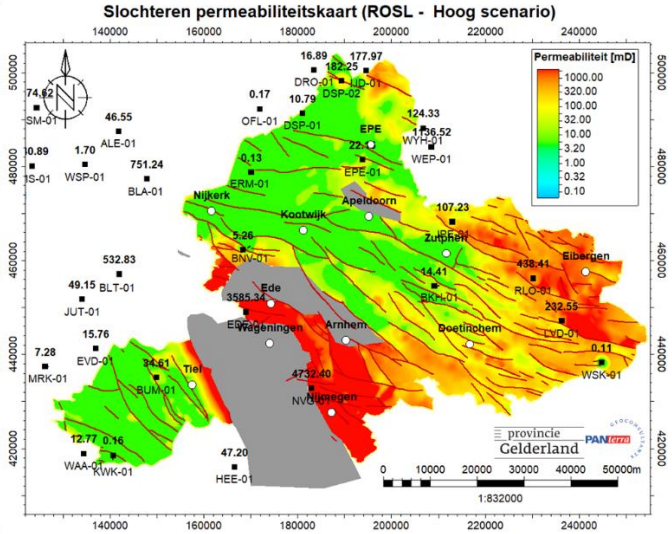

Vergelijking vermogenskaart bij 35 °C injectie (ROSL - Middel scenario)



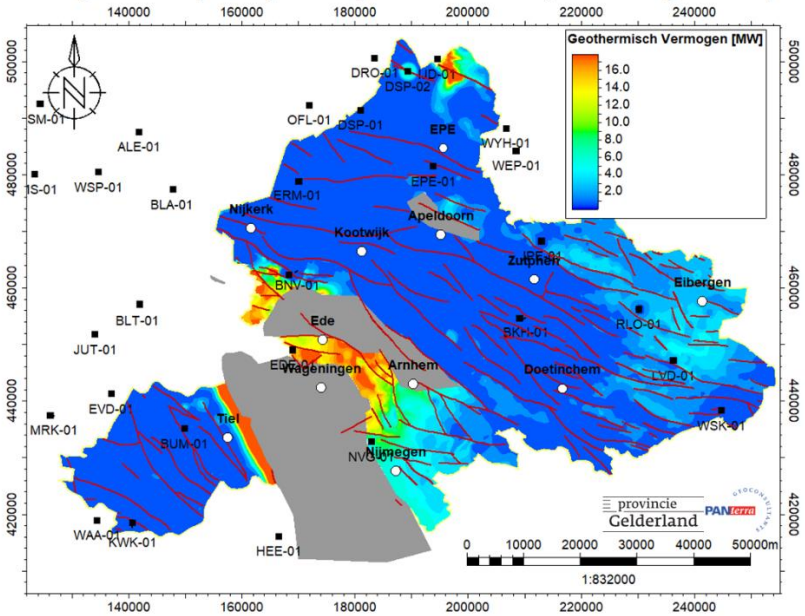

Slochteren porositeitskaart (ROSL - Hoog scenario)



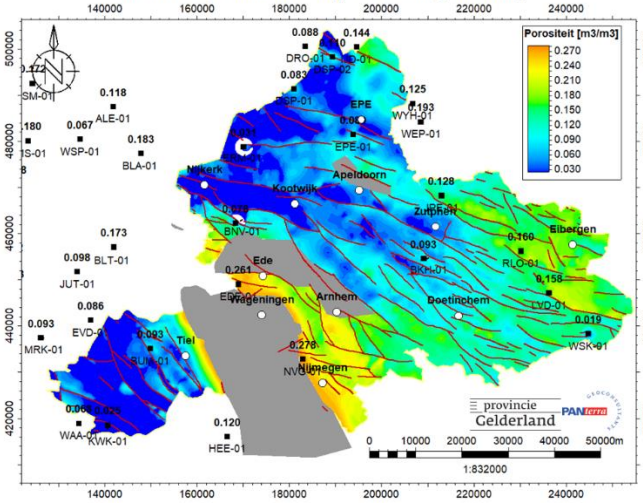

Slochteren permeabiliteitskaart (ROSL - Hoog scenario)



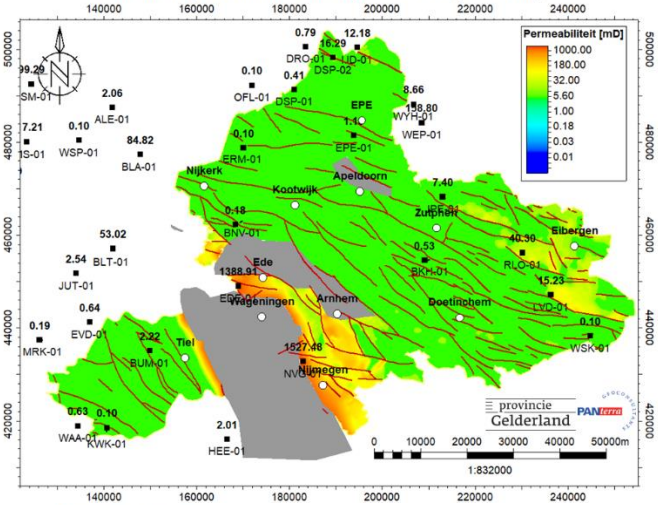
**Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (ROSL - Hoog scenario)**



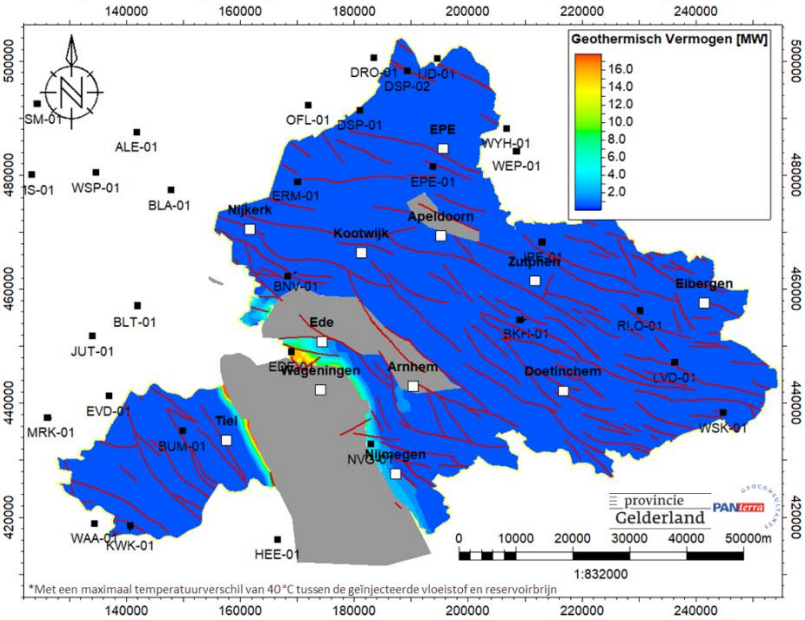

**Slochteren porositeitskaart (ROSL - Laag scenario)**



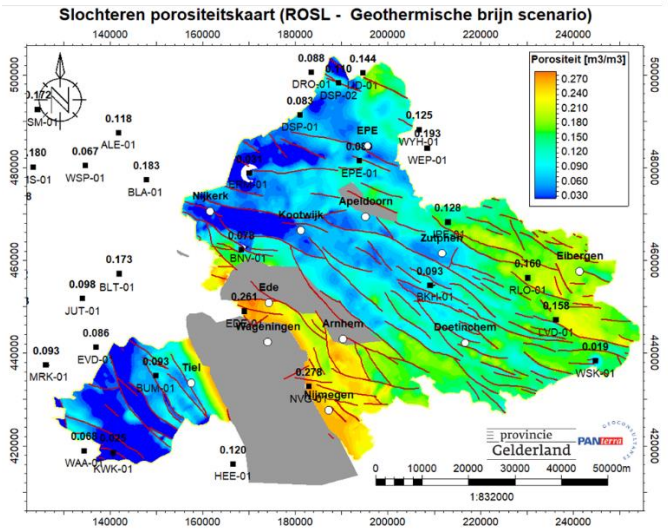

**Slochteren permeabiliteitskaart (ROSL - Laag scenario)**

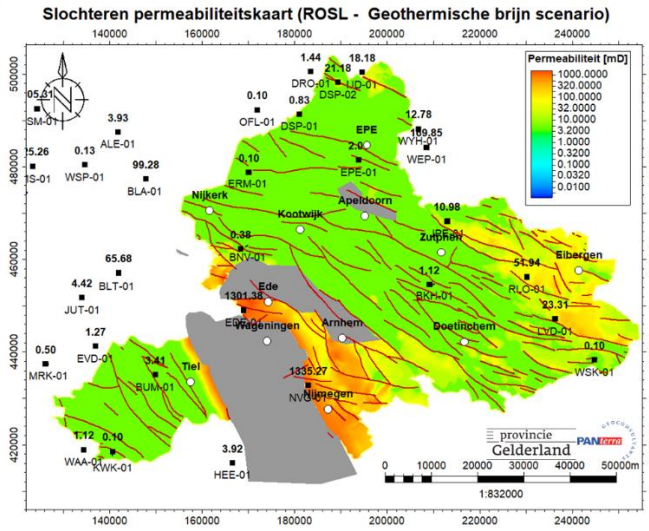


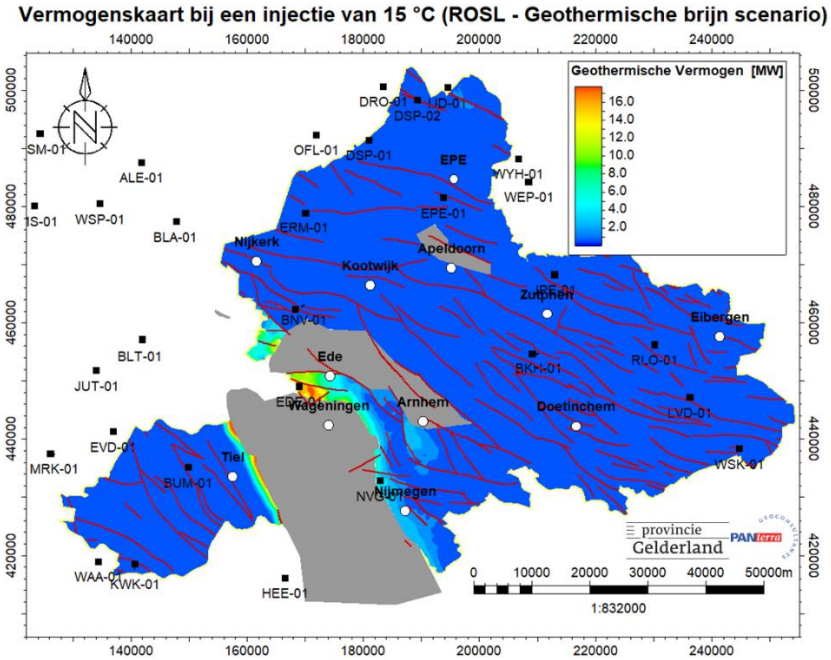

**Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (ROSL - Laag scenario)**

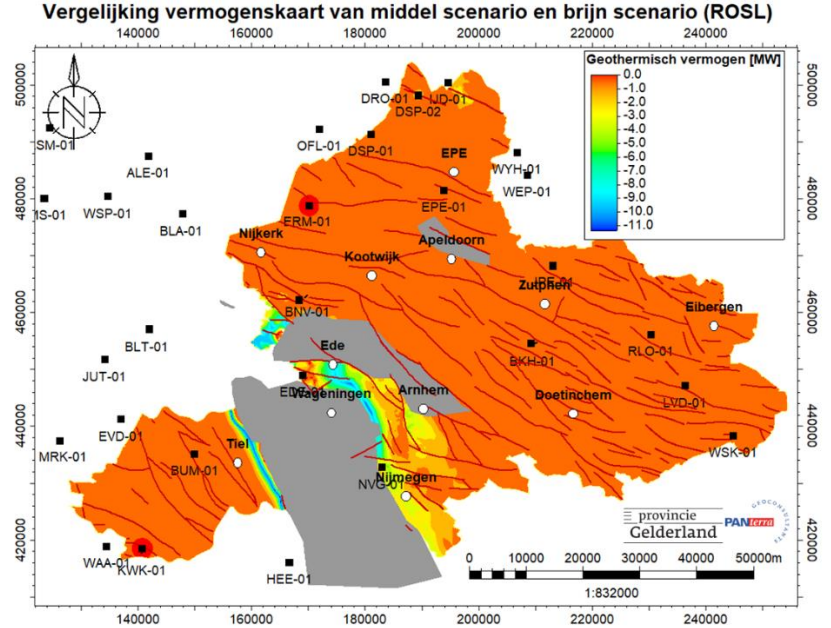


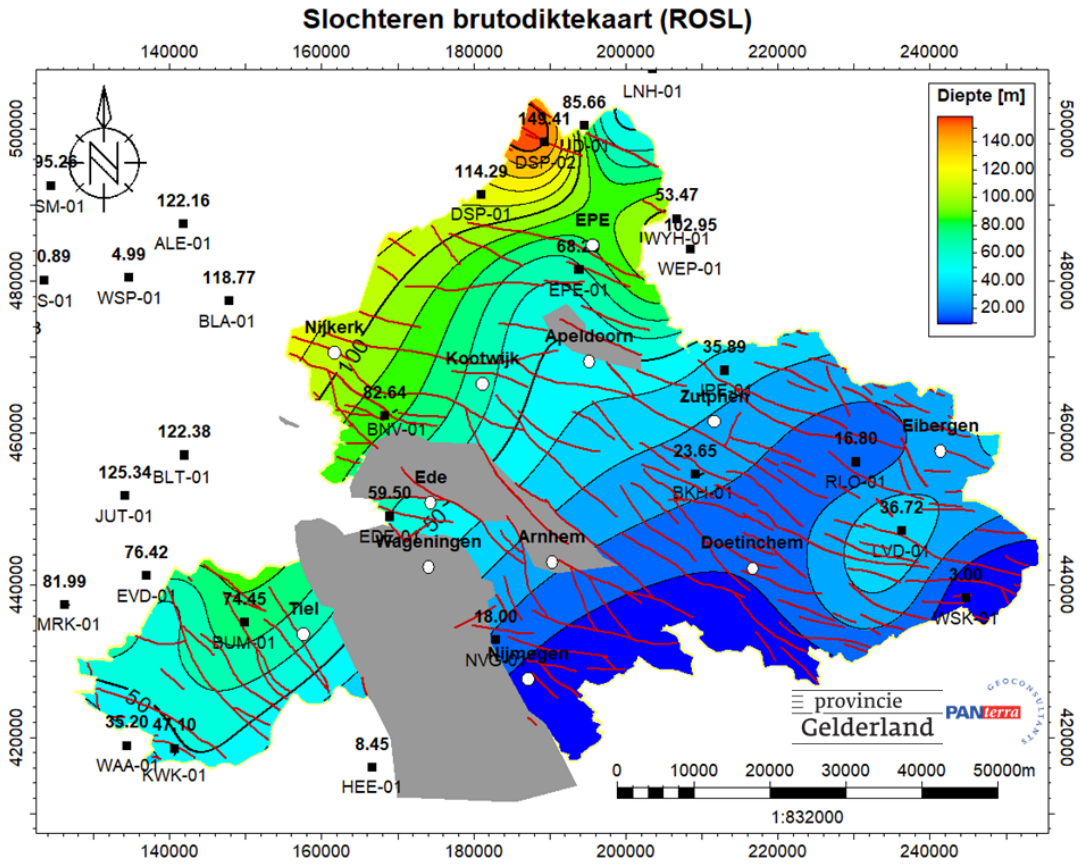

*Met een maximaal temperatuurverschil van 40 °C tussen de geïnjecteerde vloeistof en reservoirbrijn

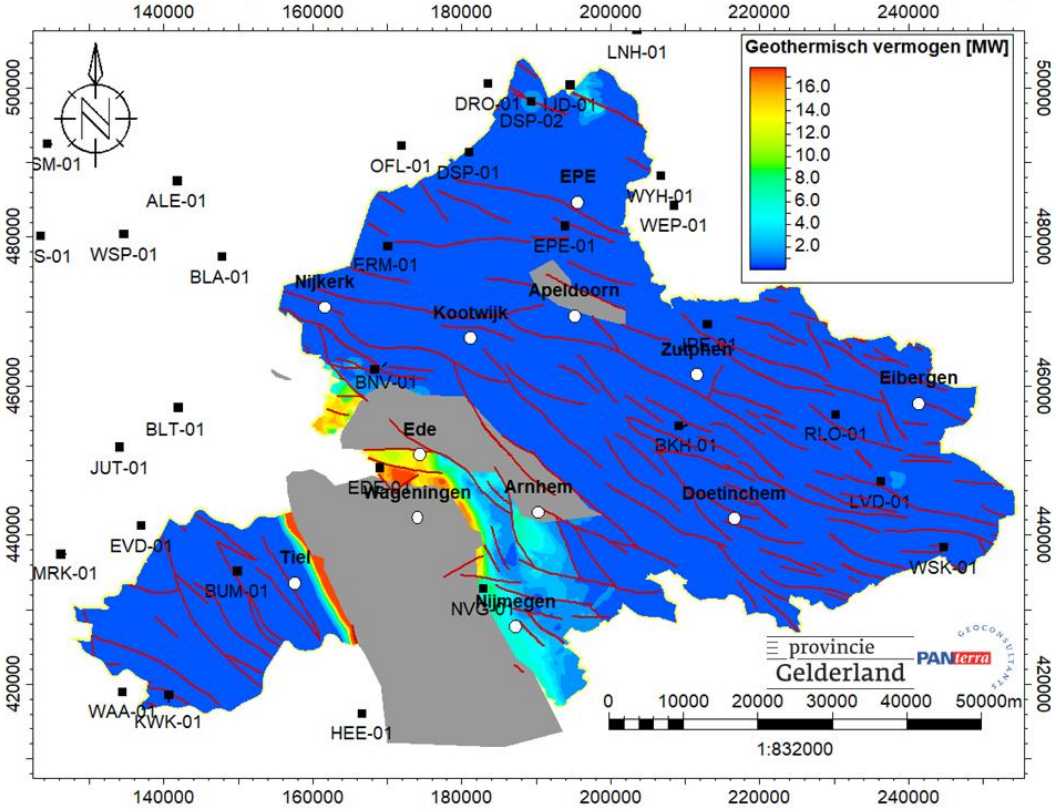

Slochteren porositeitskaart (ROSL - Geothermische brijn scenario)
Porositeit [m3/m3]
0.270
0.240
0.210
0.180
0.150
0.120
0.090
0.060
0.030
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000


Slochteren permeabiliteitskaart (ROSL - Geothermische brijn scenario)
Permeabiliteit [mD]
1000.0000
320.0000
100.0000
32.0000
10.0000
3.2000
1.0000
0.3200
0.1000
0.0320
0.0100
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000


Vermogenskaart bij een injectie van 15 °C (ROSL - Geothermische brijn scenario)
Geothermische Vermogen [MW]
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000

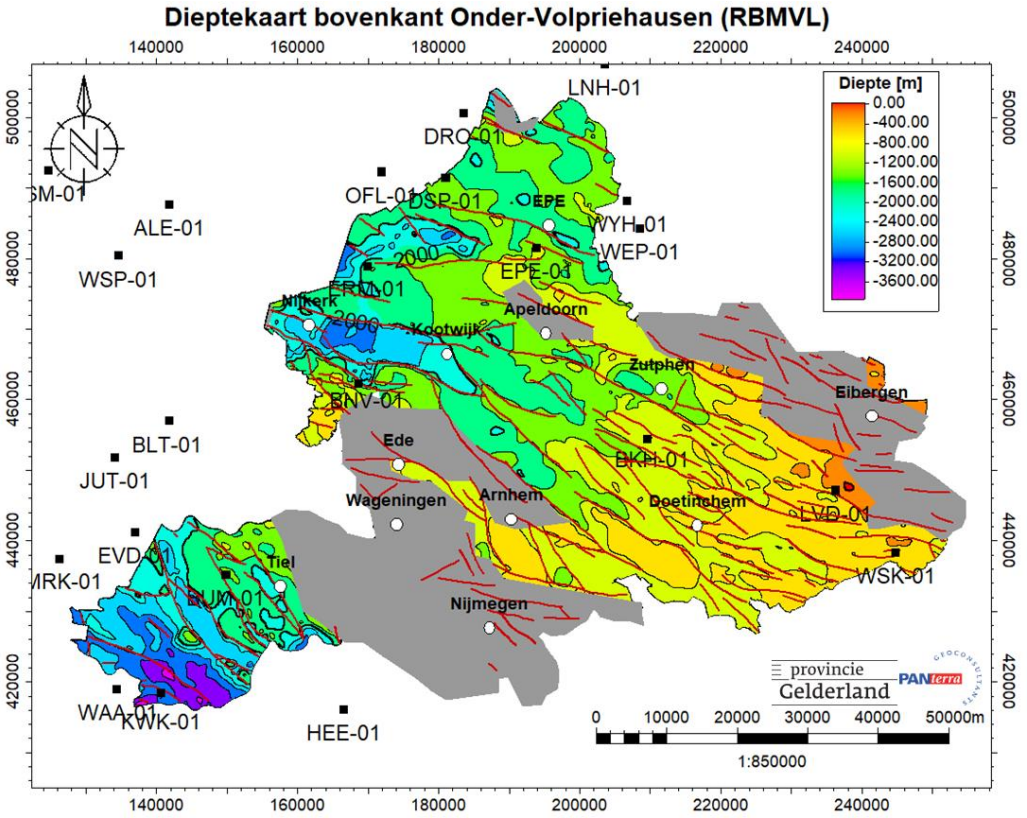

Vergelijking vermogenskaart van middel scenario en brijn scenario (ROSL)
Geothermisch vermogen [MW]
0.0
-1.0
-2.0
-3.0
-4.0
-5.0
-6.0
-7.0
-8.0
-9.0
-10.0
-11.0
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000

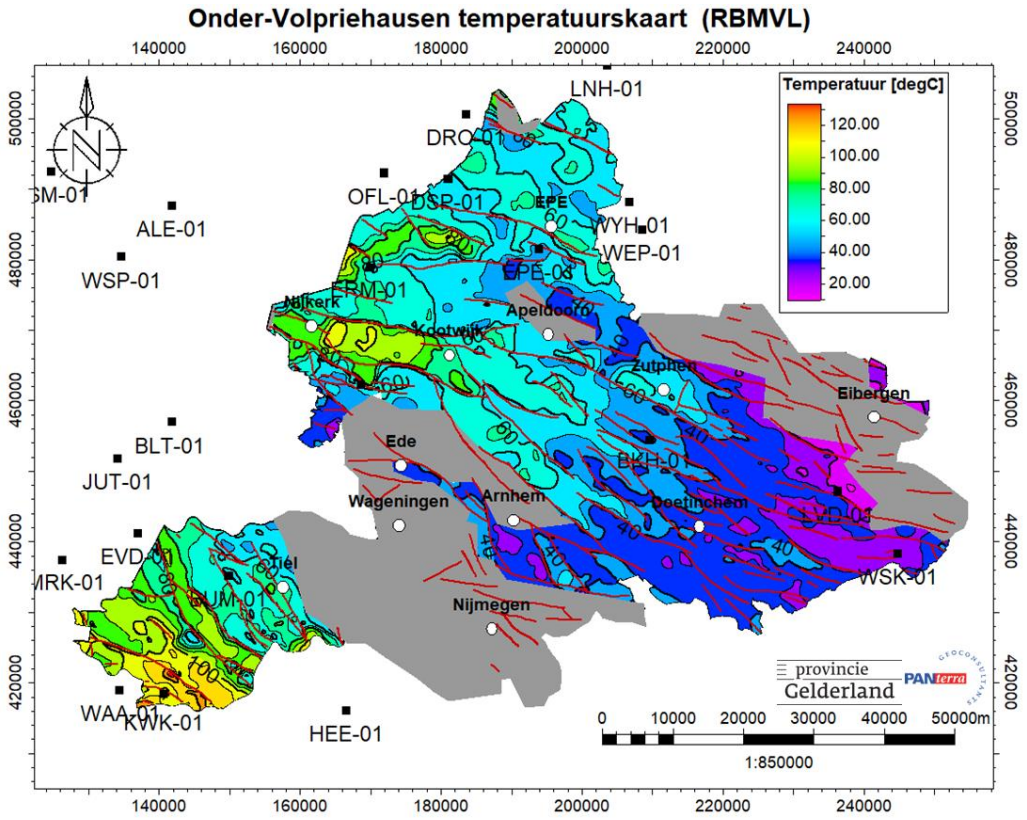


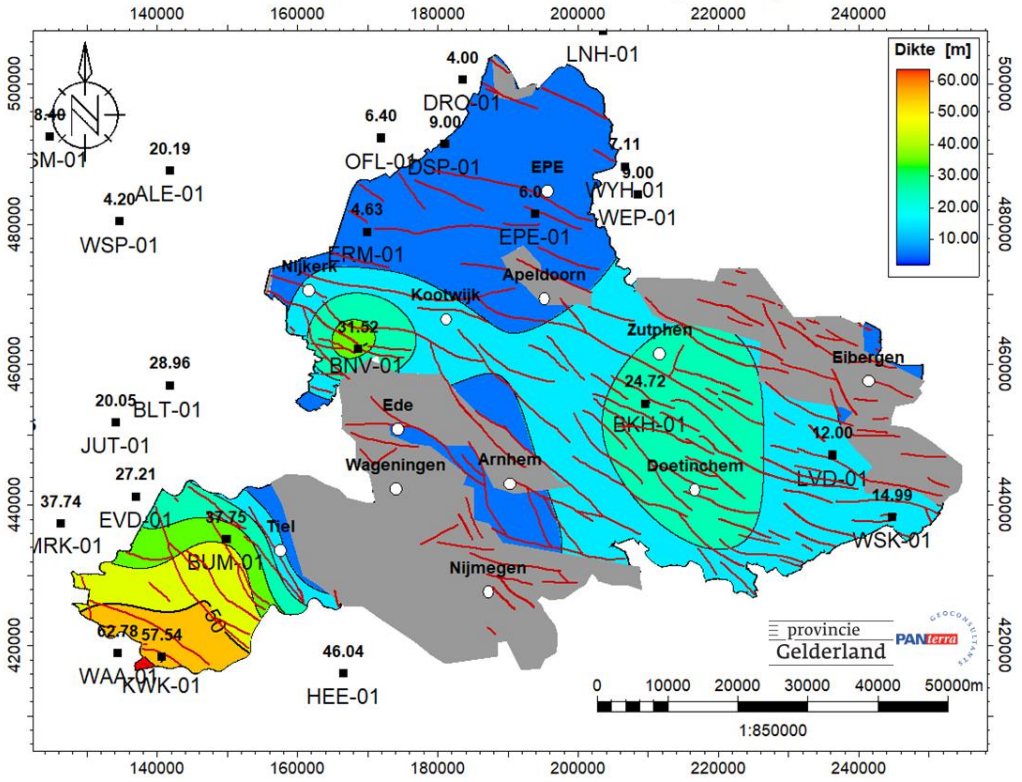

**Variant op het middel scenario, waarbij put WHY-01 niet is meegenomen in de bruto-diktekaart.**

## Onder Volpriehausen Laagpakket kaarten ter ondersteuning van de vermogenskaarten

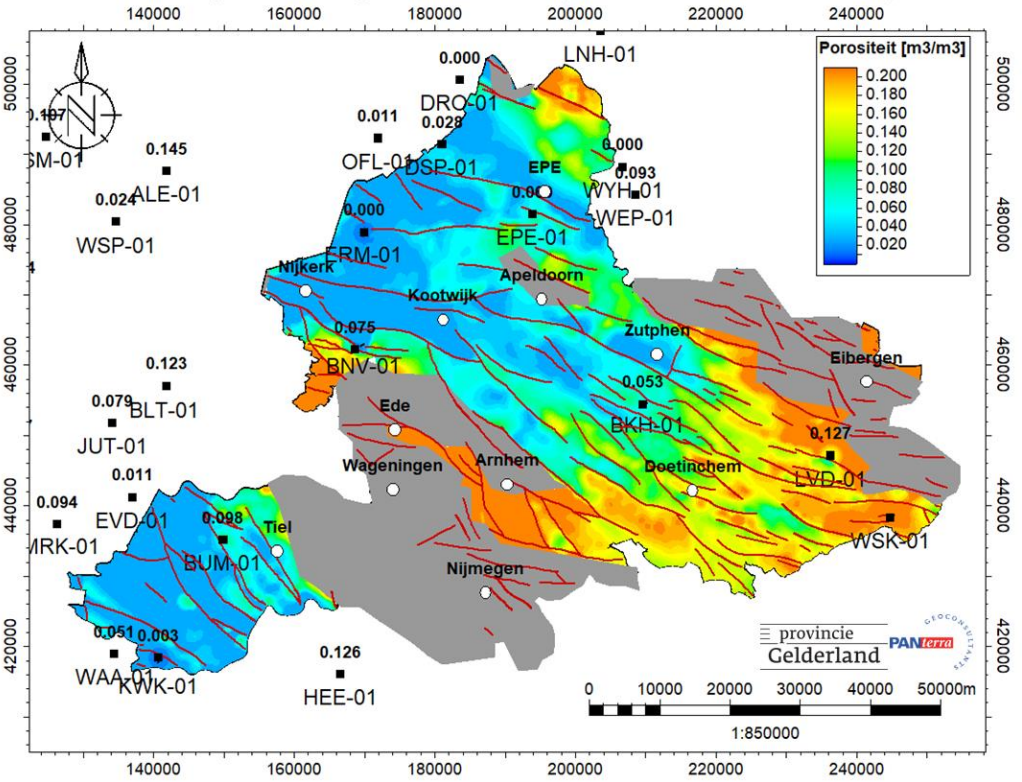


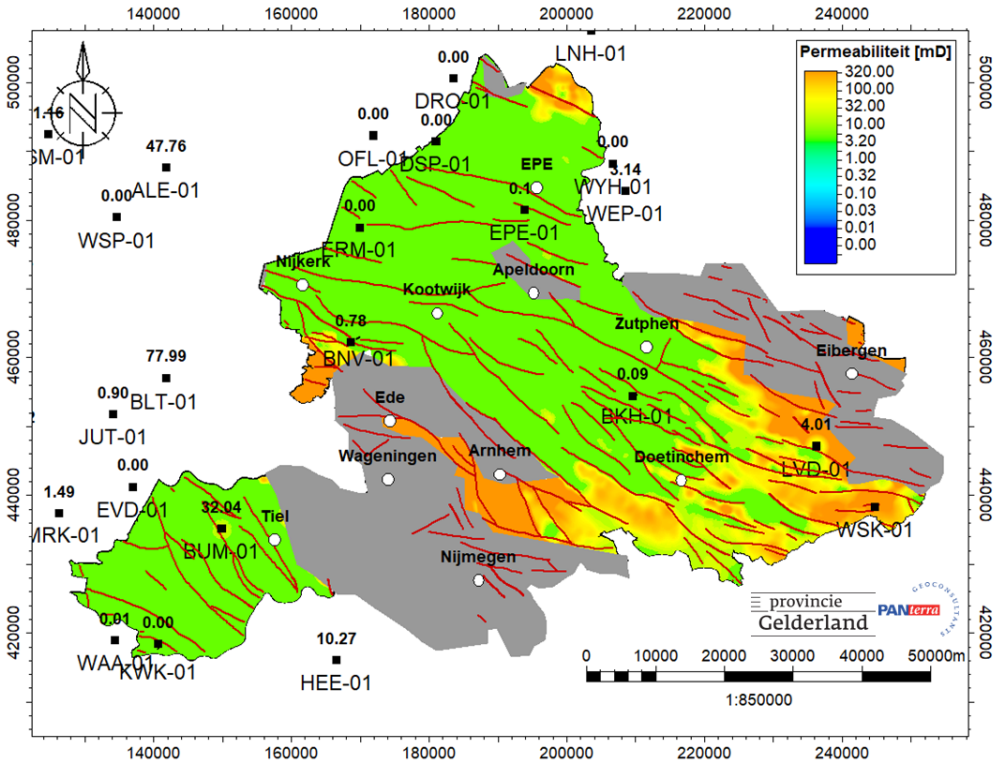
**Onder-Volpriehausen brutodiktekaart (RBMVL)**



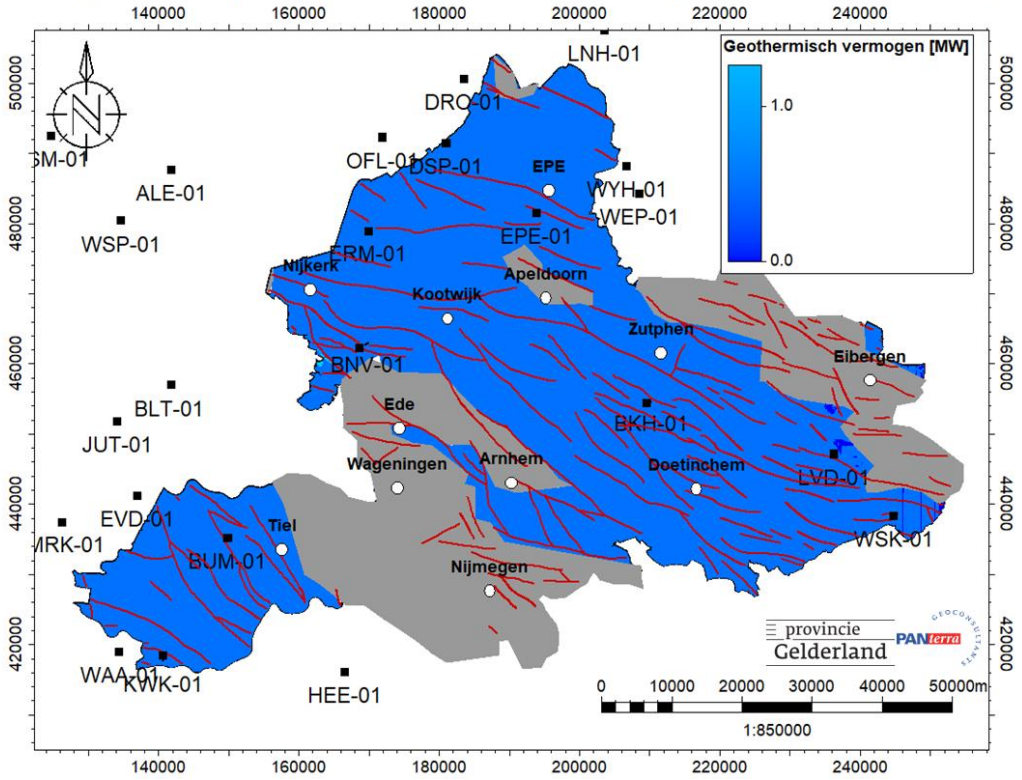

**Onder-Volpriehausen porositeitskaart (RBMVL - Middel scenario)**



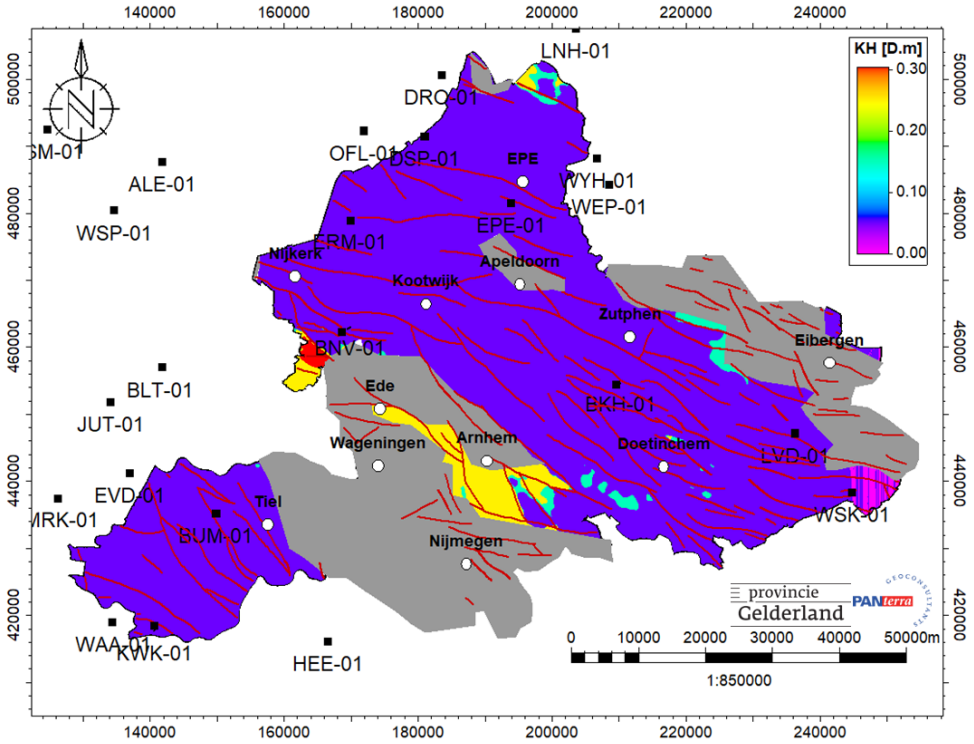
**Onder-Volpriehausen permeabiliteitskaart (RBMVL - Middel scenario)**



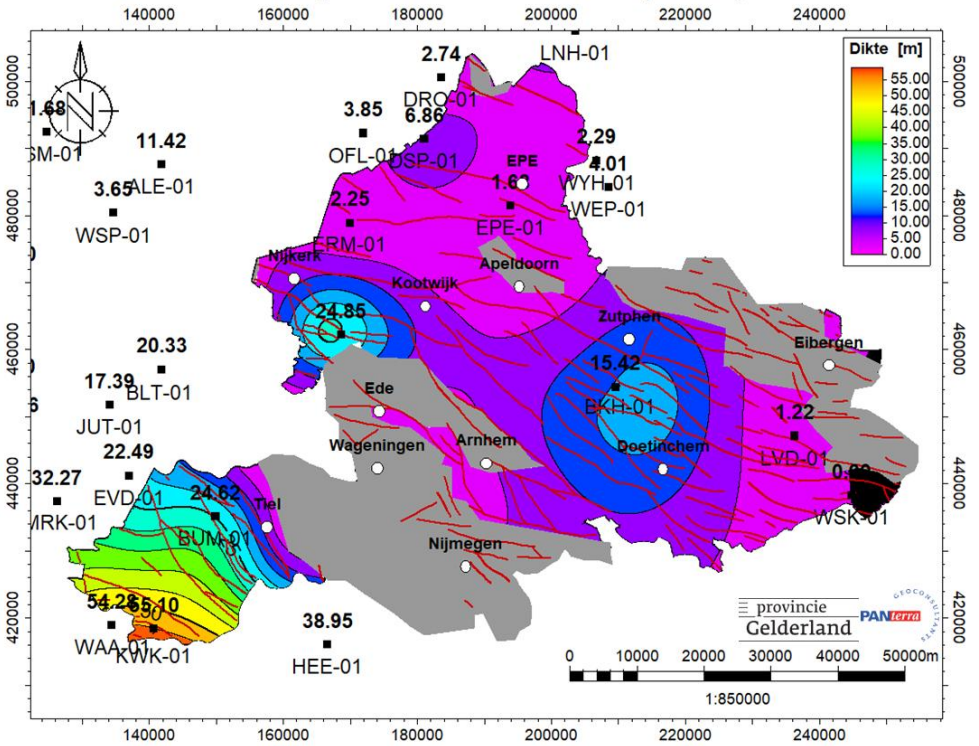

**Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (RBMVL - Middel scenario)**

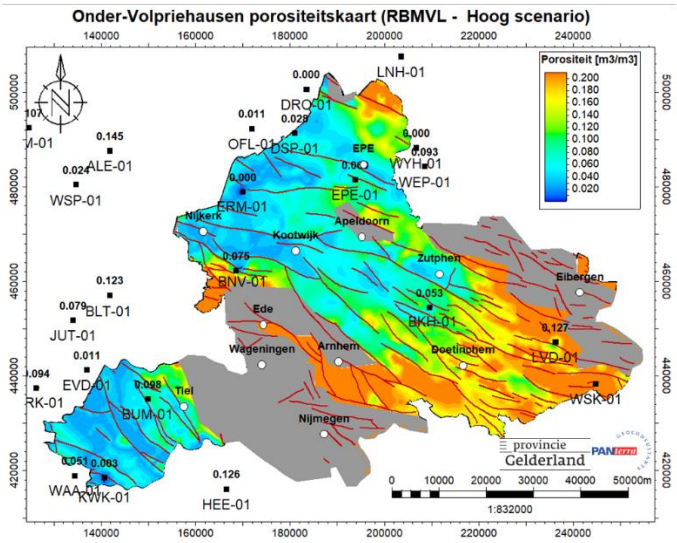


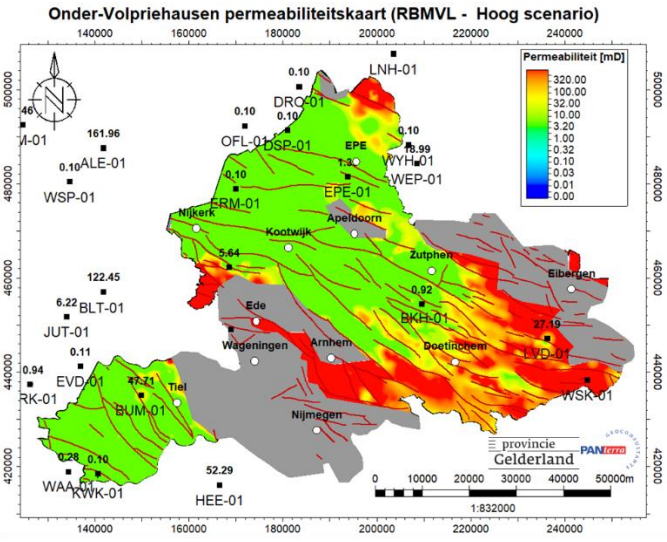
**Onder-Volpriehausen Transmissiviteit (RBMVL - Middel scenario)**

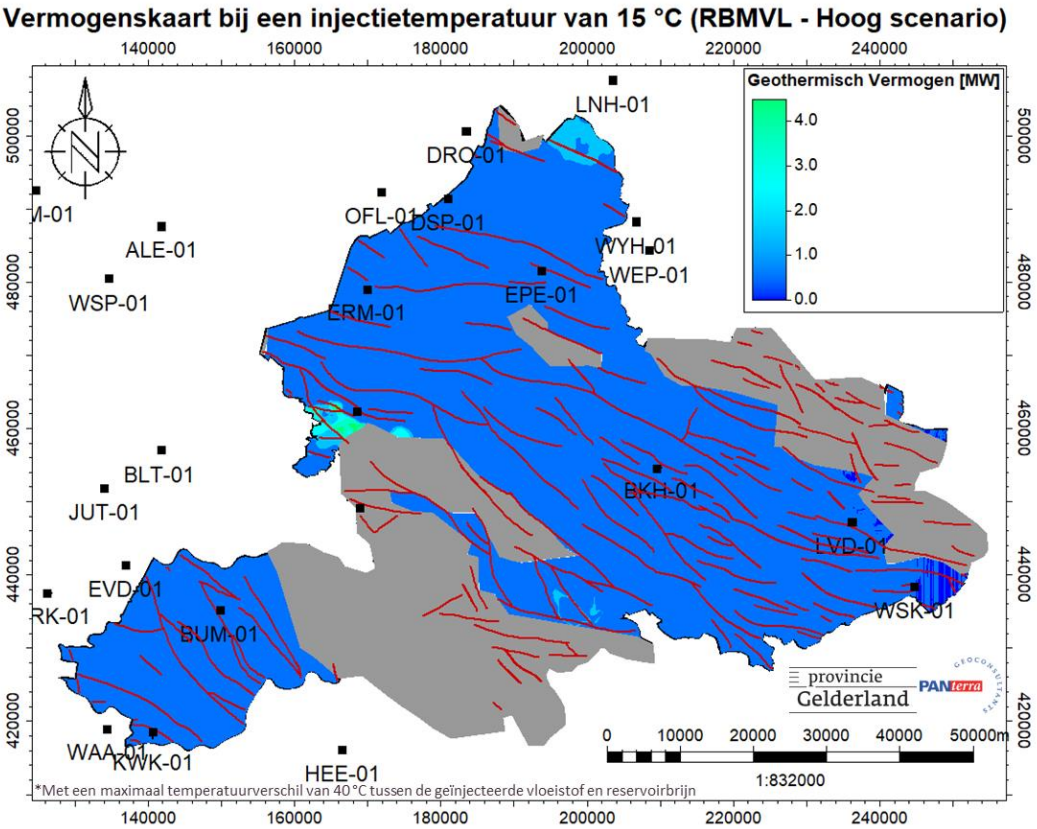



**Onder-Volpriehausen nettodiktekaart (RBMVL)**

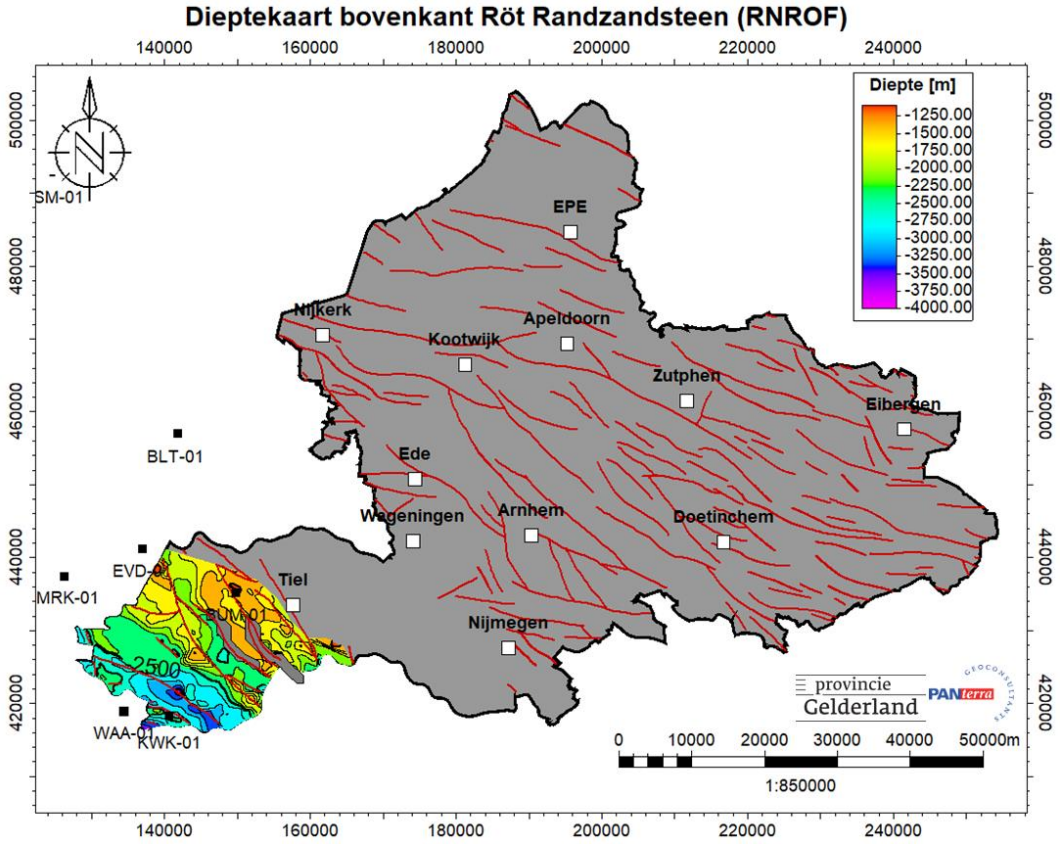


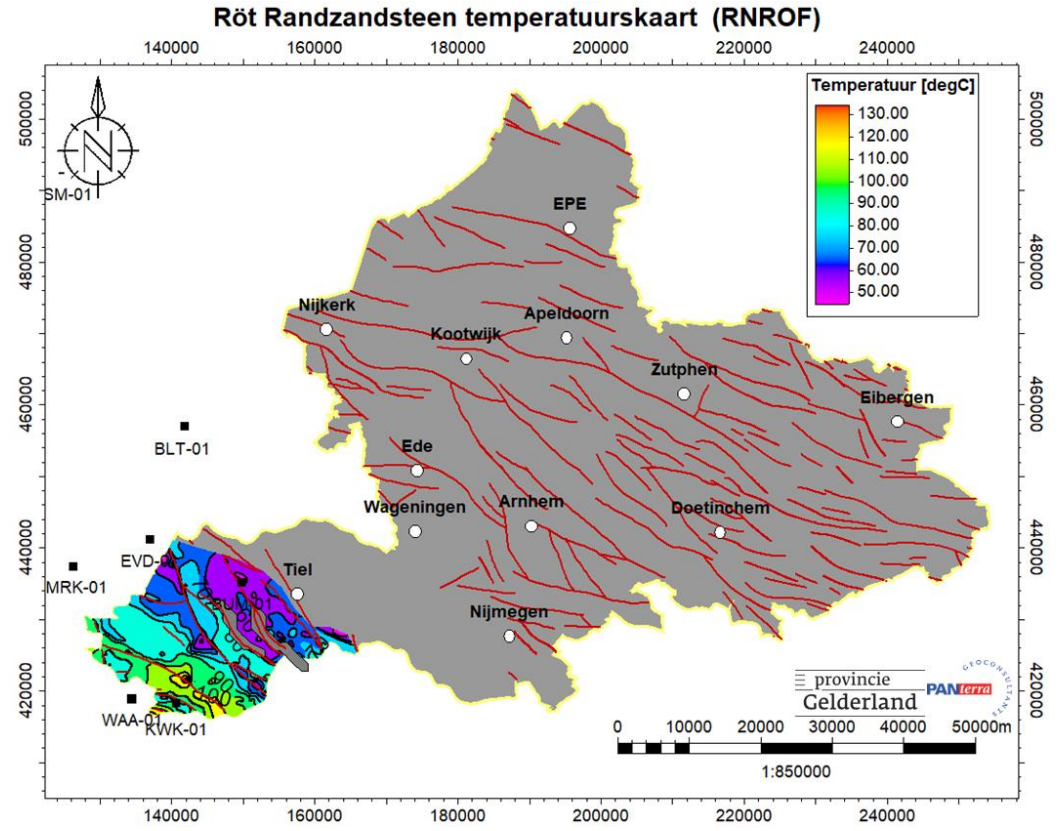

Onder-Volpriehausen porositeitskaart (RBMVL - Hoog scenario)
Porositeit [m3/m3]
0.200
0.180
0.160
0.140
0.120
0.100
0.080
0.060
0.040
0.020
LNH-01
DRC-01
OFL-01
DSP-01
EPE
WYH-01
WEP-01
EPE-01
ALE-01
WSP-01
ERM-01
Nijkerk
Apeldoorn
Kootwijk
Zutphen
Eibergen
BNV-01
Ede
BKH-01
BLT-01
JUT-01
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
LVD-01
WSK-01
EVD-01
Tiel
BUM-01
Nijmegen
WAA-01
KWK-01
HEE-01
provincie
Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000

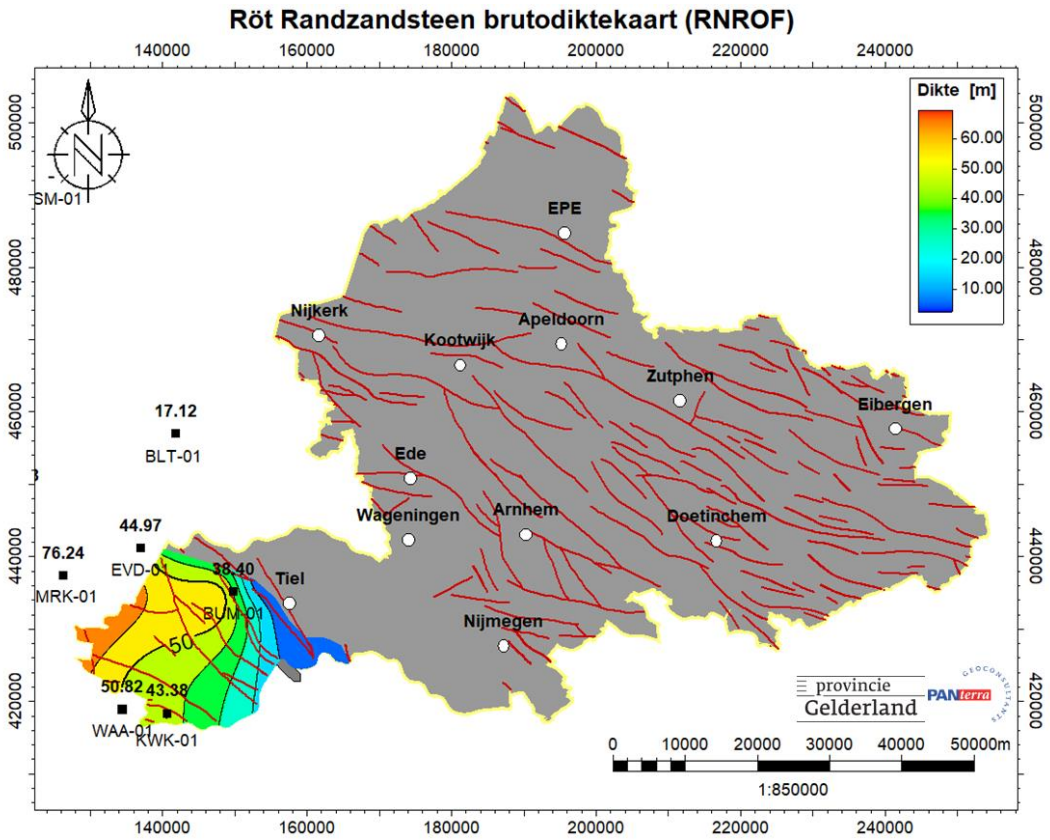

Onder-Volpriehausen permeabiliteitskaart (RBMVL - Hoog scenario)
Permeabiliteit [mD]
320.00
100.00
32.00
10.00
3.20
1.00
0.32
0.10
0.03
0.01
0.00
LNH-01
DRC-01
OFL-01
DSP-01
EPE
WYH-01
WEP-01
EPE-01
ALE-01
WSP-01
ERM-01
Nijkerk
Apeldoorn
Kootwijk
Zutphen
Eibergen
BKH-01
BLT-01
JUT-01
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
LVD-01
WSK-01
EVD-01
Tiel
BUM-01
Nijmegen
WAA-01
KWK-01
HEE-01
provincie
Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000

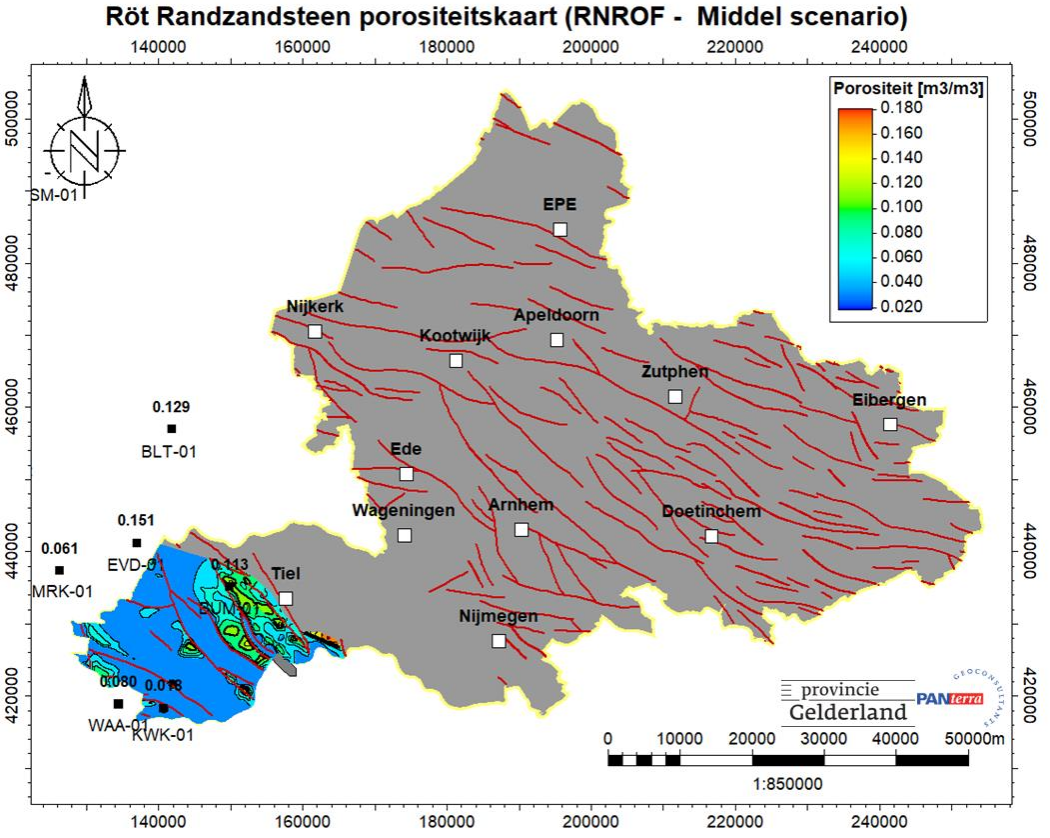

Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (RBMVL - Hoog scenario)
Geothermisch Vermogen [MW]
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
LNH-01
DRC-01
OFL-01
DSP-01
WYH-01
WEP-01
EPE-01
ALE-01
WSP-01
ERM-01
BKH-01
BLT-01
JUT-01
LVD-01
EVD-01
WSK-01
BUM-01
WAA-01
KWK-01
HEE-01
provincie
Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000
*Met een maximaal temperatuurverschil van 40 °C tussen de geïnjecteerde vloeistof en reservoirbrijn

## Röt Randzandsteen Laagpakket kaarten ter ondersteuning van de vermogenskaarten

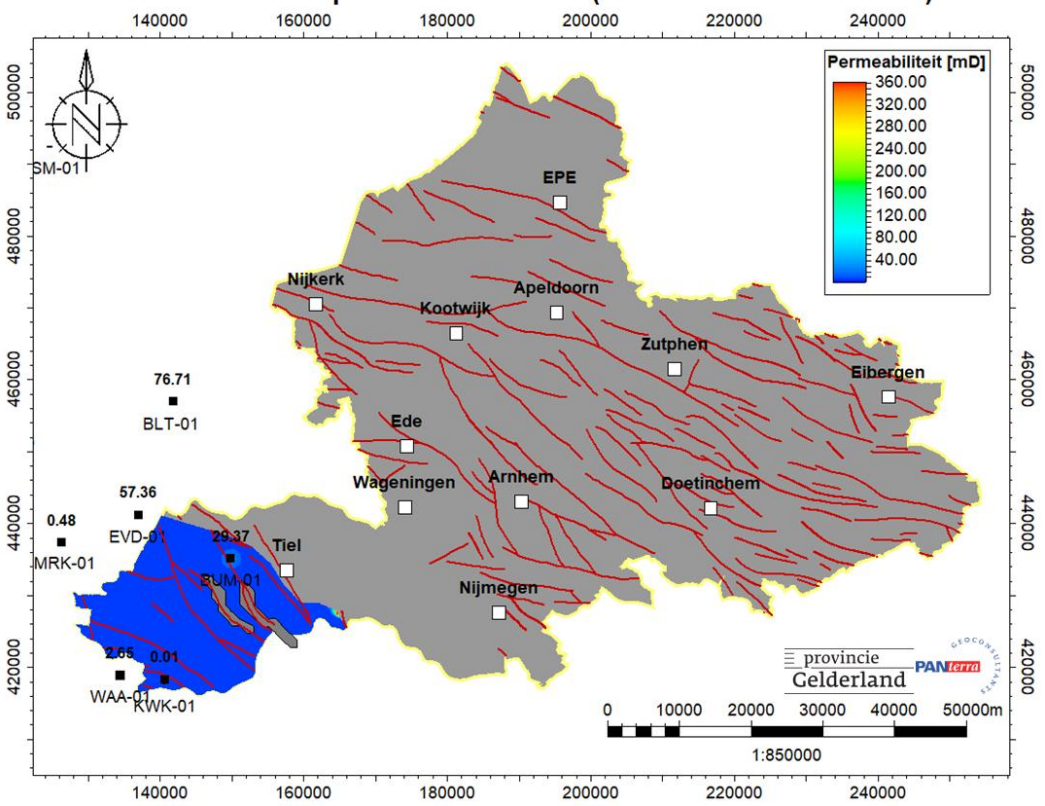


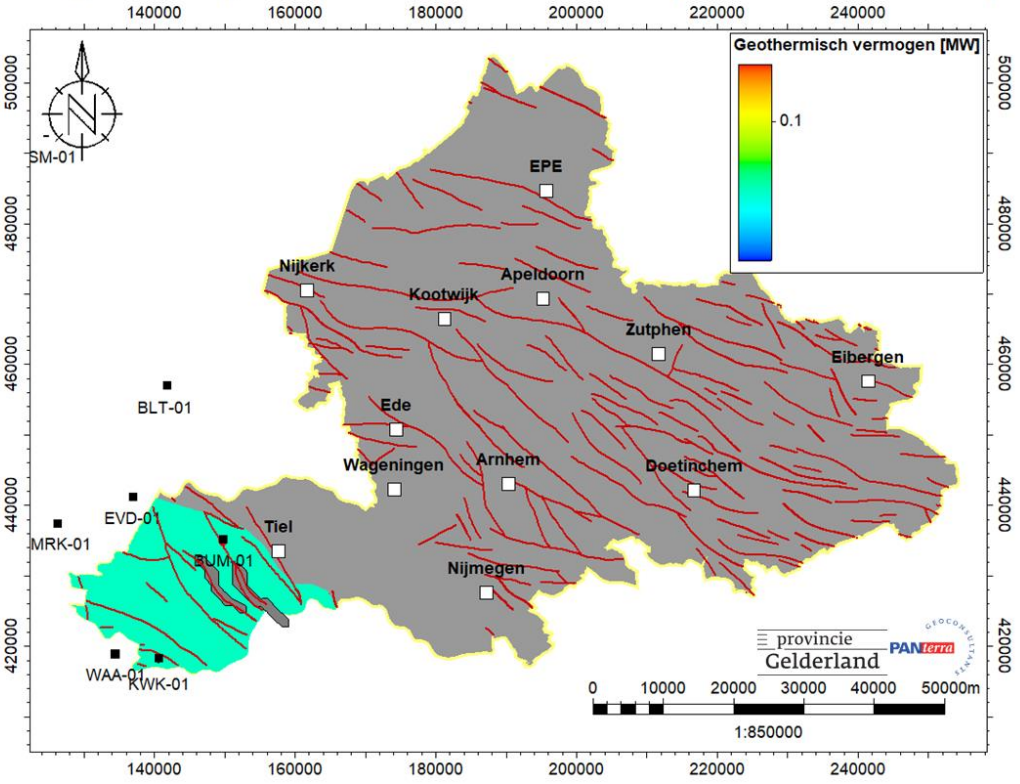

Röt Randzandsteen brutodiktekaart (RNROF)
Dikte [m]
60.00
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
EPE
Nijkerk
Kootwijk
Apeldoorn
Zutphen
Eibergen
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
Nijmegen
Tiel
17.12
BLT-01
44.97
76.24
MRK-01
EVD-01
38.40
BUM-01
50
50.82
43.38
WAA-01
KWK-01
SM-01
provincie
Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:850000
140000 160000 180000 200000 220000 240000
500000 480000 460000 440000 420000

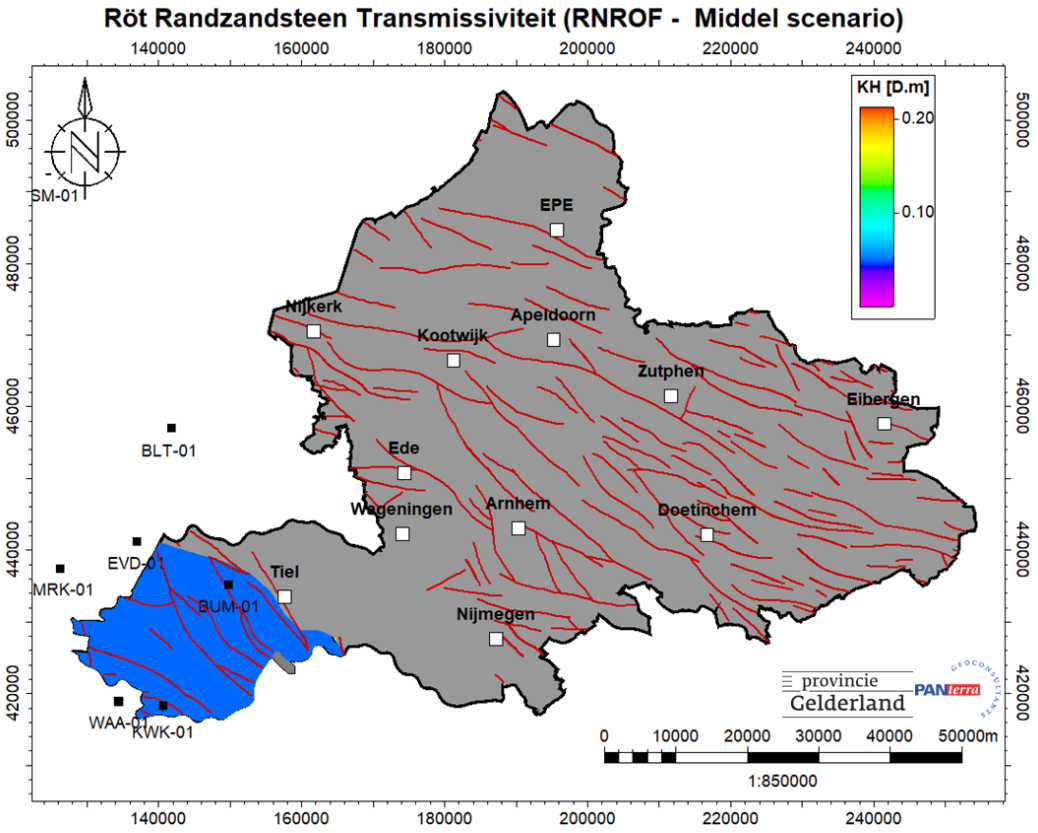

Röt Randzandsteen porositeitskaart (RNROF - Middel scenario)
Porositeit [m3/m3]
0.180
0.160
0.140
0.120
0.100
0.080
0.060
0.040
0.020
EPE
Nijkerk
Kootwijk
Apeldoorn
Zutphen
Eibergen
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
Nijmegen
Tiel
0.129
BLT-01
0.151
0.061
MRK-01
EVD-01
0.113
BUM-01
0.080
0.018
WAA-01
KWK-01
SM-01
provincie
Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:850000
140000 160000 180000 200000 220000 240000
500000 480000 460000 440000 420000

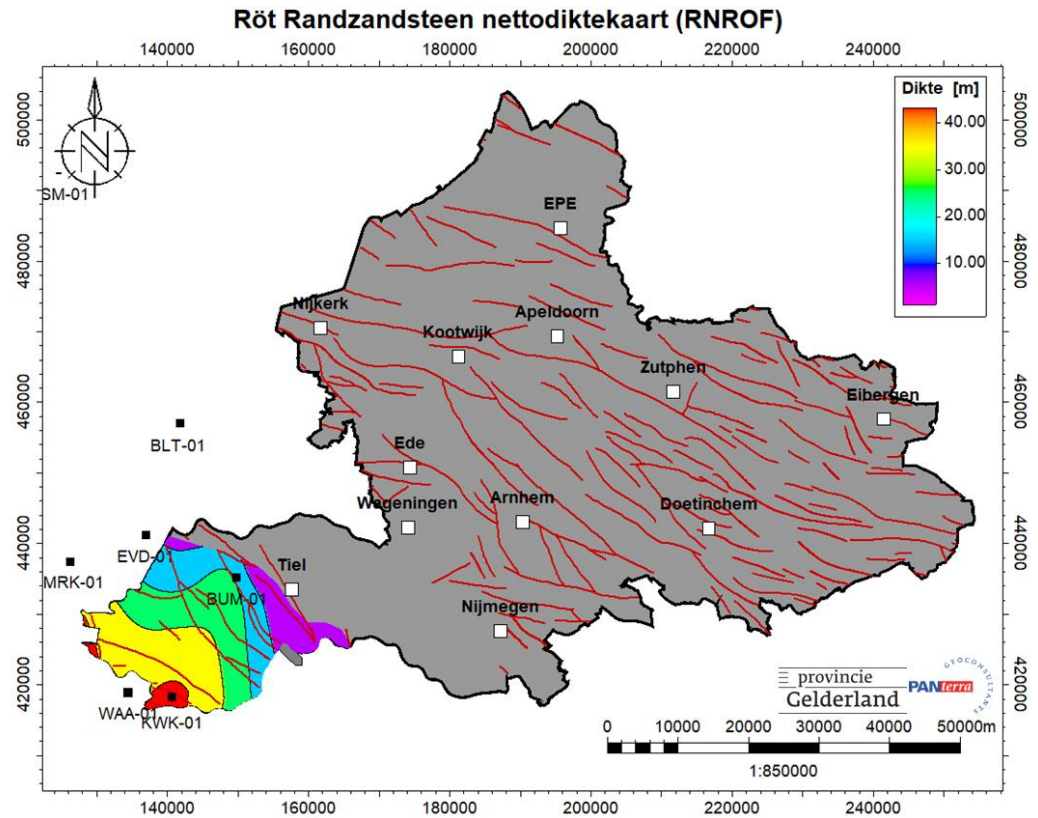
**Röt Randzandsteen permeabiliteitskaart (RNROF - Middel scenario)**

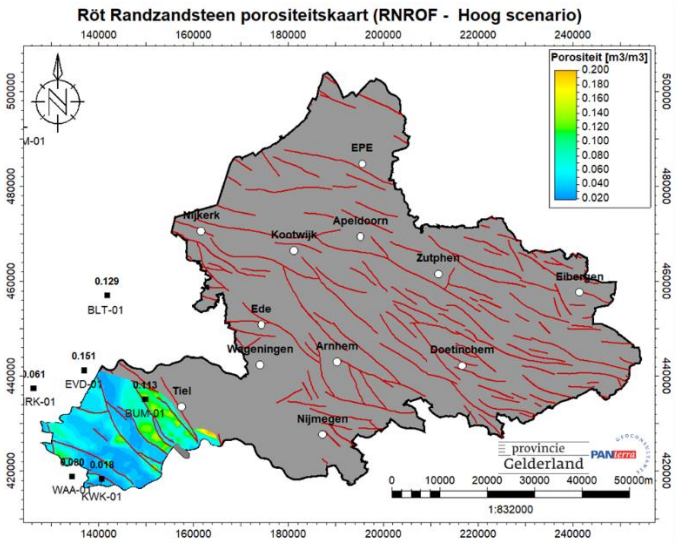


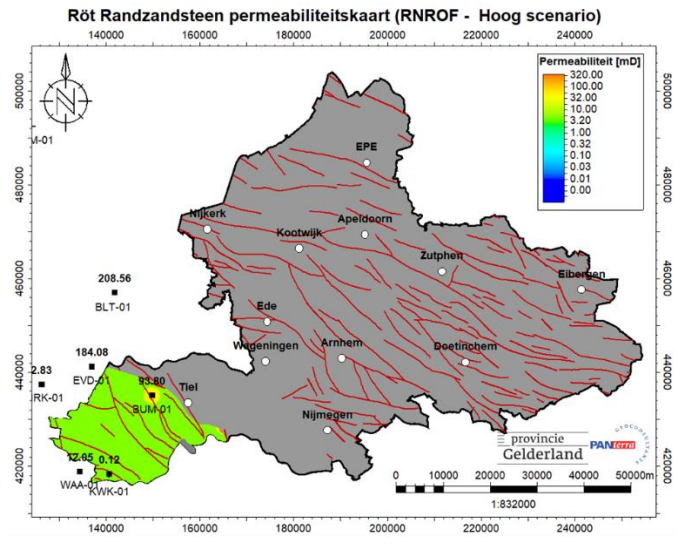

**Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (RNROF - Middel scenario)**

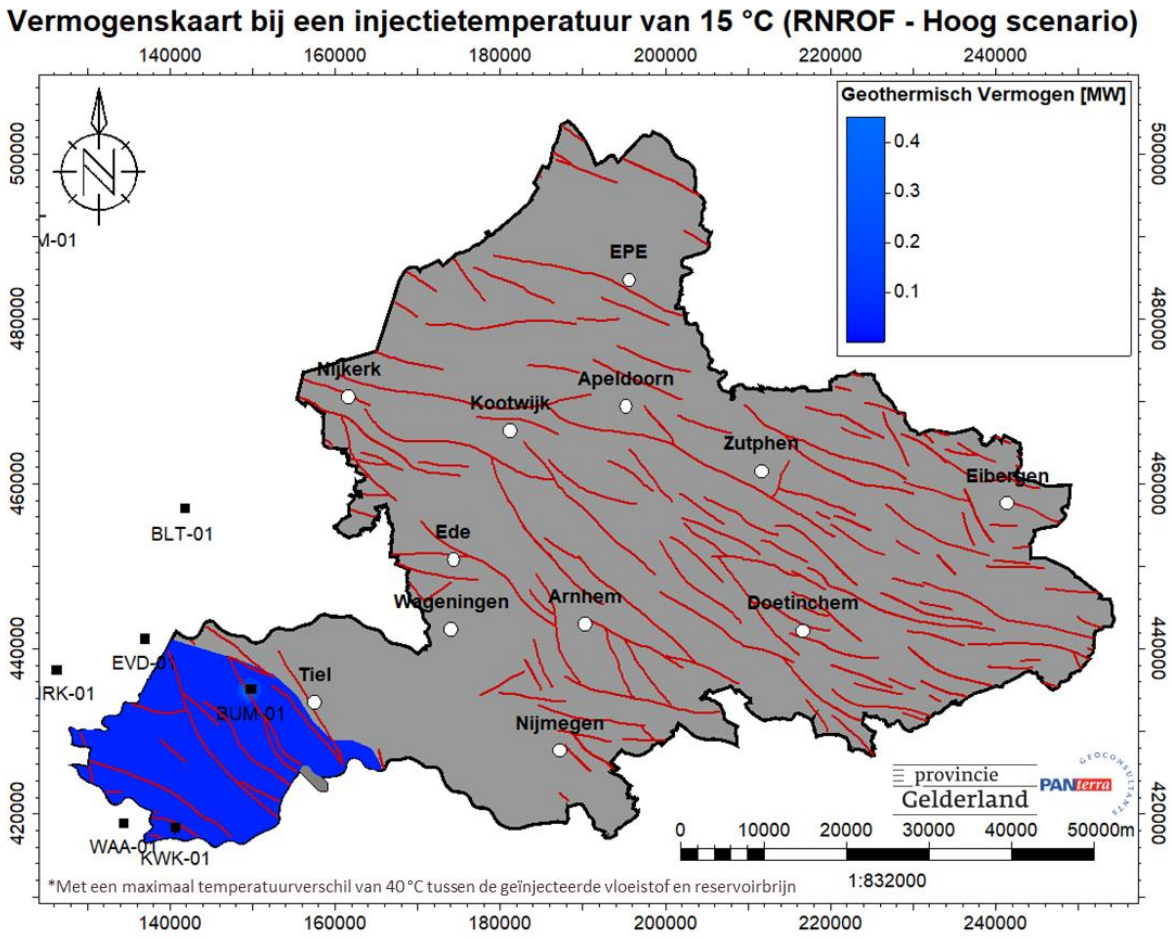



Röt Randzandsteen Transmissiviteit (RNROF - Middel scenario)
KH [D.m]
0.20
0.10
SM-01
EPE
Nijkerk
Apeldoorn
Kootwijk
Zutphen
Eibergen
BLT-01
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
EVD-01
MRK-01
Tiel
BUM-01
Nijmegen
WAA-01
KWK-01
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:850000
140000 160000 180000 200000 220000 240000
500000 480000 460000 440000 420000


Röt Randzandsteen nettodiktekaart (RNROF)
Dikte [m]
40.00
30.00
20.00
10.00
SM-01
EPE
Nijkerk
Apeldoorn
Kootwijk
Zutphen
Eibergen
BLT-01
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
EVD-01
MRK-01
Tiel
BUM-01
Nijmegen
WAA-01
KWK-01
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:850000
140000 160000 180000 200000 220000 240000
500000 480000 460000 440000 420000


Röt Randzandsteen porositeitskaart (RNROF - Hoog scenario)
Porositeit [m3/m3]
0.200
0.180
0.160
0.140
0.120
0.100
0.080
0.060
0.040
0.020
EPE
Nijkerk
Kootwijk
Apeldoorn
Zutphen
Eibergen
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
Tiel
Nijmegen
BLT-01
EVD-01
RK-01
SUM-01
WAA-01
KWK-01
0.129
0.151
0.061
0.112
0.080
0.016
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000


Röt Randzandsteen permeabiliteitskaart (RNROF - Hoog scenario)
Permeabiliteit [mD]
320.00
100.00
32.00
10.00
3.20
1.00
0.32
0.10
0.03
0.01
0.00
EPE
Nijkerk
Kootwijk
Apeldoorn
Zutphen
Eibergen
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
Tiel
Nijmegen
BLT-01
EVD-01
RK-01
SUM-01
WAA-01
KWK-01
208.56
184.08
2.83
93.80
2.65
0.12
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000


Vermogenskaart bij een injectietemperatuur van 15 °C (RNROF - Hoog scenario)
Geothermisch Vermogen [MW]
0.4
0.3
0.2
0.1
EPE
Nijkerk
Kootwijk
Apeldoorn
Zutphen
Eibergen
Ede
Wageningen
Arnhem
Doetinchem
Tiel
Nijmegen
BLT-01
EVD-01
RK-01
SUM-01
WAA-01
KWK-01
provincie Gelderland
PANterra
0 10000 20000 30000 40000 50000m
1:832000
*Met een maximaal temperatuurverschil van 40 °C tussen de geïnjecteerde vloeistof en reservoirbrijn

## Appendices studie reservoirkwaliteit

Zie Excel bestand met putdata.