

Implicatiestudie SCAN-boring Oranjeoord-01

Ondergrondse potentie van LT-aardwarmte in het Zand van Brussel Laagpakket

Vorbereid voor: Energie Beheer Nederland
Door: Sroule ERCE (hoofdauteur)
 Witteveen+Bos (coauteur)
Datum: 15 april 2026

Disclaimer

Dit materiaal is opgesteld door Veegeo B.V. ("Sproule ERCE") en Witteveen+Bos raadgevende ingenieurs B.V. ("Witteveen+Bos"), samen: het "Consortium", op basis van de instructies en gegevens van Energie Beheer Nederland B.V. (de "Klant") om professionele en onafhankelijke mening aan de Klant te verstrekken en is dus uitsluitend opgesteld ten behoeve van de Klant en niet ten behoeve van derden.

Het consortium geen enkele garantie, expliciet of impliciet, met betrekking tot de nauwkeurigheid, volledigheid of geschiktheid van de informatie in dit materiaal. Het consortium is niet aansprakelijk voor enig verlies of schade die voortvloeit uit het gebruik van dit materiaal. De informatie in dit materiaal is gebaseerd op de gegevens die beschikbaar waren op het moment van opstellen en kan zonder voorafgaande kennisgeving worden gewijzigd. Het vertrouwen op dit materiaal door derden aan wie de klant dit materiaal openbaar maakt of ter beschikking stelt, is uitsluitend voor risico van die derden. Het consortium garandeert niet de juistheid van interpretaties, conclusies of aanbevelingen en is niet aansprakelijk voor enig verlies, kosten, schade of uitgaven die voortvloeien uit het vertrouwen op interpretaties, conclusies of aanbevelingen in dit materiaal.

Dit materiaal bevat toekomstgerichte verklaringen en schattingen die onderhevig zijn aan verschillende risico's en onzekerheden. Dit materiaal houdt geen rekening met de specifieke bedrijfsdoelstellingen van enige ontvanger. Dit materiaal vormt geen advies of aanbod om instrumenten, producten of diensten te kopen of te verkopen. Het handelen in grondstoffen, financiële instrumenten, derivaten, producten of aanverwante zaken brengt verschillende risico's met zich mee, en u aanvaardt de volledige en definitieve verantwoordelijkheid voor het doen van enige investering of het nemen van enige beslissing hieromtrent. Alle ramingen van reserves en hulpbronnen zijn voorlopig, onder voorbehoud van wijzigingen en moeten met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Het consortium verstrekt deze informatie als haar professionele en onafhankelijke mening en geeft geen garantie met betrekking tot de nauwkeurigheid, volledigheid of actualiteit van enige informatie, met inbegrip van gegevens uit bronnen van derden. De werkelijke resultaten kunnen wezenlijk verschillen van de uitgedrukte of geïmpliceerde resultaten. De klant is verantwoordelijk voor de volledigheid en nauwkeurigheid van alle gegevens die aan het consortium worden verstrekt. De ramingen en analyses in dit materiaal kunnen worden herzien wanneer aanvullende gegevens beschikbaar komen.

Het consortium geeft geen expliciete of impliciete verklaringen of garanties met betrekking tot dit materiaal of de inhoud ervan, inclusief met betrekking tot fouten, weglatingen of intellectuele eigendomsrechten van derden. Het consortium is niet aansprakelijk voor enige verliezen, kosten, schade, met inbegrip van maar niet beperkt tot directe, indirecte, incidentele, punitieve en gevolgschade, of enige kosten, hetzij op grond van een overeenkomst, onrechtmatige daad (met inbegrip van nalatigheid of schending van wettelijke verplichtingen), onjuiste voorstelling van zaken (hetzij onschuldig of nalatig) of anderszins, die voortvloeien uit het gebruik van, de toegang tot of het vertrouwen op dit materiaal of de inhoud ervan.

Deze presentatie mag niet worden gereproduceerd, geëxploiteerd, verspreid of gewijzigd zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het consortium en alle inhoud moet in zijn geheel worden weergegeven. Indien geleverd in digitaal formaat, wijst het consortium elke verantwoordelijkheid af voor wijzigingen of aanpassingen die door de klant of een derde partij na levering worden aangebracht.

Digitale Rapportmelding

Dit rapport is opgesteld in een volledig digitaal, controleerbaar en wettelijk conform formaat met behulp van een PDF/A-standaard (ISO 19005-1, 2 of 3).

De professionals van Sroule ERCE en Witteveen+Bos hebben het rapport ook ondertekend met onafhankelijk verifieerbare digitale handtekeningen voor authenticatiedoeleinden. Voor meer informatie over digitale rapporten, digitale handtekeningen en de verificatie daarvan kunt u terecht op [Sroule ERCE Digital Signatures](#).

Vorbereid voor	Energiebeheer Nederland
Projectnummer	[37371, 116902]
Distributie	Energiebeheer Nederland
	Volledig rapport (Digitaal exemplaar, 0 Hard copies)
	Sroule ERCE / Witteveen+Bos (Volledige digitaal exemplaar behouden)
Editor	Han Claringbould

Dit document is strikt vertrouwelijk en uitsluitend bestemd voor gebruik door de ontvanger. Het mag niet worden gereproduceerd of verspreid zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Sroule ERCE en Witteveen+Bos. Als u niet de beoogde ontvanger bent, mag u de informatie in deze documentatie op geen enkele wijze openbaar maken of gebruiken.

Inhoudsopgave

1.Aanleiding en samenvatting	13
2.Geologische context	16
2.1 Tektonisch framework	16
2.2 Paleogeografie	16
2.3 Stratigrafie	17
3.Overzicht van beschikbare en gebruikte data	18
3.1 Oranjeoord-01	18
3.2 Offset putten	19
3.3 Seismische reflectie data en interpretaties	21
3.4 Definitie onderzoeksgebied	23
4.Oranjeoord-01	25
4.1 Computer Processed Interpretation (CPI)	25
4.2 Kenmerken en correlatie van boorgatmetingen	27
4.2.1 Glauconietzone	27
4.3 Kleivolume (<i>Vshale</i>)	29
4.4 Porositeit	30
4.5 Permeabiliteit	30
4.5.1 Kernplugmetingen	30
4.5.2 Druk- en formatiewater-correcties	31
4.5.3 Regionale k-Phi transform	32
4.5.4 Kalibratie met put testen	32
4.6 Netto-bruto (<i>net-to-gross</i>)	35
4.7 Samenvatting en implicaties reservoir eigenschappen ORO-01	35
4.8 Formatiewater karakterisering	36
4.8.1 Gascompositie en <i>gas-to-water</i> ratio	36
4.8.2 Total dissolved solids	39
4.8.3 Reservoirdruk	40
4.8.4 Geothermische gradiënt	40

4.8.5	Regionale trends	41
5.	Offset putten	43
5.1	Dataoverzicht	43
5.2	QA/QC en CPI methode	44
5.3	Petrofysische gemiddelden	45
5.4	CPI van ZVB-GT-01	47
6.	Seismische data en interpretaties	49
6.1	Seismische reflectie data	49
6.2	QA/QC methode	50
6.3	Karteren van het Zand van Brussel Laagpakket	52
6.4	Gridding, residuals, en diepteconversie	53
7.	Statisch model	56
7.1	Structureel model	56
7.2	Put correlatie en reservoirzoning	57
7.3	Facies modelling	59
7.4	Property modelling	60
7.4.1	Porositeit	60
7.4.2	Permeabiliteit	61
7.5	Zonekaarten	62
7.5.1	Net-to-gross	62
7.5.2	Vshale, LPSC, permeabiliteit	62
7.6	Onzekerheden	64
8.	Toepassing van geothermie	66
8.1	Van statisch model naar potentiekaarten	66
8.1.1	Stap 1: Monte Carlo simulatie	66
8.1.2	Stap 2: Berekenen reservoir parameters	68
8.1.3	Stap 3: Bepalen directional profiles	74
8.1.4	Stap 4: Bepalen doublet prestaties	78
8.2	Implicatie van ORO-01	82

8.2.1	Nulmeting	83
8.2.2	ORO-01 en de transmissiviteit van het Zand van Brussel Laagpakket	84
8.2.3	Modelonzekerheid	85
8.2.4	Dataonzekerheid	86
8.2.5	Vergelijking met ThermoGIS	87
8.2.6	Implicaties voor SCAN	87
8.3	Risico's en systeemoverwegingen	89
8.3.1	Ervaringen uit LTA Zevenbergen	89
8.3.2	Ontwerpfase	90
8.3.3	Boor- en testfase	94
8.3.4	Operationele fase	95
8.3.5	Abandonneringsfase	112
8.4	Geothermische potentie	112
8.4.1	Debiet	113
8.4.2	Productietemperatuur	117
8.4.3	Thermisch vermogen	119
8.4.4	Coëfficiënt of performance	122
9.Conclusie		125
Referenties		129
Appendices		132
	Appendix A: Gesimplificeerde CPI's offset putten	133
	Appendix B: Petrofysische gemiddelden	149
	Appendix C: SRIMA input file SDRA	156
	Appendix D: SRIMA input file Seal integrity	161
	Appendix E: Geothermische potentiekaarten	166

Tabellen

Tabel 3.1 Dataoverzicht van de gebruikte offset putten.....	20
Tabel 3.2 Beschikbare 2D seismische reflectie datasets.....	21
Tabel 3.3 Beschikbare seismische interpretaties voor de top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket.....	23
Tabel 4.1 Uitgangspunten voor het bepalen van de well tops in de petrofysische logs.....	28
Table 4.2 Vshale en porositeit berekening methode en parameters.....	30
Tabel 4.3 Samenvatting van reservoir eigenschappen Zand van Brussel Laagpakket.....	35
Tabel 4.4 Geothermische gradiënten in de Nederlandse ondergrond uit diverse onderzoeken.....	41
Tabel 4.5 Eigenschappen van het formatiewater in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.....	42
Tabel 5.1 Overzicht beschikbare data en kwaliteitsbeoordeling.....	43
Tabel 5.2 Samenvatting petrofysische gemiddelden (P50) offset wells incl. ORO-01.....	45
Tabel 8.1 Methode voor bepaling van PI voor verschillende put en reservoir eigenschappen en $\Delta > 5$	74
Tabel 8.2 Aannames voor de berekening van warmteverliezen langs de putten.....	80
Tabel 8.3 Aannames voor de efficiëntie van pompinstallaties.....	82
Tabel 8.4 Gevoeligheidsanalyse voor de maximale injectiedruk op basis van de SRIMA berekening uit Figuur 8.17 voor verschillende reservoirdiktes en dieptes.....	100

Figuren

Figuur 1.1 Uitgelicht resultaat: Economisch haalbaar debiet (P50) Lage Temperatuur Aardwarmte in het onderzoeksgebied.....	14
Figuur 1.2 Uitgelicht resultaat: Economisch haalbaar thermisch vermogen (P50) Lage Temperatuur Aardwarmte in het onderzoeksgebied.....	14
Figuur 1.3 Implicatie van deze studie voor de geothermische potentie in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog rond de ORO-01 put ten opzichte van ThermoGIS, welke op de resultaten uit WarmingUp is gebaseerd.....	15
Figuur 2.1 Paleografische reconstructie tijdens de afzetting van het Zand van Brussel Laagpakket (links), en een representatieve stratigrafische log van het Zand van Brussel Laagpakket in Nederland (rechts) (Geel & Foeken, 2021).....	16
Figuur 3.1 Data acquisitie plan van de Oranjeoord-01 put (Brussée, 2025).....	19

Figuur 3.2 Overzicht van de seismische gegevens die zijn gebruikt voor het in kaart brengen van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog: L2EBN2021-2023 (groen), L2NAM1984B (koraalrood), L2PET1984B (paars), L2NAM1986A (mauve), L2NAM1985D (cyaan). Het 3D-seismisch onderzoek (L3NAM2012AR) wordt weergegeven door het oranje grid. De omtrek van de Voorne-doorgang wordt aangegeven door een zwarte stippellijn.	22
Figuur 3.3 Het onderzoeksgebied is afgebakend door de Voorne Trog, aangegeven door een ononderbroken zwarte lijn. De omvang van het geomodel wordt weergegeven door de groene polygon.....	24
Figuur 4.1 Subset van de cuttings data van ORO-01.	25
Figuur 4.2 CPI van de ORO-01 boorgatmetingen.	26
Figuur 4.3 Cross-plot van kalium (POTA) en thorium (THOR) in het verhoogde GR interval nabij top van het Zand van Brussel	28
Figuur 4.4 Bimodale regionale <i>porperm</i> voor het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.	31
Figuur 4.5 Lineaire regressie op basis waarvan de gas-formatiewater conversie is uitgevoerd.	32
Figuur 4.6 Transmissiviteit in het gecompleteerde interval in de ORO-01 put op basis van de <i>porperm</i> relatie uit Figuur 4.4.	33
Figuur 4.7 Petrofysische gemiddelden berekend langs het “equivalente gecompleteerde interval” in de verticale ZVB-GT-01 put voor een rekenkundig gemiddelde (boven) en een meetkundig gemiddelde (onder).....	35
Figuur 4.8 Bubble point van <i>bottom hole</i> sample ORO-01 (PanTerra, 2024).	37
Figuur 4.9 Compositie van gas uit <i>bottom hole</i> sample ORO-01 (PanTerra, 2024).	37
Figuur 4.10 Dissolved solids in het downhole sample in ORO-01 (PanTerra, 2024).	38
Figuur 5.1 Vergelijking meest relevante petrofysische gemiddelden van boringen en sub-intervallen.	46
Figuur 5.2 Cross-plot van gemiddeld porositeit-permeabiliteit, met kleivolume, van reservoirintervallen in het Zand van Brussel Laagpakket, per put.	47
Figuur 5.3 CPI voor ZVB-GT-01.....	48
Figuur 6.1 Beschikbare interpretaties langs L2EBN2023A (zie Tabel 3.3). Noot dat de seismische lijn waarlangs de interpretaties zijn weergegeven nog niet beschikbaar was tijdens het maken van deze interpretaties.	49
Figuur 6.2 Seismic-to-well tie tussen ORO-01 en L2EBN2023. Zie dat de gepickte horizons voor de top en base van het Zand van Brussel Laagpakket (Top / Base BSM seismic) zich onder de daadwerkelijke well tops bevinden (Top / Base BSM well).	51

Figuur 6.3 Representatieve profielen die de interpretaties van de top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket (BSM) weergeven. De twee profielen zijn weergegeven op de kaart rechtsonder, welke tevens de top van het Zand van Brussel (bulk-shifted) weergeeft.	52
Figuur 6.4 Resultaat van de diepte interpretaties van de top Brussel Zand langs de seismische lijnen door het onderzoeksgebied.....	53
Figuur 6.5 Residuals tussen de bulk-shifted grids en de well tops voor de top en basis Zand van Brussel Laagpakket.	54
Figuur 7.1 Top geraamte statisch model. De rode lijn weergeeft de gekarteerde breuk.	56
Figuur 7.2 Stratigrafische correlatie en modelzoning. De hoge GR waardes vlak onder de top van het Zand van Brussel Laagpakket in zowel ORO-01 als STR-01 komen niet overeen met hoge <i>Vshale</i> waardes uit onze CPI.....	57
Figuur 7.3 Data inputs for the horizon model.	58
Figuur 7.4 Geomodel horizons and zones.....	58
Figuur 7.5 Bovenanzicht van het facies model voor de drie verschillende scenario's. Een toename in de zandfractie (in geel) van P25 naar P75 is zichtbaar. Rechtsboven zijn de variogram-instellingen voor de zand- en siltfracties weergegeven.....	60
Figuur 7.6 Van links naar rechts: upscaled PHIE en PHIT, PHIT (boven) en PHIE (onder) Z-slide (laag 41 door de S3-eenheid), en eigenschapsstatistieken voor PHIT (boven) en PHIE (onder). Het bovenstaande is representatief voor het P50-scenario.....	61
Figuur 7.7 Example of the facies model and PHIT model used as input for the P50 horizontal permeability calculation. The resulting permeability distribution is strongly controlled by the facies model.....	62
Figuur 7.8 Match tussen de mid case totale porositeit en de Brijn permeabiliteit voor de ZVB-GT-01 put.	63
Figuur 7.9 Workflow voor het bepalen van onzekerheidskaarten van het property model.	65
Figuur 8.1 Stappenplan voor het converteren van het statisch model naar geothermische potentiekaarten.	67
Figuur 8.2 Drie voorbeelden van het effect van putinclinatie θ en put oriëntatie φ op het productie- en injectie-interval in (dippende) stratigrafie.....	71
Figuur 8.3 Drie scenario's waarin de een voor putinclinatie θ in combinatie met een ondergrondse locatie van het productie- en injectie-interval leidt tot tot technisch niet haalbare doubletten.	76
Figuur 8.4 Voorbeeld van de rangschikking van twee geldige doubletontwerpen op basis van beschikbare ESP <i>drawdown</i> en de gemiddelde PI.....	77
Figuur 8.5 P50 transmissiviteit (Dm) van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.....	84

Figuur 8.6 P10 (boven) en P90 (onder) transmissiviteit (Dm) van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.....	86
Figuur 8.7 Residual van transmissiviteit met ThermoGIS op basis van het nieuwe statisch model in het P50 scenario.....	88
Figuur 8.8 Impact van de keuze voor een rekenkundig gemiddelde vergeleken met het in deze studie gekozen meetkundig gemiddelde voor de transmissiviteit van het Zand van Brussel Laagpakket. .	88
Figuur 8.9 Putontwerp van de producer in Zevenbergen (Geolog, 2018).	92
Figuur 8.10 Aanwezigheid van operationele olie en gasvelden in het Aol (PanTerra, 2014).	94
Figuur 8.11 Positie van de Rijen breuk in het onderzoeksgebied, met een bufferzone van 1.5 km.	95
Figuur 8.12 Operationele limieten voor het aardwarmtesysteem LTA Zevenbergen uit het concept-Instemmingsbesluit.	97
Figuur 8.13 Maximale injectiedruk in het onderzoeksgebied op basis van het SodM-injectiedrukprotocol.....	97
Figuur 8.14 Bepaling van de Shmin gradiënt in de ondiepe ondergrond op basis van putgegevens van ORO-01, en twee XLOT's in de afsluitende lagen boven het Zand van Brussel Laagpakket (Hetteema <i>et al.</i> , 2025).	98
Figuur 8.15 Bepaling van geomechanische parameters van core-materiaal uit het Zand van Brussel Laagpakket en de bovenliggende afsluitende lagen (Jahns, 2024).	99
Figuur 8.16 Bepaling van thermische expansiecoëfficiënt van core-materiaal uit het Zand van Brussel Laagpakket (Jahns, 2024).	100
Figuur 8.17 Bepaling van de maximale injectiedruk bij de ORO-01 locatie op basis van een SRIMA seal integrity berekening, gebruik makende van de nieuwe metingen van geomechanische parameters en Shmin (Appendix C).	100
Figuur 8.18 Maximale injectiedruk in het onderzoeksgebied op basis van SRIMA seal integrity berekeningen gebruik makende van nieuw gemeten geomechanische parameters.....	102
Figuur 8.19 Residual van de maximale injectiedruk op basis van de nieuwe geomechanische metingen en de maximale injectiedruk op basis van het SodM injectiedrukprotocol.....	102
Figuur 8.20 P50 COP voor een put ($\theta=70^\circ$) op basis van de maximale injectiedruk uit het SodM injectiedrukprotocol (boven), en op basis van de maximale injectiedruk op basis van de nieuwe geomechanische metingen (beneden).	103
Figuur 8.21 P50 Debiet voor een put ($\theta=70^\circ$) op basis van de maximale injectiedruk uit het SodM injectiedrukprotocol (boven), en op basis van de maximale injectiedruk op basis van de nieuwe geomechanische metingen (beneden).	104
Figuur 8.22 Standaard Traffic Light System voor Nederlandse aardwarmteprojecten.	105

Figuur 8.23 Algemene flowchart voor het toetsen van de risico's voor geïnduceerde seismiciteit in Nederlandse aardwarmteprojecten.	106
Figuur 8.24 Flowchart voor het uitvoeren van een Seismische Dreiging Screening.	107
Figuur 8.25 Conservatieve methode voor de bepaling van de GT-Aol op basis van putafstand. ...	108
Figuur 8.26 Flowchart voor het uitvoeren van een uitgebreide SDRA.	109
Figuur 8.27 Geometrie van de Rijen breuk in SRIMA, inclusief locatie van een hypothetische injector.	109
Figuur 8.28 Peak ground velocity (PGV) voor een voorbeeldproject nabij de Rijen breuk.	110
Figuur 8.29 Afstand tot epicentrum van 3 mm/s beving bij een voorbeeldproject bij de Rijen breuk.	110
Figuur 8.30 Largest credible earthquake (LCE) voor een voorbeeldproject nabij de Rijen breuk...	111
Figuur 8.31 Tornado plot van de sensitiviteit van diverse parameters voor de LCE bij een diep geothermieproject (TNO-AGE, 2023).	111
Figuur 8.32 Technisch haalbaar debiet $\theta=45^\circ$ – P50.	114
Figuur 8.33 Technisch haalbaar debiet $\theta=70^\circ$ – P50.	114
Figuur 8.34 Technisch haalbaar debiet $\theta=85^\circ$ – P50.	115
Figuur 8.35 Economisch haalbaar debiet– $\theta=45^\circ$ – P50.	116
Figuur 8.36 Economisch haalbaar debiet– $\theta=70^\circ$ – P50.	116
Figuur 8.37 Productietemperatuur.	117
Figuur 8.38 Technisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=45^\circ$ – P50.	118
Figuur 8.39 Technisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=70^\circ$ – P50.	118
Figuur 8.40 Technisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=85^\circ$ – P50.	119
Figuur 8.41 Economisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=45^\circ$ – P50.	121
Figuur 8.42 Economisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=70^\circ$ – P50.	121
Figuur 8.43 COP– $\theta=45^\circ$ – P50.	123
Figuur 8.44 COP– $\theta=70^\circ$ – P50.	123
Figuur 8.45 COP– $\theta=85^\circ$ – P50.	124
Figuur 9.1 Implicatie van deze studie voor de geothermische potentie in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog rond de ORO-01 put ten opzichte van ThermoGIS, welke op de resultaten uit WarmingUp is gebaseerd.	128

Afkortingen

AoI	Area of interest
BHA	Bottom hole assembly
BOP	Blow out preventer
BSM	Brussel Sand Member
Capex	Capital expenses
cc	cm ²
COP	Coefficient of performance
CPI	Computer processed interpretation
Dm	Darcymeter
DT	Sonic
EBN	Energiebeheer Nederland
EIP	Excess injection pressure
EOWR	End of well report
ESP	Electric submersible pump
EZK	(Ministerie van) Economische Zaken
ft	Feet
GR	Gamma-ray
GRE	Glass reinforced epoxy
GT-AoI	Geothermal area of influence
HDD	Horizontal directional drilling
HPMI	High pressure mercury injection
HWU	Hydraulic workover unit
II	Injectiviteitsindex
K	Permeabiliteit
Kh	Horizontale permeabiliteit
Kv	Verticale permeabiliteit
LAS	Log ASCII standard
LCE	Largest credible earthquake
LCM	Lost circulation materials
LPSA	Laser particle size analysis
LPSC	Low permeable streak continuously upscaled
LTA	Lage temperatuur aardwarmte

LWD	Logging tijdens het boren (<i>Logging-while-drilling</i>)
Mbw	Mijnbouwwet
MD	Measured depth
mD	Millidarcy
MIC	Microbiologically induced corrosion
MWD	Measuring while drilling
MWth	Megawatt thermisch
NG	Net-to-gross
NLOG	Nederlands Olie & Gasportaal
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material
NW	Noordwest
OD	Outer diameter
ORO-01	Oranjeoord-01
PAC	Poly Aluminium Chloride
PGV	Peak ground velocity
phi	Porositeit
PHIE	Effectieve porositeit
PHIT	Totale porositeit
PI	Productiviteitsindex
POS	Probability of success
PSD	Particle size distribution
PVT	Pressure volume temperature
QA/QC	Quality assurance & control
RCA	Routine core analysis
RES	Resistivity
RHOB	Bulk dichtheid
RSS	Rotary steerable system
SCAN	Seismische Campagne Aardwarmte Nederland
SDRA	Seismische dreiging en risico-analyse
SDS	Seismische dreiging screening
SG	Specific gravity
SGS	Sequential gaussian simulation ¹

¹ Kan ook refereren naar het test- inspectie- en certificeringsbedrijf SGS.

SodM	Staatstoezicht op de Mijnen
SP	Spontaneous Potential
SRB	Sulfate reducing bacteria
SRIMA	Seal and reservoir integrity through mechanical analysis
SRP	Sulfaat reducing prokaryote
TDS	Total dissolved solids
THP	Tubing head pressure
TLS	Traffic light system
TNO(-AGE)	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (-Adviesgroep Economische Zaken)
TSHP	Technical/Stabilized Hydrogen Peroxide
TST	True stratigraphic thickness
TVD	True vertical depth
TWT	Two way traveltime
UCS	Uniaxial compressive strength
Vshale	Kleivolume
VSH	Visser Smit Hanab
WNB	West Nederland Bekken
WKK	Warmte-krachtkoppeling
XLOT	Extended leak-off test
XRD	X-ray diffraction
XRF	X-ray fluorescence
BZL	Zand van Brussel Laagpakket
ZO	Zuidoost

1. Aanleiding en samenvatting

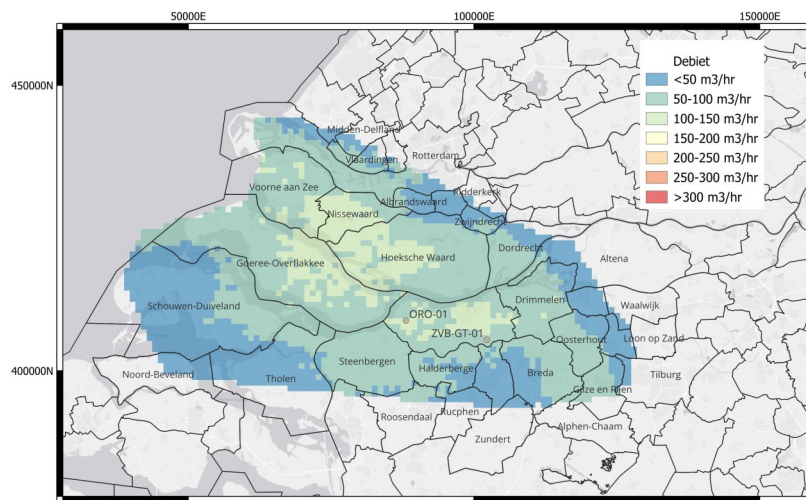
Op basis van de recente resultaten van vier SCAN-onderzoeksboringen wenst EBN een vernieuwd inzicht in de haalbaarheid van geothermie in een aantal regio's in het zuiden van Nederland. Om tot deze nieuwe inzichten te komen onderzoeken Sproule ERCE en Witteveen+Bos de implicaties voor geothermie van deze recente SCAN putten in hun bijbehorende uitstralingsgebied. Dit wordt gedaan door het vaststellen van de ondergrondse potentie (*Stap 1*), deze te koppelen aan de bovengrondse kansen (*Stap 2*), en de resultaten inzichtelijk te maken voor publiek en stakeholders (*Stap 3*).

Dit technische deelrapport beschrijft de werkwijze en resultaten van Stap 1 voor de SCAN-onderzoeksboring ORO-01, en het uitstralingsgebied van het Zand van Brussel Laagpakket reservoir (Figuur 1.1). Het onderzoeksgebied is gekozen rond de Voorne Trog, waarbinnen de eigenschappen van de ondergrond relatief lateraal continu worden geacht. Het doel van dit rapport is om de implicaties van de nieuwe SCAN-onderzoeksboring ORO-01 voor de regionale geothermische potentie in het Zand van Brussel Laagpakket vast te stellen. Dit bereiken we door gedetailleerde analyse van nieuwe data uit de ORO-01 put te integreren met gerichte herziening van bestaande gegevens om een dekkend model van de ondergrond te verkrijgen. Dit model vormt de basis voor de bepaling van de geothermische potentie, waarbij met onderbouwde systeemkeuzes de toepasbaarheid van geothermie-installaties in beeld is gebracht.

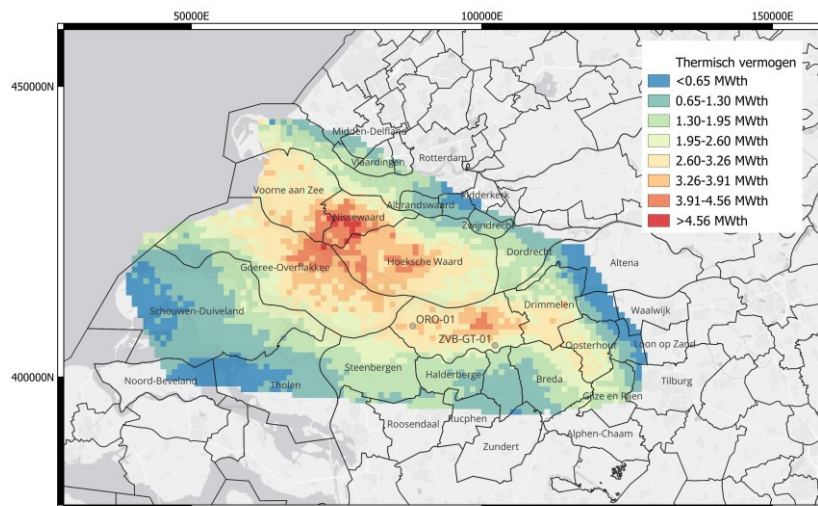
Op basis van ons onderzoek concluderen wij dat de reservoirkwaliteit van het Zand van Brussel Laagpakket goed is in de bovenste zandige eenheid (welke ook al in Zevenbergen is aangeboord), maar relatief weinig doorlaatbaarheid heeft in de onderste twee zandige eenheden. Omdat het Zand van Brussel Laagpakket relatief ondiep ligt zijn sterk gedeveerde putten noodzakelijk om voldoende afstand te creëren tussen de productie- en injectieput. In dit rapport wordt een referentieontwerp met een putdeviatie van 70° aangehouden. We berekenen economisch haalbare debieten tot 150 m³/u en vermogens tot boven de 5 MW_{th} (Figuur 1.1 en Figuur 1.2) in de as van het onderzoeksgebied, afnemend naar de randen van de Voorne Trog.

Uit ons onderzoek blijkt dat de ondergrondse potentie ten opzichte van bestaande modellen (ThermoGIS) wanneer puur wordt gekeken naar de dikte en doorlaatbaarheid van de ondergrond over vrijwel het gehele projectgebied lager is dan voorheen gedacht (Figuur 1.3, boven), tot 30 Dm lager in de as van het onderzoeksgebied. Een belangrijke oorzaak hiervoor is de gekozen methodologie. De kaarten uit ThermoGIS zijn gebaseerd op de resultaten uit de WarmingUp onderzoeken (o.a. Geel & Foeken, 2021). In WarmingUp is de gemiddelde doorlaatbaarheid met een *rekenkundig gemiddelde* berekend. Uit dit onderzoek blijkt dat deze methode niet zorgt voor een goede match met de put test data van ORO-01. Dunne streaks met een hoge doorlaatbaarheid aan de onderkant van het Zand van Brussel Laagpakket zorgen wanneer een *rekenkundig gemiddelde* wordt gebruikt voor een overschatting van de gemiddelde doorlaatbaarheid in dit deel van het reservoir. Een *meetkundig gemiddelde*, zoals gebruikt in deze studie, zorgt voor een goede match met de put test van ORO-01, maar resulteert dus ook in kaarten met een soms aanzienlijk lagere geologische potentie dan wordt getoond in de kaarten in ThermoGIS (Figuur 1.3, boven).

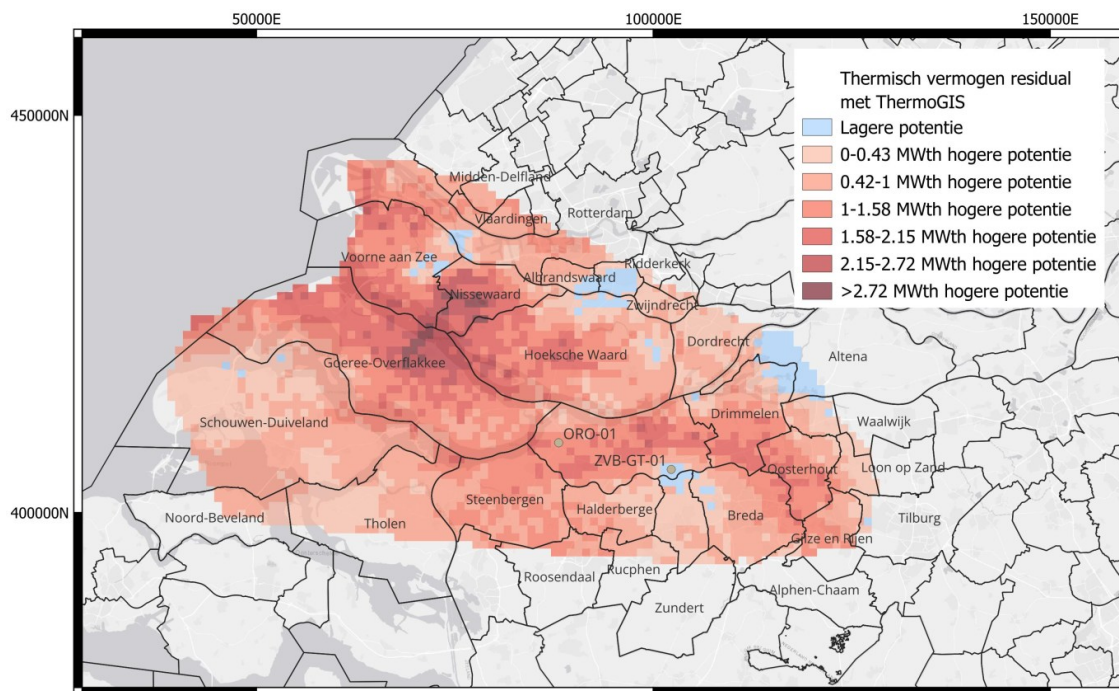
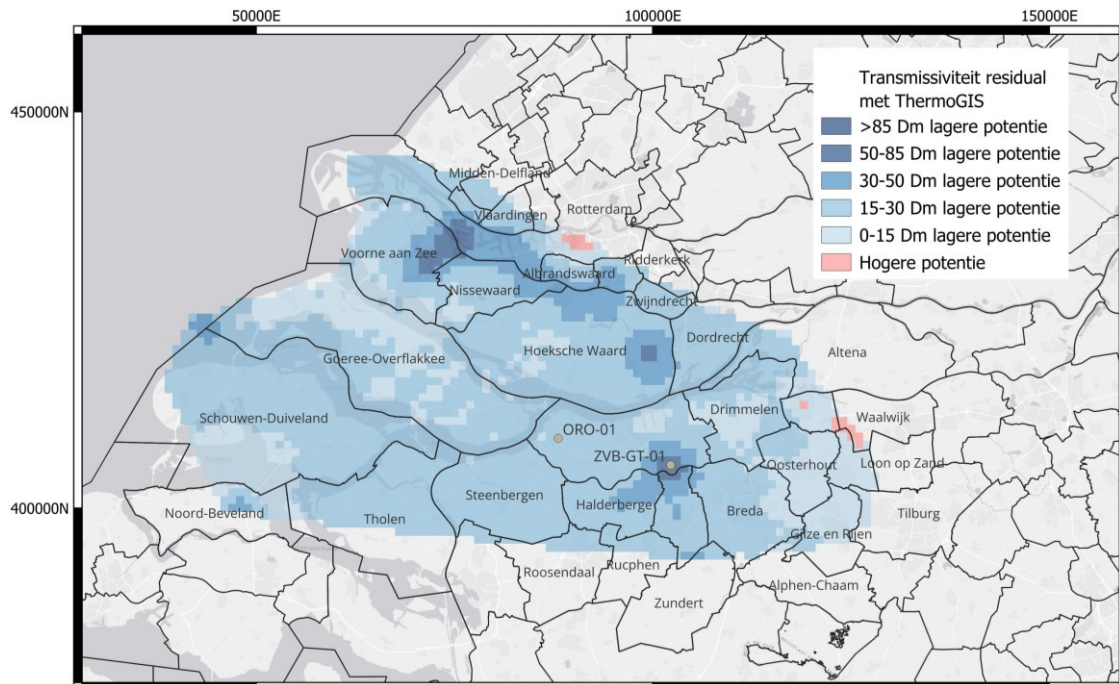
Omdat nieuwe inzichten in de gesteente eigenschappen van het Zand van Brussel Laagpakket een hogere injectiedruk onderbouwen dan bestaande normen dicteren, en omdat conservatieve aannames over de afhangdiepte van de ESP-pomp en injectietemperatuur de economisch haalbare vermogens in ThermoGIS onnodig begrenzen, beargumenteren wij dat er nog steeds op basis van de ORO-01 gegevens een verbetering in het thermisch vermogen kan worden vastgesteld ten opzichte van ThermoGIS. Vooral in het grensgebied tussen de gemeentes Nissewaard, Goeree-Overflakkee, en Hoeksche Waard lijkt het economisch haalbare vermogen >2.5 MWth hoger te zijn dan voorheen gedacht (Figuur 1.3, onder).



Figuur 1.1 Uitgelicht resultaat: Economisch haalbaar debiet (P50) Lage Temperatuur Aardwarmte in het onderzoeksgebied.



Figuur 1.2 Uitgelicht resultaat: Economisch haalbaar thermisch vermogen (P50) Lage Temperatuur Aardwarmte in het onderzoeksgebied.

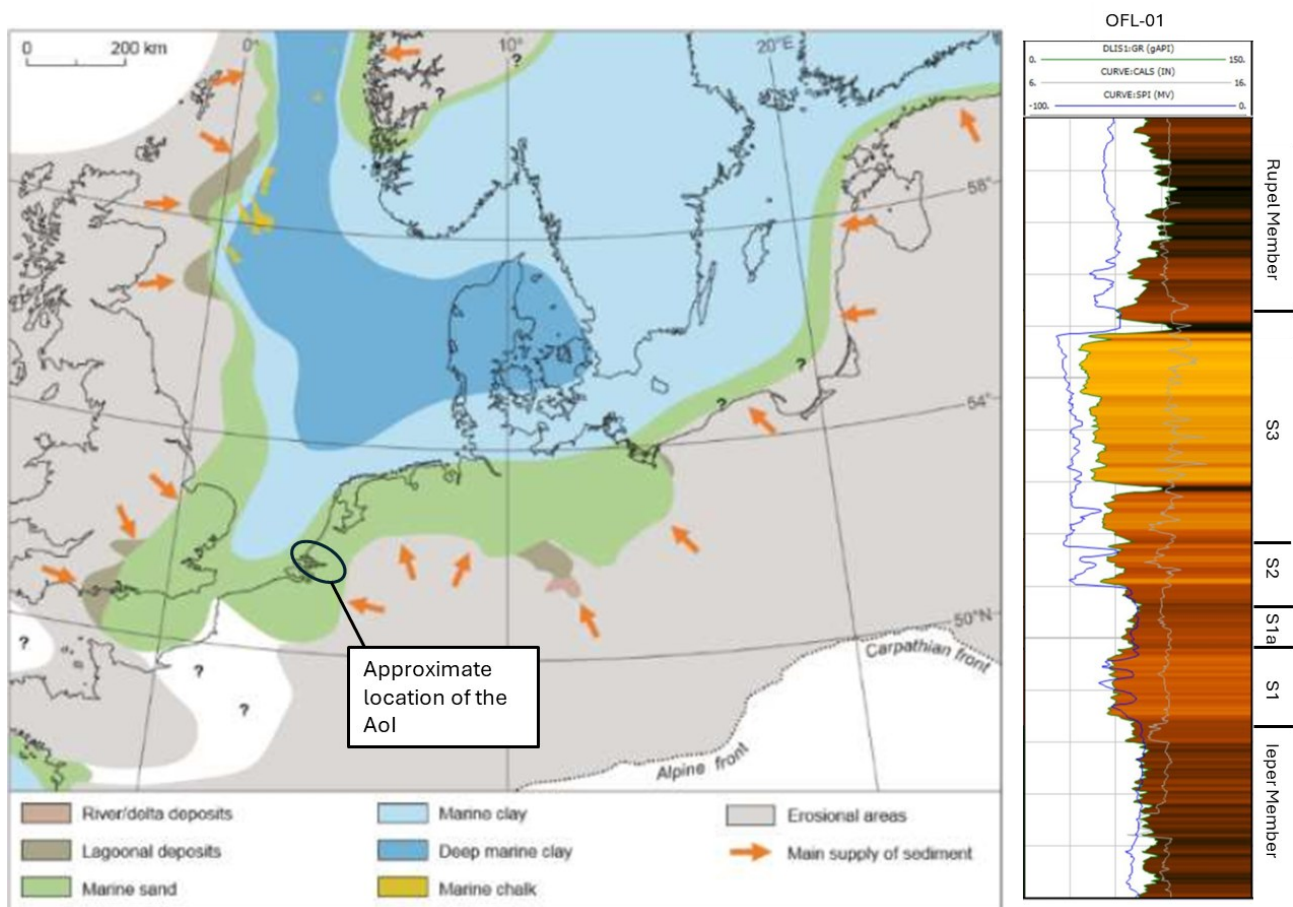


Figuur 1.3 Implicatie van deze studie voor de geothermische potentie in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog rond de ORO-01 put ten opzichte van ThermoGIS, welke op de resultaten uit WarmingUp is gebaseerd.

2. Geologische context

2.1 Tektonisch framework

Het studiegebied bevindt zich in de Voorne Trog, een zuidoost-noordwest georiënteerde syncline gelegen aan de zuidelijke flank van het West-Nederlandse Bekken (WNB), welke is ontstaan als gevolg van de Subhercynische inversie fase in het Boven-krijt (Worum & Michon, 2005). Tijdens deze inversie onderging het centrale deel van het WNB uplift, terwijl er op de zuidwestelijke en noordoostelijke flank continue verzakking plaatsvond. Op deze flanken accumuleerde als gevolg van deze verzakking een dikke Boven-krijt Krijt successie, gevolgd door jongere Cenozoïsche afzettingen.



Figuur 2.1 Paleografische reconstructie tijdens de afzetting van het Zand van Brussel Laagpakket (links), en een representatieve stratigrafische log van het Zand van Brussel Laagpakket in Nederland (rechts) (Geel & Foeken, 2021).

2.2 Paleogeografie

Tijdens het late Ypresien tot Lutetien (vroeg Midden-Eoceen) werd de sedimentatie in de zuidelijke Noordzee-regio gekenmerkt door de noordwaartse propagatie van ondiep marien tot delta zandsystemen. In de Voorne Trog vormen deze sedimenten het zandrijke Zand van Brussel Laagpakket (BZL, Figuur 2.1). Dit zandsteen laagpakket heeft een kust- tot ondiep mariene afzettingmilieu, welke naar boven toe ondieper en siliciclastischer wordt (zie *gamma-ray log* in Figuur

2.1). Paleogeografische reconstructies tonen een sedimentaanvoer overwegend vanuit het zuiden, onderschreven door de aanwezigheid van meer proximale facies in België en het zuidoosten van het Verenigd Koninkrijk, met sedimenttransport in noordelijke richting in het zuidelijke Noordzee Bekken.

De recente SCAN put Oranjeoord-01 (ORO-01), gelegen onshore in Nederland, biedt dankzij de uitgebreide put data (*i.e.*, kernen, logs, en boorgatbeelden) de mogelijkheid om het Zand van Brussel Laagpakket in significant detail te karakteriseren.

2.3 Stratigrafie

Het recente WarmingUp-project heeft een nieuw stratigrafisch model van het Zand van Brussel Laagpakket gedefinieerd met geüpdatete grenzen en nieuwe subdivisies (Figuur 2.1) (Geel & Foeken, 2021). Dit nieuwe model is gebaseerd op biostratigrafische data en een her-evaluatie van het seismische reflectie karakter. Op basis van dit nieuwe model is de ondergrens van de Zand van Brussel Laagpakket S1 laag voor deze huidige studie bepaald, welke de basis vormt van de eerste zandsteenlaag gelegen bovenop de het Laagpakket van leper die zich stratigrafisch direct onder het Zand van Brussel Laagpakket bevindt. Deze overgang wordt gekenmerkt door een afname van gamma-ray (GR) waarden. De top van het Zand van Brussel Laagpakket is complexer te bepalen enkel aan de hand van de gamma-ray data. Hoewel een toename van gamma-ray de bovengrens van het Zand van Brussel Laagpakket aangeeft gaat deze lokaal gepaard met de aanwezigheid van glauconiet/muscoviet, welke een vals klei-sigitaal in de gamma-ray geeft. Hierdoor is het beter om de top van het Zand van Brussel Laagpakket te bepalen op basis van zowel de gamma-ray én sonic-log welke gekenmerkt worden door het einde van een piekerig patroon.

Intern is het Zand van Brussel Laagpakket onderverdeeld in vier afzonderlijke eenheden van basis tot top: S1, S1a, S2, en S3. Het gamma-ray patroon in de putten toont een “cleaning-up” sequentie, welke waarschijnlijk is ontstaan door externe veranderingen (zoals [eustatische] zeespiegeldaling). Echter kan het gamma-ray signaal niet als enige indicator voor het bepalen van de onderlinge grenzen worden gebruikt door de aanwezigheid van de glauconiet welke lokaal voor pieken in gamma-ray zorgt die niet een toename van klei aangeven.

3. Overzicht van beschikbare en gebruikte data

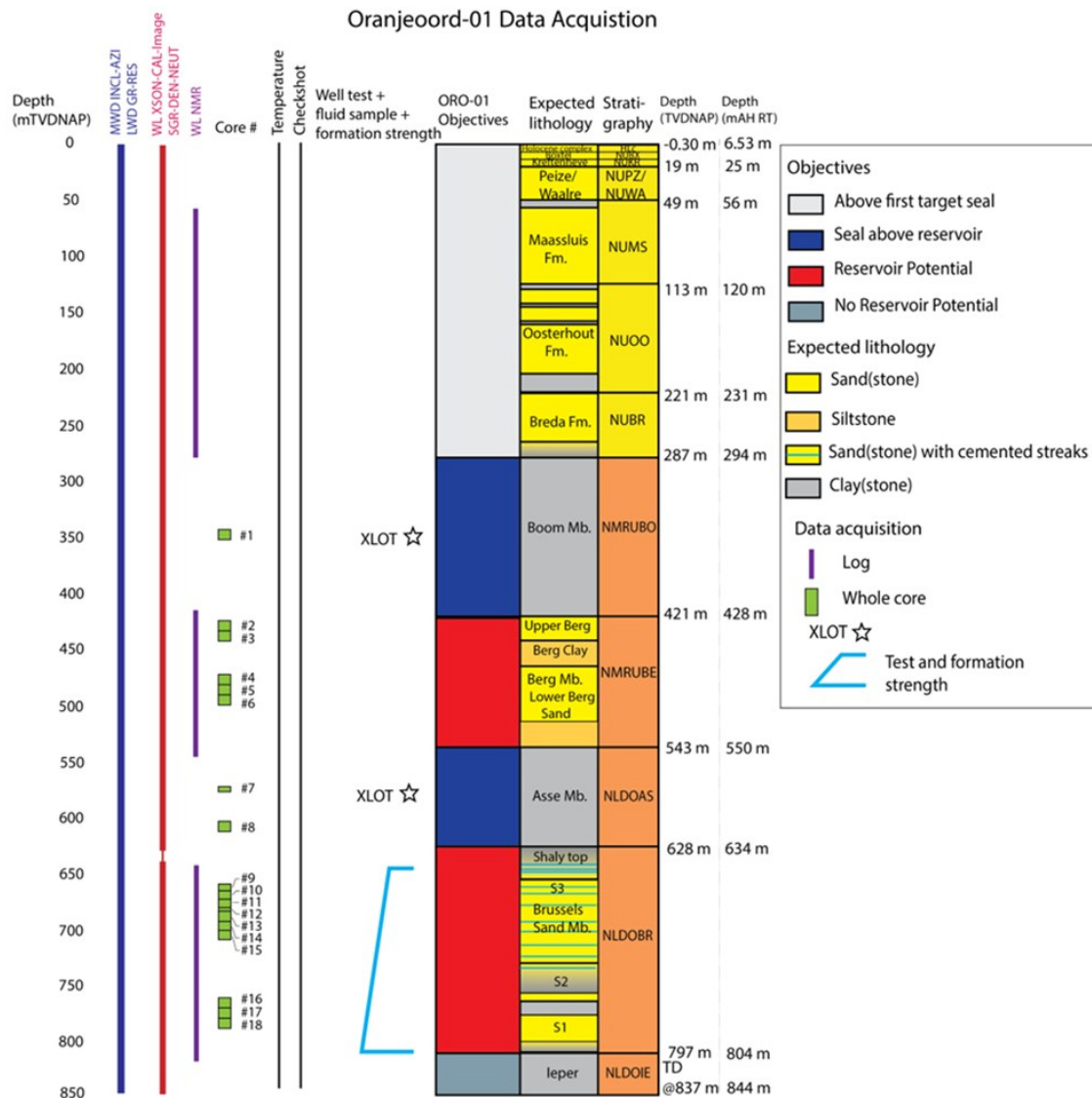
3.1 Oranjeoord-01

De Oranjeoord-01 (ORO-01) put is geboord in 2024 als onderdeel van het SCAN project voor het verkrijgen van additionele ondergronddata in een gebied waar voorheen gedetailleerde put data van het Zand van Brussel Laagpakket ontbrak. Alhoewel meerdere putten het Zand van Brussel Laagpakket penetreren, werd dit interval meestal niet gesampled omdat deze oudere putten zich richtten op het karakteriseren van diepere aardlagen. Als gevolg van het uitgebreide data acquisitie programma van de ORO-01 boring levert deze put zeer waardevolle nieuwe ondergrond informatie op (Figuur 3.1). Dit omvat een uitgebreide log-suite verkregen tijdens beide *Logging-while-drilling* (LWD) en *wireline* operaties, waaronder *gamma-ray* (GR), resistiviteit (RES), *sonic (compressional en shear)* (DT), dichtheid, neutron, en *photoelectric* metingen. Daarnaast zijn er boorgatbeeldlogs met dip interpretatie, kern-gekalibreerde NMR data in de 8.5" sectie, samengestelde LAS-bestanden, checkshot gegevens en rapporten, en temperatuurlogs beschikbaar.

De dataset op basis van de kernmonsters is ook zeer uitgebreid en omvat hele-kern screening studies (*CoreDNA*) welke bestaan uit hoge-resolutie foto's, XRF-metingen, laser scans, UCS-sterkte testen, en *probe* permeabiliteit metingen. Standaard kern-analyse resultaten (helium porositeit en zowel *Air-* als *Klinkenberg*-gecorrigeerde horizontale en verticale permeabiliteit) zijn beschikbaar inclusief geomechanische testresultaten voor zowel de afdekkende lagen als reservoir intervallen, en metingen van de thermische eigenschappen. Speciale kern analyse datasets omvatten tevens HPMI, NMR T2, *fluid-rock* interactie test resultaten, XRD mineralogie analyse, en metingen van *stressed* porositeit en brijn permeabiliteit. Daarnaast is additionele sedimentologische en granulometrische data beschikbaar door *laser particle size* analyse voor beide het Zand van Brussel Laagpakket en de jongere, ondieper gelegen Laagpakket van Berg, inclusief hele-kern beelden.

Daarnaast zijn er geologische en petrofysische datasets beschikbaar, en uitgebreide puttestdata bestaande uit productie, injectie, en *Extended Leak-off Test* (XLOT) operaties in de Oranjeoord-01 put. Oppervlakte data van beide productie- en injectietests zijn beschikbaar, gepaard met de data van diepe metingen in de put welke gedetailleerde druk en temperatuur gegevens van tijdens de tests weergeven. De twee uitgevoerde XLOTs waren gericht op het Laagpakket van Asse (XLOT-1), en het Laagpakket van Boom (XLOT-2), welke zich respectievelijk bevinden boven op het Zand van Brussel Laagpakket en het Laagpakket van Berg. Voor beide testen zijn zowel oppervlakte datasets en de diepe put meeting data beschikbaar, welke een gedetailleerde evaluatie van het formatiedrukgedrag en breukgradiënt mogelijk maakt.

Ook is vloeistofeigenschapdata verkregen tijdens de puttesten, inclusief formatievloeistof en microbiologische analyses met de bijhorende laboratoriumrapporten. Daarnaast bieden *production logging tool* (PLT) data aanvullende inzichten aan de stroombijdrage en verticale prestaties van het reservoir. Ondersteunende operationele datasets omvatten uitgebreide *mudlog* data bestaande uit boorparameters, druk- en gasmonitor data, formatie evaluatie logs, calcimetrie metingen, en gedetailleerde tijd-logs. Finale rapporten zijn ook beschikbaar inclusief de SodM *End-of-Well Reports* (EOWR) en final well tops.



Figur 3.1 Data acquisitie plan van de Oranjeoord-01 put (Brussée, 2025).

3.2 Offset putten

Op basis van de laterale distributie en de beschikbaarheid van geschikte put data is een selectie gemaakt van de offset putten (*i.e.*, de putten gelegen nabij ORO-01). De meeste offset putten in de Voorne Trog penetreren het Zand van Brussel Laagpakket, echter is dit interval en de meeste gevallen slecht of helemaal niet gelogd omdat deze putten zich voornamelijk richten op de dieper gelegen aardlagen.

In totaal gebruiken we 26 putten voor stratigrafische correlatie en bepaling van well tops in het projectgebied (Tabel 3.1). Dit vormt de basis voor het structurele en stratigrafische framework. Van deze putten bevatten er elf voldoende uitgebreide petrofysische log data (waaronder één of meer *density*, *neutron*, *sonic* en *resistivity* logs) voor kwantitatieve *Computer Processed Interpretation* (CPI), welke wij hierom gebruiken voor de gedetailleerde petrofysische evaluatie van het Zand van Brussel Laagpakket (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Dataoverzicht van de gebruikte offset putten

Put naam	Beschikbare log data					Gebruik voor deze studie:
	GR	Vshale (GR/RES/SP)	NPHI	RHOB	DT	
BHG-01	✓	RES	✓	✓	✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
BRT-01	✓	GR		✓	✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
BRTZ-01	✓				✓	Stratigrafie
BTL-01	✓	GR			✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
DON-01						Stratigrafie
GAG-01	✓				✓	Stratigrafie
HBV-01	✓	GR			✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
HEI-01	✓				✓	Stratigrafie
HVS-01	✓	SP			✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
KTG-01	✓	GR			✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
MSV-01	✓					Stratigrafie
OBL-01	✓				✓	Stratigrafie
OBLZ-01	✓				✓	Stratigrafie
ORO-01	✓	GR; RES	✓ (porositeit)	✓ (porositeit)	✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
OVE-01					✓	Stratigrafie
PRW-01	✓	GR		✓ (porositeit)	✓	CPI, Stratigrafie
RDK-01	✓	RES	✓	✓ (porositeit)	✓	CPI, Stratigrafie
RSB-01	✓	GR			✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
RZB-01	✓	GR		✓	✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
STB-01						Stratigrafie
STH-01	✓	GR		✓	✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
STR-01	✓	SP			✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie
STW-01	✓	GR		✓ (porositeit)		CPI, Stratigrafie

WAP-01					Stratigrafie
WED-01	✓			✓	Stratigrafie
ZVB-GT-01	✓	GR	✓	✓ (porositeit)	CPI, Stratigrafie

3.3 Seismische reflectie data en interpretaties

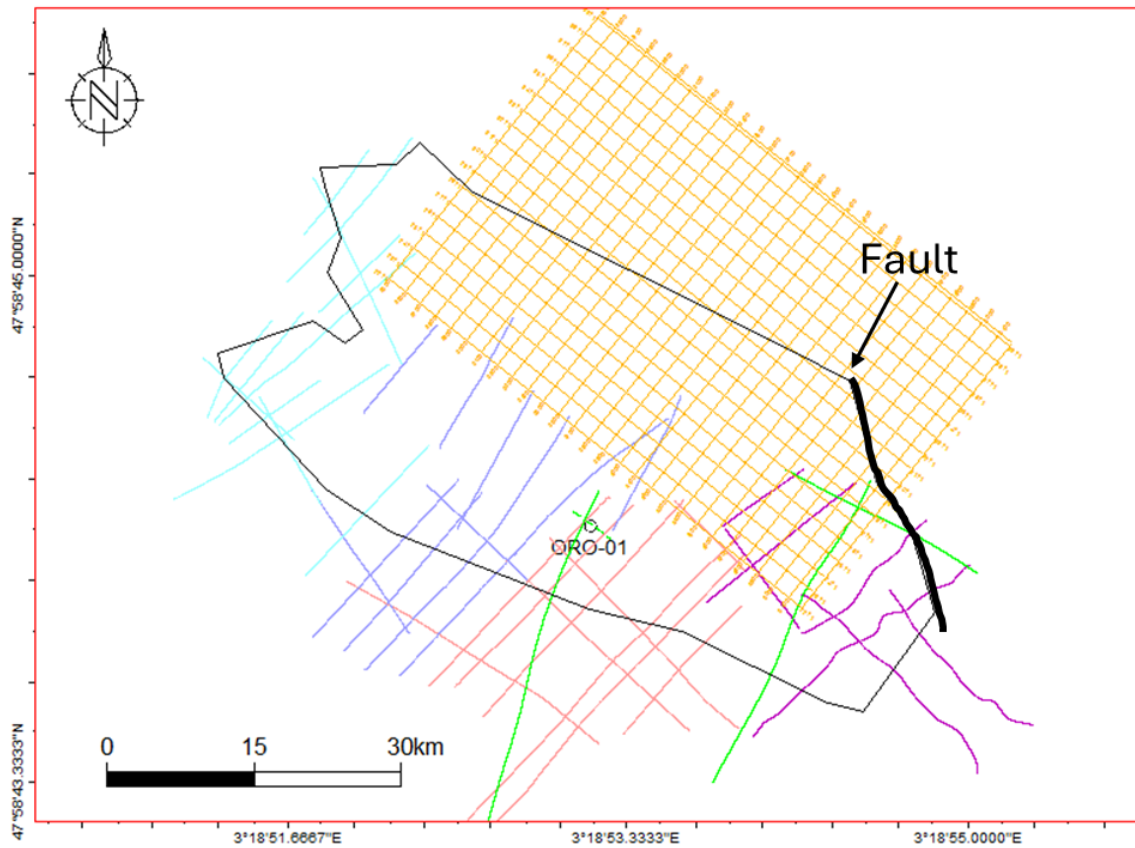
De ondergrond van het projectgebied is grotendeels gedekt door 2D seismische reflectie datasets, welke variëren in acquisitiejaar en -parameters, en ook in kwaliteit. Deze dataset is grotendeels aangeleverd door EBN. Na een uitvoerige inspectie hebben we in totaal 43 2D seismische reflectie lijnen uit vijf verschillende seismische datasets geselecteerd voor deze studie (Tabel 3.2) (Figuur 3.2).

Tabel 3.2 Beschikbare 2D seismische reflectie datasets.

Seismische survey	Domein	Gebruikte seismische conventie	Aantal gebruikte lijnen voor deze studie
L2EBN2021-2023	TWT	European reversed	4
L2NAM1984B	TWT	European reversed	10
L2PET1984B	TWT	European reversed	7
L2NAM1986A	TWT	European reversed	11
L2NAM1985D	TWT	European reversed	11

Naast deze 2D seismische reflectie data maken we tevens gebruik van een 3D seismische reflectie dataset (L3NAM2012AR), welke het noordelijke gedeelte van de Voorne Trog bedekt (Figuur 3.2). Deze dataset wordt gebruikt voor het verfijnen van de structurele interpretatie en het verbeteren van de continuïteit van de horizons in dit gebied. Alle seismische data zijn weergegeven en geïnterpreteerd in het tijdsdomein (TWT).

Na inspectie van alle seismische reflectie data achten wij deze geschikt voor het in kaart brengen en karakteriseren van het ondergrondse Zand van Brussel Laagpakket in het gehele onderzoeksgebied. Dit wordt ook vergemakkelijkt door de relatief eenvoudige structurele karakter van het onderzoeksgebied en de relatief beperkte diepte van het Zand van Brussel Laagpakket in deze regio. Slechts één breuk welke het Zand van Brussel Laagpakket doorbreekt is geïnterpreteerd in het oostelijke deel van het onderzoeksgebied: hierbij geven de aanwezigheid van 3D seismische reflectie data en de nieuwe verkregen SCAN-lijnen voldoende resolutie voor een passende kartering van dit structurele element (Figuur 3.2).



Figuur 3.2 Overzicht van de seismische gegevens die zijn gebruikt voor het in kaart brengen van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog: L2EBN2021-2023 (groen), L2NAM1984B (koraalrood), L2PET1984B (paars), L2NAM1986A (mauve), L2NAM1985D (cyaan). Het 3D-seismisch onderzoek (L3NAM2012AR) wordt weergegeven door het oranje grid. De omtrek van de Voorne-doorgang wordt aangegeven door een zwarte stippellijn.

EBN heeft tevens drie onafhankelijke sets van reeds bestaande horizoninterpretaties gedeeld (Tabel 3.3). Op basis van onze QA/QC van deze interpretaties gebruiken we enkel “*Interpreted_Horizons_ORO01*” voor onze studie aangezien dit de enige interpretatie is waarin rekening gehouden is met de nieuwe put data van ORO-01. We gebruiken de andere datasets grotendeels als proxy's, aangezien deze in de Voorne Trog over het algemeen geschikt zijn.

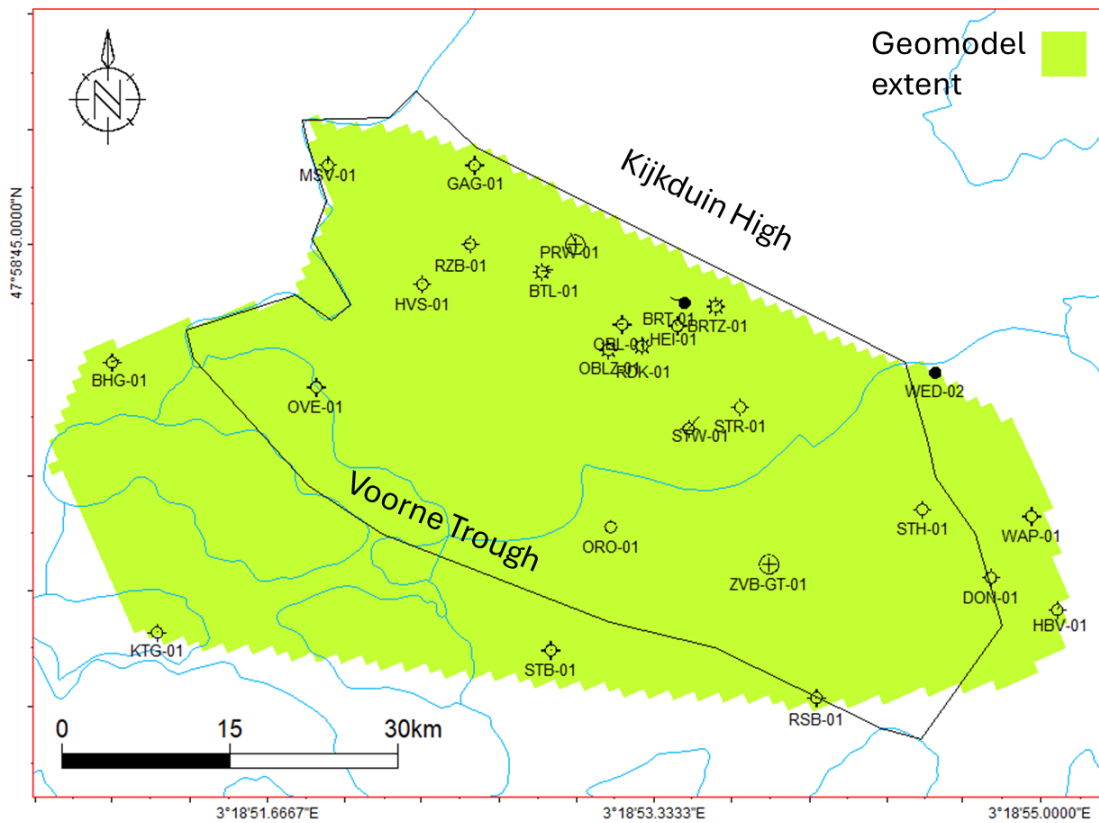
Tabel 3.3 Beschikbare seismische interpretaties voor de top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket.

Naam	Dekking	Domein	Interpretatie	Chronologie
Interpreted_Horizons_ORO01	Uitsluitend rondom ORO-01	TWT en Diepte	EBN	Post ORO-01
QC Horizons_LargerAol2022	Grootste deel van het Aol	TWT en diepte	EBN	Pre ORO-01
Warming_UP	Volledige Aol	Diepte	TNO	Pre ORO-01

3.4 Definitie onderzoeksgebied

Het definitieve onderzoeksgebied van deze studie is bepaald op basis van de laterale distributie van de beschikbare ondergrond data en de geologische structuur van de ondergrond gedemarqueerd door de Voorne Trog (Figuur 3.3). Voor de karakterisering van het Zand van Brussel Laagpakket vormt de structurele grens van de Voorne Trog het primaire aandachtsgebied. Hierbij nemen wij het breukblok direct ten oosten van de Voorne Trog ook mee, welke tevens is opgenomen in het geomodel. Het Zand van Brussel Laagpakket is aanwezig in dit breukblok, waar tevens kernmonsters van beschikbaar zijn in enkele van de putten binnen dit blok (e.g., WAP-01 en DON-01) (Figuur 3.3).

Binnen het onderzoeksgebied is de distributie van putten variabel, met aanzienlijk hogere putdichtheid in het noordelijk ten opzichte van het zuidelijke deel. Om de invloed van deze disbalans te beperken nemen we ook enkele putten buiten de Voorne Trog mee in onze studie (e.g., BHG-01 en KTG-01) (Figuur 3.3). Hoewel deze putten dus buiten de Voorne Trog vallen, bieden ze waardevolle informatie bij de bepaling van de laterale continuïteit, de pakketdiktedistributie, en de variabiliteit van de verticale eigenschappen van het Zand van Brussel Laagpakket. Het gebruik van deze putten verbetert hierdoor de robuustheid van de regionale correlatie en vermindert ook de onzekerheid in het zuidelijke deel van de Voorne Trog waar de putdistributie relatief beperkt is.



Figuur 3.3 Het onderzoeksgebied is afgebakend door de Voorne Trog, aangegeven door een ononderbroken zwarte lijn. De omvang van het geomodel wordt weergegeven door de groene polygon.

4. Oranjeoord-01

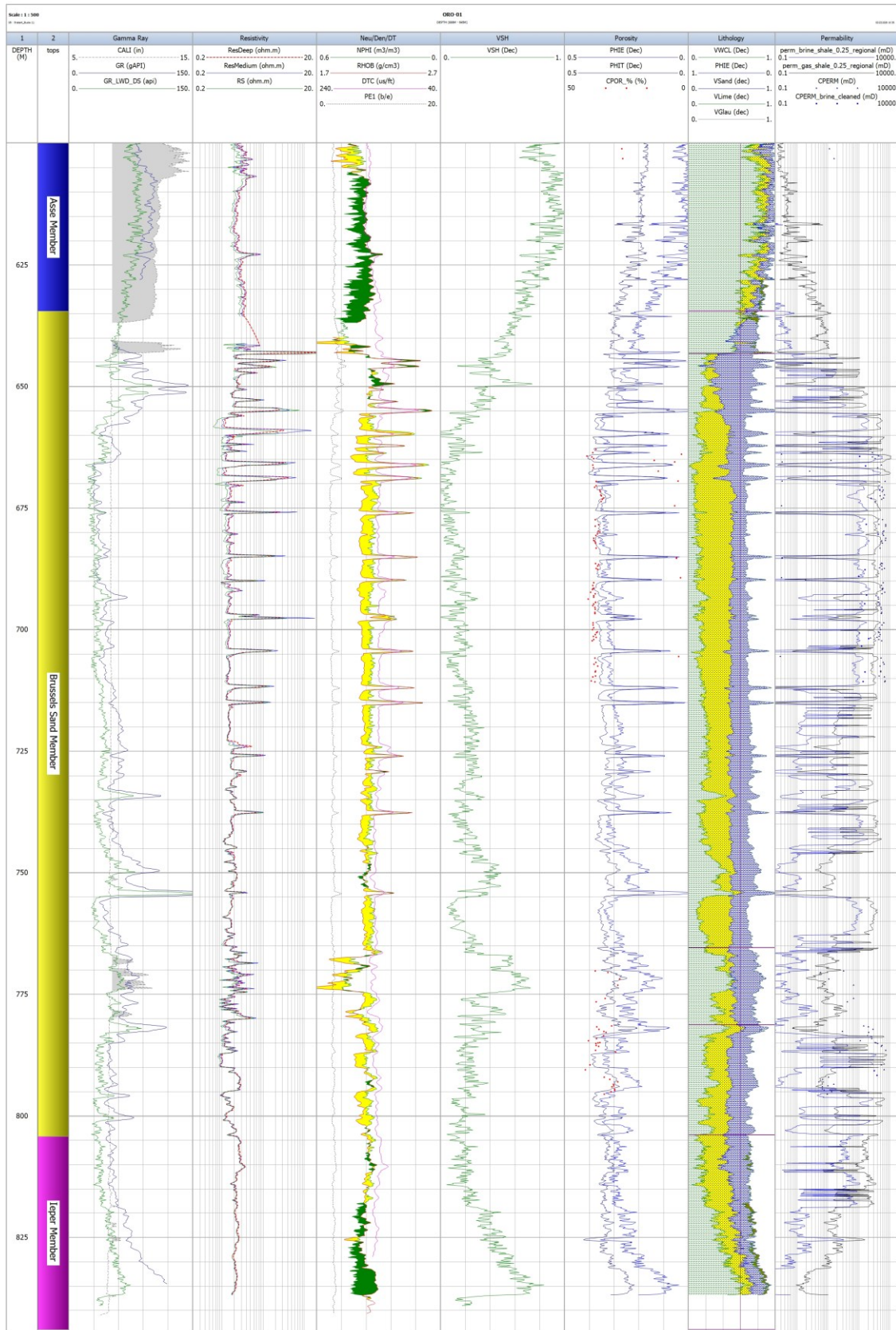
4.1 Computer Processed Interpretation (CPI)

Dit hoofdstuk beschrijft onze petrofysische interpretatie van de ORO-01 boorgatmetingen met kwantitatieve analyse van de eigenschappen van het Zand van Brussel Laagpakket reservoir en formatiewater (Figuur 4.1 en Figuur 4.2). De CPI (*Computer Processed Interpretation*) vormt de basis van de analyses, waarvan de achterliggende methodes en keuzes nader worden toegelicht in desbetreffende secties.

Het Zand van Brussel Laagpakket wordt in ORO-01 gekenmerkt door overwegend lage GR- en RES-waardes met positieve *Density-Neutron (NeuDen)* scheiding, duidend op een vrij massief zandig karakter. De basis van het laagpakket is algeheel het meest klei-rijk met ~10 m dikke klei-rijke intervallen rond 770 en 750 m MD gevolgd door opwaarts verschonende trends, ook geobserveerd in de cuttings (Figuur 4.2). Met het meer zandige karakter zijn pieken van toenemende DT-, RES-, en RHOB-waarden en afname van Neutron-waarden, wijzend op gecementeerde banken, geassocieerd, welke opwaarts toenemen in frequentie. Het bovenste deel van het Zand van Brussel Laagpakket (~655–645 m MD) wordt gekenmerkt door een meer dicht (*tight*) karakter van toenemende RES- en DT-waarden met afnemende *NeuDen* scheiding. Deze wordt deels veroorzaakt door toename in klei-gehalte en deels door hogere cementatiegraad. Op basis van cuttings en kernmonsters stellen we dat het cement overwegend uit carbonaat bestaat.

Well: ORO-01															SCAN		
<p>SANDSTONE: greenish grey to greyish green, very fine Quartz grains, moderately to well sorted, sub angular to sub rounded, sub spherical, colorless, transparent, translucent, partly argillaceous, no to poor visual porosity, occasional Mica, trace Glauconite grains, trace Pyrite, slightly calcareous, grading to SILTSTONE.</p> <p>SAND/SANDSTONE: greenish grey, very fine Quartz grains, moderately to well sorted, sub angular to sub rounded, sub spherical, colorless, transparent, translucent, locally argillaceous, good inferred porosity, common Glauconite grains, occasional Mica, trace Pyrite, slightly calcareous, partly as loose Quartz grains.</p> <p>SANDSTONE: greenish grey, very fine Quartz grains, well sorted, sub angular to sub rounded, sub spherical, colorless, transparent, translucent, firm to moderately hard, sub blocky, poor visual porosity, slightly argillaceous, common Glauconite grains, occasional Mica, occasionally grading to SILTSTONE.</p> <p>SILTSTONE: light greenish grey, firm to moderately hard, non to slightly calcareous, occasional Glauconite, Mica, trace Pyrite, trace carbonaceous, locally grading to very fine SANDSTONE.</p> <p>CLAYSTONE: light to medium greenish grey, soft to firm, silty, partly sandy (very fine grains), slightly to moderately calcareous.</p>																	
Depth	Cuttings					Grain Size					HC Shows				Remarks		
	m	%	%	%	%	VF	F	M	C	VC	P	Stain	Nat F	Cut F		Ring	
760			10	60	30		X									CLAYSTONE and SILTSTONE become non to slightly calcareous	
770			20	50	30		X										
771			10	30	70		X									Bottoms up: coring point confirmed in lower Brussel Sand Mb	
772			Tr.	20	80		X									Cuttings while coring	
773					100											Cuttings while coring	
774					100											Cuttings while coring	
775					100											Cuttings while coring	
776					100											Cuttings while coring	
777	10			10	80		X									Cuttings while coring	
778	20			10	70		X									Cuttings while coring	
779	10			30	60		X									Cuttings while coring	
780	10			20	70		X									Cuttings while coring	
781	tr			10	90		X									Cuttings while coring	
782	10			30	60		X									Cuttings while coring	
783	20			40	40		X									Cuttings while coring	
784	30			30	40		X									Cuttings while coring	
785	60			20	20		X									Cuttings while coring. SANDSTONE: predominantly greyish green, slightly calcareous.	
786	60			20	20		X									Cuttings while coring	
787	70			10	20		X									Cuttings while coring	
788	80			10	10		X									Cuttings while coring	
789	60			20	20		X									Cuttings while coring	
790	20			20	60		X									Cuttings while coring	
791	10			10	80		X									Cuttings while coring. SANDSTONE: predominantly greenish grey	
792		80		10	10		X									Cuttings while coring. SANDSTONE: predominantly greenish grey	
793		90		10	Tr.		X									Cuttings while coring	
794		70		10	20		X									Cuttings while coring	

Figuur 4.1 Subset van de cuttings data van ORO-01.



Figuur 4.2 CPI van de ORO-01 boorgatmetingen.

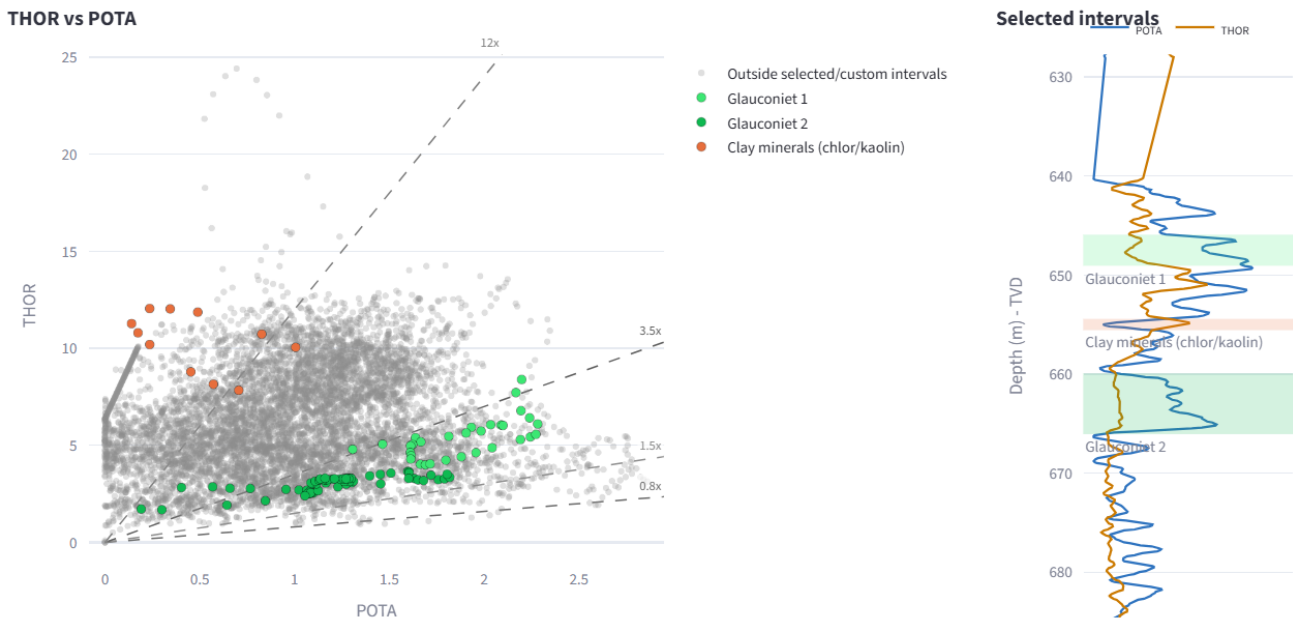
4.2 Kenmerken en correlatie van boorgatmetingen

In deze studie wordt de stratigrafische correlatie van het WarmingUp project gevolgd (Geel & Foeken, 2021). Deze correlatie is grotendeels gedefinieerd op basis van het *gamma ray* (GR) en *sonic* (DT) karakter van de verschillende intervallen. De kenmerken van de ORO-01 boorgatmetingen rond het Zand van Brussel Laagpakket zijn goed te vergelijken met regionaal geobserveerde kenmerken uit de WarmingUp kartering. De exacte plaatsing van reservoirintervalgrenzen hebben wij verder aangescherpt op basis van relevante beschikbare boorgatmetingen, zoals de *NeuDen*, *Resistivity*, *etc.*

Typisch is het Zand van Brussel Laagpakket interval gekenmerkt door drie opwaarts verschonende opeenvolgingen (*cleaning-up sequences*) in het GR-sigitaal: S1, S2, en S3 (Figuur 4.2). De basis van het Zand van Brussel Laagpakket op de overgang van het onderliggende Laagpakket van Ieper is geplaatst daar waar het GR-, *NeuDen*- en *Resistivity*-sigitaal een duidelijke verzanding aangeven, rond 804 m MD (Tabel 4.1). De top van het Zand van Brussel Laagpakket op de overgang naar het bovenliggende Laagpakket van Asse is geplaatst rond 634 m MD, waar het *NeuDen*-sigitaal duidelijk een schalie-scheiding laat zien, de GR toeneemt, en het sonic-profiel afneemt en de karakteristieke pieken verliest (Tabel 4.1). De identificatie van de reservoir top op basis van GR wordt echter bemoeilijkt door verstoorde log-signalen rond de *casing shoe* (642 m MD), en de aanwezigheid van een glauconiet-interval nabij de top van het Zand van Brussel Laagpakket. Om een GR-log te verkrijgen die niet verstoord is door de casing-overgang, zijn de *Logging-While-Drilling* (LWD) logs geharmoniseerd en voor verdere analyse toegepast (Tabel 4.1).

4.2.1 Glauconietzone

Nabij de top van het Zand van Brussel Laagpakket is een interval geïdentificeerd tussen ca. 646 - 658 m MD waar de gangbare lithologie-indicaties van de verschillende log-signalen niet in overeenstemming zijn. Het GR-sigitaal is hier verhoogd wat normaal gesproken een toename in kleigehalte aangeeft. Echter weerspiegelt het resistiviteitsprofiel geen afname, en ook het *NeuDen* profiel geeft geen indicatie voor een sterke toename in kleigehalte. De *bulk* dichtheden (RHOB) in dit interval zijn licht verhoogd, terwijl het *NeutronPorosity* sigitaal onverstoord is rond dit interval. De *Spectral GR* geeft complexe verhoudingen en verhoogde concentraties kalium en thorium aan in dit interval (Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Cross-plot van kalium (POTA) en thorium (THOR) in het verhoogde GR interval nabij top van het Zand van Brussel

Deze aanwijzingen duiden op verhoogde concentraties (verweerde) glauconiet en mica's in dit interval, wat middels verhoogde kalium en thorium concentraties het GR-signaal verstoort, en met een hogere korrel dichtheid het RHOB signaal verhoogd, terwijl dit geen invloed heeft op resistiviteit en porositeit. Ook wordt in het geologisch rapport van de ORO-01 boring en cutting-descriptions in het boorrappport voor dit interval "abundant glauconite" rond 650 m mD aangegeven. Op basis van deze indicaties interpreteren wij in dit interval een glauconietzone in plaats van een klei-rijk interval, wat leidt tot lagere kleivolume (*Vshale*) en hogere porositeit- en permeabiliteitsinschatting in dit interval ten opzichte van vorige studies. Dit interval is geïnterpoleerd met behulp van de resistiviteitslog om een gecorrigeerde, meer waarheidsgetrouwe benadering van het kleivolume te verkrijgen.

Tabel 4.1 Uitgangspunten voor het bepalen van de well tops in de petrofysische logs.

Interval	Boorgatmeting karakter	Basis	Correlatie uitdagingen
Laagpakket van Asse	GR: hoge waarden, vaak opwaarts toenemend signaal nabij de basis	Significante gelijktijdige toename GR en afname DT	Plaatsing basis uitdagend bij gebrek GR of DT, vaak afwijking tussen GR en DT signaalverandering, soms gelijkmatige overgang
	DT: gemiddeld tot lage waardes, variabelers dan leper, geen snelle pieken		

Zand van Brussel Laagpakket	S3	GR: opwaarts verschonend, met vaak een piek-interval nabij de top en soms dunnere pieken aan de basis, waarschijnlijk veroorzaakt door glauconiet en mica's DT: relatief veel snelle pieken, te wijden aan kalk-gecementeerde lagen	Basis derde opwaarts verschonende pakket, toename snelle DT pieken	Soms meerdere interne opwaarts-verschonende opeenvolgingen, wat plaatsing basis bemoeilijkt GR-pieken door glauconiet/mica kunnen onterecht als klei-intervallen gezien worden
	S2	GR: opwaarts verschonend DT: enkele snelle pieken	Basis tweede opwaarts verschonende pakket	Variabel karakter, soms geen eenduidig opwaarts verschonend signaal
	S1(a)	GR: opwaarts verschonend, met een kleirijkere zone richting bovenkant DT: enkele snelle pieken	Eerste zandsteen boven kleirijk interval van het leper Laagpakket, eerste voorkomen snelle DT pieken	Soms gelijkmatige overgang van leper aan basis, wat plaatsing eerste zandsteen bemoeilijkt
Laagpakket van leper		GR: over het algemeen hoge waardes, inzet opwaarts verschonende trend richting top DT: gemiddeld tot lage waardes, geen snelle pieken	Niet gekarteerd	

4.3 Kleivolume (V_{shale})

Het kleivolume is bepaald als een gemiddelde van het kleivolume op basis van $NeuDen$ en het kleivolume op basis van GR- of *Resistivity*-logs (Figuur 4.2). In het algemeen is voor het Zand van Brussel Laagpakket het kleivolume op basis van GR representatief, met uitzondering van het glauconiet-interval waar gekozen is voor *Resistivity* aangezien dit niet gevoelig is voor mineralogie:

$$V_{shale;GR} = \frac{GR_{log} - GR_{sand}}{GR_{shale} - GR_{sand}} \quad V_{shale;RES} = \frac{RES_{log} - RES_{sand}}{RES_{shale} - RES_{sand}} \quad V_{shale;NeuDen} = \frac{(\varphi_{Neu} - \varphi_{Den})_{log}}{(\varphi_{Neu} - \varphi_{Den})_{shale}}$$

Table 4.2 Vshale en porositeit berekening methode en parameters.

Interval	GR shale / sand	RES sand / shale	Shale Neu / Den	Vshale method (linear)	Porositeit methode
Glaucaniet zone	NA	0.7 / 20	0.4 / 2.2	gemiddelde RES- Neutron/Density	Neutron/Density variable grain density (2.6–2.85 g/cc)
Zand van Brussel Laagpakket	24 / 88	NA	0.4 / 2.2	gemiddelde. GR- Neutron/Density	Neutron/Density variable grain density (2.6–2.85 g/cc)
Bad hole (excess caliper)	24 / 88	NA	0.4 / 2.2	gemiddelde. GR- Neutron/Density	Sonic

4.4 Porositeit

De totale porositeit (PHIT) wordt berekend op basis van *NeuDen* door middel van een iteratief model met variabele korreldichtheden variërend tussen 2.6–2.85 g/cc. Deze korreldichtheden zijn bepaald op basis van een *NeuDen* crossplot, welke een hogere dichtheid aangeeft dan op basis van kernmetingen (2.6–2.72 g/cc, gemiddeld 2.65 g/cc). Voor intervallen met uitslaande caliper-metingen (*bad hole*) wordt de porositeit berekend op basis van de sonic-log, aangezien deze minder gevoelig is voor afwijkende boorgatdiameters:

$$\varphi_{T;son} = \frac{1}{C_p} \times \frac{DT - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}}$$

De totale porositeit (PHIT) geldt als invoer voor de *PoroPerm-transform*. Voor de bepaling van effectieve porositeit (PHIE) wordt een multiplicatieve correctie voor kleigehalte (*Vshale*) toegepast volgens:

$$\varphi_{E;den} = \varphi_{T;den} \times (1 - V_{sh}) \text{ en } \varphi_{E;son} = \varphi_{T;son} - \frac{1}{C_p} \times V_{sh} \times \frac{DT_{sh} - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}}$$

4.5 Permeabiliteit

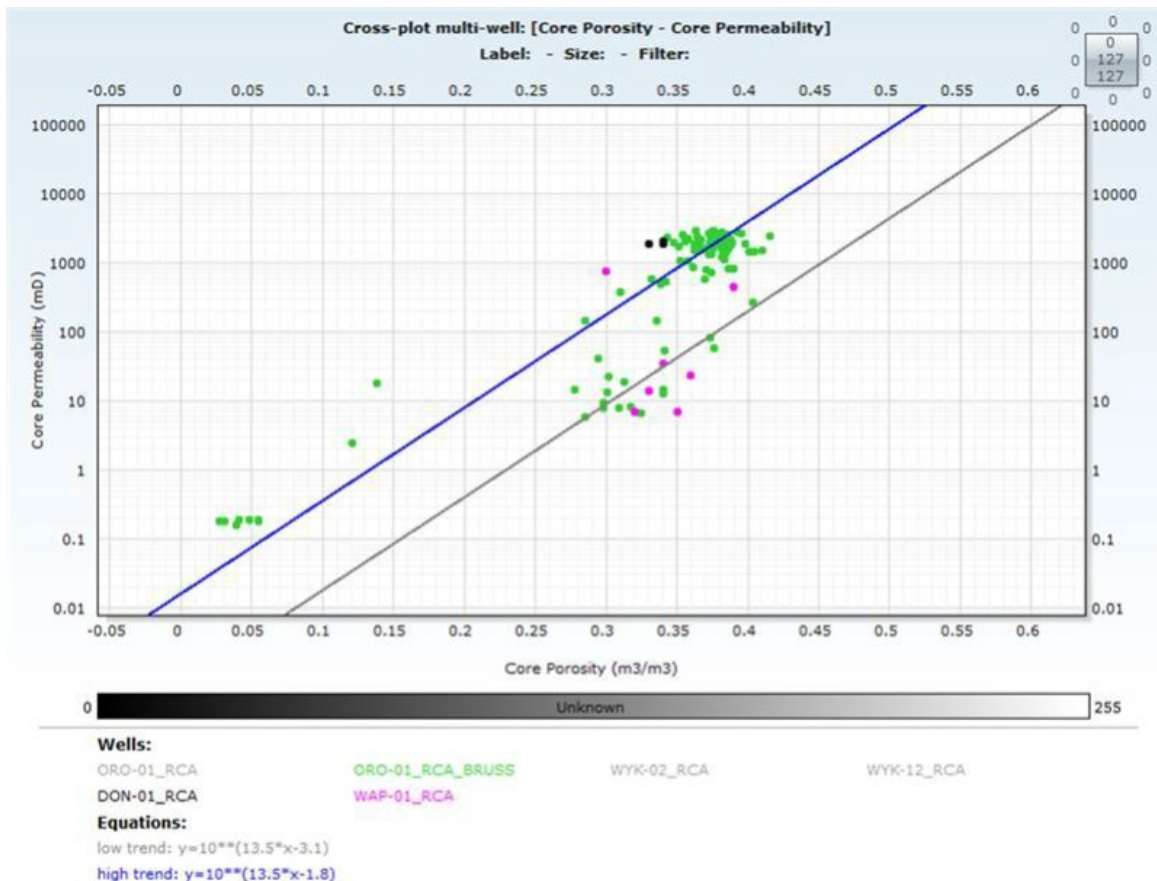
4.5.1 Kernplugmetingen

Voor een robuuste regionale porositeit-permeabiliteit ("*poroperm*") relatie zijn 112 kernplugmetingen van de *Routine Core Analysis* (RCA) van ORO-01 in het Zand van Brussel Laagpakket gebruikt, aangevuld met kernplugmetingen van relevante omliggende boringen DON-01 en WAP-01 (Figuur 4.4). De WYK-01 en WYK-12 putten, gelegen in Noord-Holland, zijn buiten beschouwing gelaten vanwege grote faciesverschillen. Uit de porositeit-permeabiliteit (*poroperm*) cross-plot van deze kernplugmetingen blijkt dat de populatie het beste te benaderen is met twee verschillende relaties; (i)

een hogere trendlijn overwegend overeenkomend met kernplugmetingen met laag kleigehalte in S3 en (ii) een lagere trendlijn overwegend overeenkomend met kernplugmetingen met een hoger kleigehalte uit S1 (Figuur 4.4). Hier kiezen wij dus voor een tweeledige *poroperm* conversie met een splitsing op basis van kleivolume (V_{shale}) op 25%:

$$V_{shale} < 25\%: Perm = 10^{13.5 \cdot Poro - 1.8}$$

$$V_{shale} > 25\%: Perm = 10^{13.5 \cdot Poro - 3.1}$$



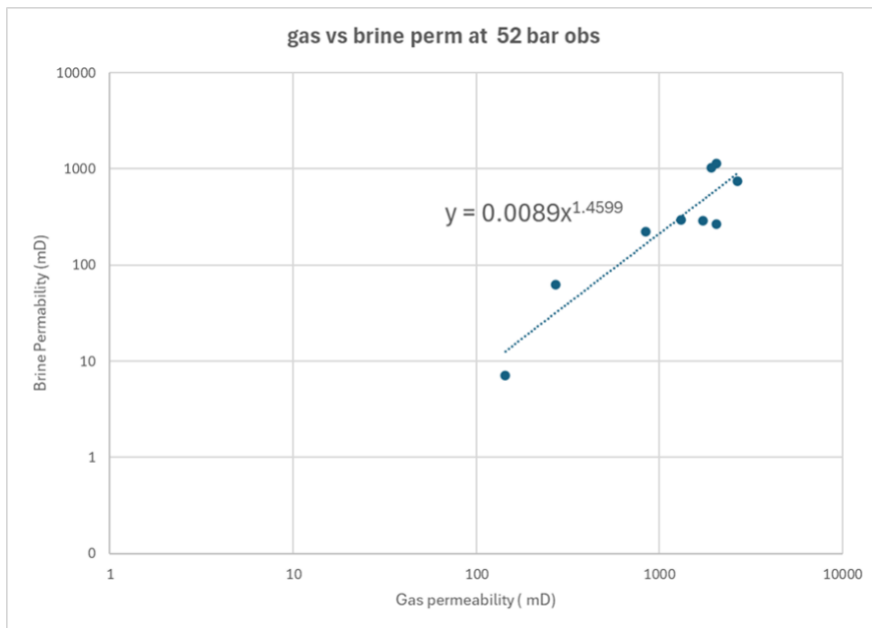
Figuur 4.4 Bimodale regionale *poroperm* voor het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.

Aangezien deze metingen zijn uitgevoerd met gas-permeabiliteit en bij atmosferische druk, worden op bovenstaande relaties nog gas-brijn en drukcorrecties toegepast, hieronder nader toegelicht.

4.5.2 Druk- en formatiewater-correcties

Op tien kernplugmetingen uit het Zand van Brussel Laagpakket van ORO-01 is de brijn permeabiliteit gemeten bij verschillende hydrostatische omringende druk (*confining pressure*) van 35, 52, en 90 bar. Van deze metingen benaderen de resultaten van 52 bar de *in-situ* condities in het reservoir van het Zand van Brussel Laagpakket het beste. De gas-formatiewater conversie gebaseerd op deze metingen is benaderd door een lineaire regressie volgens Figuur 4.5 en is als volgt toegepast op de helium permeabiliteit resultaten uit de vorige stap:

$$K_{brine} = 0.0089 \times K_{gas}^{1.4599}$$



Figuur 4.5 Lineaire regressie op basis waarvan de gas-formatiewater conversie is uitgevoerd.

4.5.3 Regionale k-Phi transform

Samengevat is de porositeits-afhankelijke permeabiliteit (Figuur 4.4) op basis van regionale kernplugmetingen berekend als volgt:

$$V_{sh} < 0.25: K_{gas} = 10^{13.5 \cdot PHIT - 1.8}$$

$$V_{sh} > 0.25: K_{gas} = 10^{13.5 \cdot PHIT - 3.1}$$

$$K_{brine;52bar} = 0.0089 \cdot K_{gas}^{1.4599}$$

Waarbij de permeabiliteit is gelimiteerd om onrealistische waardes te voorkomen volgens:

$$V_{sh} < 0.25: K_{max} = 3000 \text{ mD}$$

$$V_{sh} > 0.25: K_{max} = 1000 \text{ mD}$$

$$V_{sh} > 0.5: K = 0.001 \text{ mD}$$

4.5.4 Kalibratie met put testen

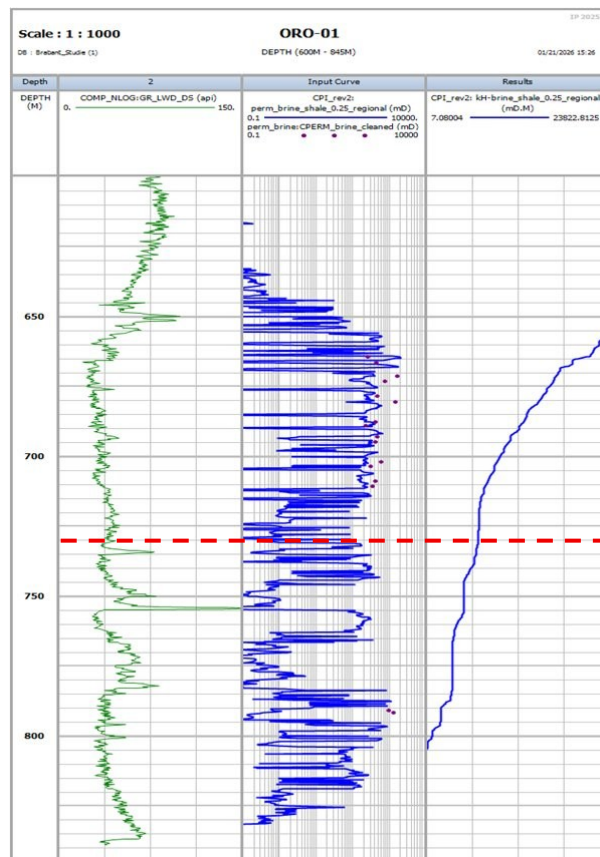
Om de voorspellende waarde van de berekende *poroperm* te toetsen kan de het nuttig zijn om de resultaten van put testen met behulp van porositeitslogs en de *poroperm* relatie te reproduceren. In het projectgebied zijn er op twee plekken put testen uitgevoerd in het Zand van Brussel Laagpakket: ORO-01 en ZVB-GT-01/02.

4.5.4.1 Kalibratie put test ORO-01

De put test in de ORO-01 put geeft een transmissiviteit van 22.1 Dm (EBN, 2025). Dit komt neer op een gemiddelde permeabiliteit van 160 mD. Figuur 4.6 berekent de cumulatieve transmissiviteit in de CPI log langs het gecompleteerde interval in ORO-01. De berekende transmissiviteit is hier 23.8 Dm.

Dit komt neer op een verschil van minder dan 50 mD met de put test resultaten, en wijst op een lokaal, hoge voorspellende waarde van de regionale *poroperm* (Figuur 4.6).

In Figuur 4.6 is de ondergrens van het bovenste zandige interval, de S3 eenheid, met een rode stippellijn aangegeven. Uit de cumulatieve transmissiviteitscurve kan worden gecontroleerd dat >75% van de flow in het reservoir plaatsvindt in deze bovenste eenheid. Waar de onderliggende zandige eenheden beschikken over enkele *high permeability streaks*, zijn deze slechts dun en voegen daardoor een relatief lage contributie toe aan de flow van het reservoir.



Figuur 4.6 Transmissiviteit in het gecompleteerde interval in de ORO-01 put op basis van de poroperm relatie uit Figuur 4.4.

4.5.4.2 Kalibratie put testen ZVB-GT-01/02

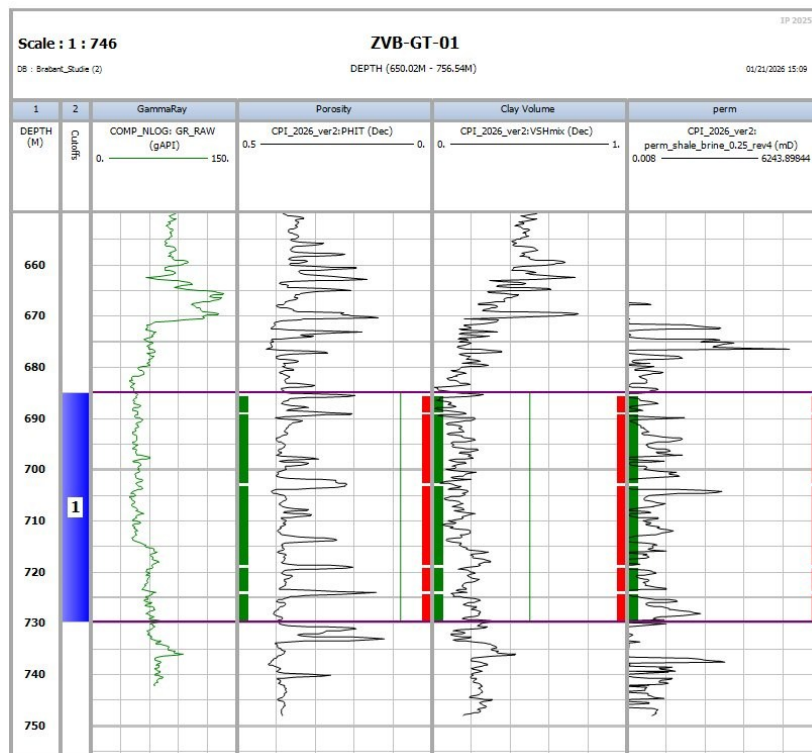
Uit de put testen in ZVB-GT-01-S2 (PanTerra, 2019) weten we dat op deze locatie een horizontale permeabiliteit van 720 mD kan worden verwacht. Deze put test is uitgevoerd in een horizontale put met een significante *outstep* (>500 m van de oppervlaktelocatie). De beschikbare logs voor het Zevenbergen project zijn afkomstig uit een initiële verticale exploratieput (ZVB-GT-01, Figuur 4.1). De horizontale mismatch tussen het loginterval en het testinterval maken een match aan de hand van de *poroperm* complex. Toch is een goede match vanwege de relatief horizontale stratigrafie in de Voorne Trog niet worden uitgesloten.

Op basis van de logs in de verticale ZVB-GT-01 put is de transmissiviteit in het equivalente gecompleteerde interval. Hierbij gaat het vooral om de bovenste productieve zone in het Zand van Brussel Laagpakket. Figuur 4.7 weergeeft de petrofysische gemiddelden langs dit interval. De berekende gemiddelde permeabiliteit is 696 mD wanneer een rekenkundig gemiddelde wordt gebruikt (Figuur 4.7, boven). De regionale *poroperm* benadert de well test in Zevenbergen dan op ongeveer 24 mD, een zeer goede match.

Met het oog op de uitgangspunten voor het statisch model (zie Hoofdstuk 7) hebben we ook getracht de permeabiliteit van het gecompleteerde interval in Zevenbergen middels een rekenkundig gemiddelde te berekenen (Figuur 4.7, onder). Dit levert een gemiddelde permeabiliteit van 328 mD op. Dit is significant lager dan de geïnterpreteerde waarde uit de well test. Echter zien wij de horizontale permeabiliteit uit de well test als zeer onzeker gegeven:

- de significant lagere productiviteit die werd gemeten na de opstart van het doublet in Zevenbergen, vergeleken met die bepaald uit de well test;
- de onzekerheid bij het bepalen van de horizontale permeabiliteit op basis van productie-data uit een sub-horizontale put.

Om die reden vinden wij het zeer belangrijk dat het statisch model in overeenkomst is met de well test in ORO-01, maar is het niet essentieel dat er ook een perfecte match is met de well test van het doublet in Zevenbergen.



Figuur 4.1 CPI fragment van de ZVB-GT-01 put.

Zone Depths		Reservoir Cutoffs		Pay Cutoffs	Reservoir Results		Pay Results		
Zone	Gross	Net	Net/Gross	Av	Av	Av	PhiH	VclH	permH
#	Interval	Res	Res	Phi Res	Vcl Res	perm Res	Res	Res	Res
1	45.00	42.41	0.942	0.369	0.154	695.809	15.66	6.51	29508.69

Zone	Gross	Net	Net/Gross	Av	Av	Av	PhiH	VclH	permH
#	Interval	Res	Res	Phi Res	Vcl Res	perm Res	Res	Res	Res
1	45.00	42.41	0.942	0.369	0.154	328.313	15.66	6.51	13923.48

Figuur 4.7 Petrofysische gemiddelden berekend langs het “equivalente gecompleteerde interval” in de verticale ZVB-GT-01 put voor een rekenkundig gemiddelde (boven) en een meetkundig gemiddelde (onder).

4.6 Netto-bruto (*net-to-gross*)

De totale dikte van het Zand van Brussel Laagpakket wordt ingeschat op 170 m. Voor de bepaling van de netto-bruto (*net-to-gross*) reservoirdikte zijn cut-offs op *Vshale*, porositeit en permeabiliteit toegepast als volgt:

$$Vshale < 0.6$$

$$PHIE > 0.2$$

$$PERM > 1 \text{ mD}$$

Een sensitiviteitstest op deze cut-off waardes ($Vshale < 0.5$, $PHIE > 0.1$) bevestigt dat deze keuzes robuust zijn en licht andere keuzes niet resulteren in significant verschillende gemiddelde waardes voor de reservoir eigenschappen (Tabel 4.3).

4.7 Samenvatting en implicaties reservoir eigenschappen ORO-01

Tabel 4.3 weergeeft de samenvatting van reservoir eigenschappen van het Zand van Brussel Laagpakket op basis van de gegevens uit de Oranjeoord-01 put.

Tabel 4.3 Samenvatting van reservoir eigenschappen Zand van Brussel Laagpakket

Reservoir dikte		Netto/Bruto	Vshale	Phi	Perm	PhiH	VshH	PermH
[m]			netto	netto	netto	netto	netto	netto
bruto	netto	[-]	[-]	[-]	[mD]	[m]	[m]	[mDm]
$Vshale < 0.6$; $PHIE > 0.2$								
169.7	143.45	0.845	0.245	0.292	165.968	41.48	35.14	23,808.15
$Vshale < 0.5$; $PHIE > 0.1$								
169.7	145.25	0.856	0.234	0.287	163.890	41.75	33.98	23,804.91

4.8 Formatiewater karakterisering

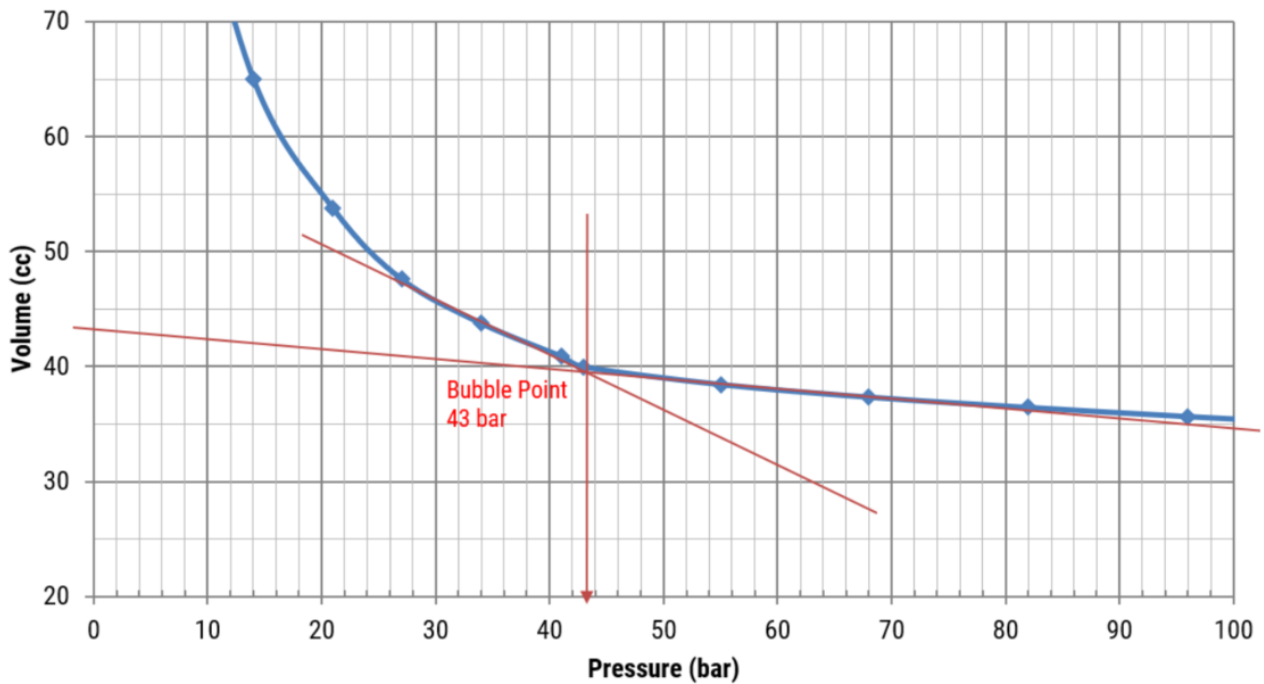
De eigenschappen van formatiewater zijn van belang bij het uitvoeren van productieberekeningen, het inschatten van operationele risico's, en het dimensioneren en ontwerpen van putten en faciliteiten. Uit de offset putten in zijn in twee gevallen samples genomen van het formatiewater in het Zand van Brussel Laagpakket.

- bij **ZVB-GT-01/02** zijn in de periode 2020–2021 drie samples genomen in de flowlines en geanalyseerd door SGS. De druk in de flowlines tijdens het nemen van deze samples bedroeg **1.4 bar**. De sampling gegevens konden worden gebruikt als benchmark voor de gegevens uit **ORO-01**.
- tijdens de well test van **ORO-01** in 2024 zijn zes samples genomen; één *bottom hole* sample op 690 m MD bij een druk van **73.63 bar** en vijf oppervlakte samples bij atmosferische druk. Van de oppervlaktesamples zijn de zuurgraad, en de concentratie vluchtige stoffen, *hydrocarbons* en sulfides bepaald. Voor het *bottom hole* sample zijn het *bubble point*, gascompositie en *gas-to-water ratio*, en dichtheid bij atmosferische druk bepaald.

4.8.1 Gascompositie en *gas-to-water ratio*

In het Westland, Zuid-Holland, is er een lange geschiedenis van aardwarmtesystemen waarbij de gehele of een deel van de hulpenergievraag op locatie (*i.e.* de eigen energievraag van de geothermische operatie) wordt opgewekt door de stook van geproduceerd aardgas. Dit gas, opgelost in het formatiewater bij reservoircondities, is in de Delft Zandsteen vaak aanwezig met concentraties van 1 Nm³/m³. De aanwezigheid van aardgas in deze hoeveelheden in het Zand van Brussel Laagpakket zou een significante verbetering van de *business case* van een aardwarmtesysteem kunnen opleveren.

De gascompositie is ook van belang voor het dimensioneren van de geothermie faciliteiten aan het oppervlak. Zo is het van belang dat corrosieve gassen als CO₂ niet (of zo beperkt mogelijk) in de flowlines uit de oplossing treden tijdens productie. Op basis van de samenstelling van het opgeloste gas en het *bubble point* kan dus de operationele druk van de faciliteiten (in de degasser) worden bepaald (Figuur 4.8, Figuur 4.9, en Figuur 4.10).



Figuur 4.8 Bubble point van *bottom hole* sample ORO-01 (PanTerra, 2024).

Component	Mole%	Weight%	Calculated Gas Properties		
H ₂	Hydrogen	0.000	0.000	Gas Density (kg m ⁻³ @ 0°C)	1.288
H ₂ S	Hydrogen Sulphide	0.000	0.000	Gas Mole Weight (g mol ⁻¹)	28.908
CO ₂	Carbon Dioxide	2.612	3.976	Real Relative (to air) Density of Gas @ 0°C	0.997
N ₂	Nitrogen*	96.310	93.330	Mole weight of Heptanes Plus (g mol ⁻¹)	120.323
C1	Methane	0.052	0.029	Density of Heptanes plus (g cm ⁻³ at 60°F)	0.771
C2	Ethane	0.008	0.008	Mole Weight of Undecanes plus (g mol ⁻¹)	147.000
C3	Propane	0.025	0.038	Density of Undecanes plus (g cm ⁻³ at 60°F)	0.789
C4	i-Butane	0.011	0.022	Gross Calorific Value (MJ m ⁻³) @ Combustion Temp of 25°C (superior) and @ metered temperature of 0°C	1.607
C4	n-Butane	0.044	0.088		
C5	i-Pentane	0.752	1.877	Gas Water Ratio (GWR): 0.50 sm³/m³ Corrected for air content (10.65%): O ₂ (2.24%) +corresponding amount of N ₂ (8.41%)	
C5	n-Pentane	0.047	0.117		
C6	Hexanes	0.052	0.151		
	MC Pentane	0.006	0.019		
	Benzene	0.001	0.003		
	Cyclohexane	0.003	0.009		
C7	Heptanes	0.016	0.054		
	MC Hexane	0.002	0.008		
	Toluene	0.001	0.003		
C8	Octanes	0.008	0.029		
	E-Benzene	0.000	0.000		
	M/P Xylene	0.000	0.001		
	O-Xylene	0.000	0.000		
C9	Nonanes	0.008	0.034		
	1,2,4 TMB	0.000	0.000		
C10	Decanes	0.008	0.037		
C11+	Undecanes +	0.033	0.166		
	Total	100.000	100.000		

*Note: the well was lifted with Nitrogen and this may explain the large quantities of Nitrogen observed in the sample

Figuur 4.9 Compositie van gas uit *bottom hole* sample ORO-01 (PanTerra, 2024).

Analysis	Unit	Bottomhole sample
Anions [Conform ISO 10304-1]		
Bromide (as Br)	mg/l	81
Chloride (as Cl)	mg/l	24000
Nitrate (as N)	mg/l	<2.0
Nitrite (as N)	mg/l	<2.0
Sulphate (as SO ₄)	mg/l	320
Fluoride (as F)	mg/l	<2.0
Iodide	mg/l	<80
pH [Conform ISO 10523]		
pH	-	7.36
Measurement Temperature	C	23.0
Metals [(Conform NEN 6961/NEN 6966/C1 (EN-ISO 11885)) (A)]		
Aluminium (Al)	µg/l	<100
Antimonium	µg/l	<25
Arsen (As)	µg/l	<10
Barium (Ba)	µg/l	350
Borium (Bo)	µg/l	10000
Cadmium (Cd)	µg/l	2.0
Calcium (Ca)	µg/l	1100000
Cerium (Ce)	µg/l	43
Chrome (Cr)	µg/l	21
Cobalt (Co)	µg/l	<10
Copper (Cu)	µg/l	22
Iron (Fe)	µg/l	23000
Lead (Pb)	µg/l	<10
Lithium (Li)	µg/l	3400
Magnesium (Mg)	µg/l	650000
Manganese (Mn)	µg/l	290
Molybdenum (Mo)	µg/l	27
Nikel (Ni)	µg/l	31
Potassium (K)	µg/l	210000
Sodium (Na)	µg/l	13000000
Strontium (Sr)	µg/l	140000
Thallium (Th)	µg/l	<20
Titanium (Ti)	µg/l	<20
Vanadium (V)	µg/l	<10
Zink (Zn)	µg/l	200

Figuur 4.10 Dissolved solids in het downhole sample in ORO-01 (PanTerra, 2024).

Figuur 4.8 toont de bepaling van het *bubble point* voor het *downhole sample* uit ORO-01. Deze bedraagt **43 bar**, wat inhoudt dat tijdens productie een deel van de opgeloste gassen uit de oplossing treedt. Figuur 4.9 weergeeft de samenstelling van dit gas, waarbij de toepassing van gaslift technologie tijdens de put test de concentratie van stikstof aanzienlijk heeft verhoogd. Wanneer de stikstofconcentratie gelijk wordt gesteld aan het volumepercentage stikstof in de Zevenbergen samples, en de samenstelling van de resterende componenten opnieuw wordt genormaliseerd heeft het gas uit het *downhole sample* in ORO-01 een CO₂ fractie van ongeveer 60 wt%. Dit is meer dan twee keer zo hoog dan de fractie in de samples uit Zevenbergen. Dit houdt dat in Zevenbergen ongeveer 30 wt% van het in het reservoir opgeloste gas als CO₂ tijdens operaties in de productieput vrijkomt. Dit heeft mogelijk gevolgen ten aanzien van corrosiebeheer in Zevenbergen en toekomstige projecten in het Zand van Brussel Laagpakket (zie ook sectie 8.3).

De hoeveelheid geproduceerd gas in ORO-01 is 0.5 sm³/m³. Dit is significant hoger dan de *gas-to-water* ratio in Zevenbergen (0.07 Nm³/m³), maar de meting is door de grote hoeveelheid toegevoegd stikstof tijdens de gaslift onbetrouwbaar. De meting in Zevenbergen wordt als meer betrouwbaar gezien, en hieruit kan worden geconcludeerd dat de hoeveelheid geproduceerd gas in de Zand van Brussel Laagpakket aanzienlijk lager is dan de geobserveerde waarden in het de Westland projecten. Zelfs bij relatief hoge calorische waarden zoals >50 MJ/m³ (in Zevenbergen) kan de potentie voor coproductie in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog als verwaarloosbaar worden ingeschat.

4.8.2 Total dissolved solids

De *total dissolved solids* (TDS) omvatten het volumepercentage van de opgeloste anionen en kationen. Vaak is een hoge TDS gerelateerd aan sterk corrosieve brijnen. Dit is het geval in de projecten in de Delft Zandsteen (e.g., in het Westland, Zuid-Holland), waar TDS-waarden vrijwel overal boven de 100,000 ppm bedragen en mitigerende maatregelen zoals het gebruik van corrosie-inhibitor of de installatie van dubbele verbuizingen van *coated steel* of GRE aan de orde zijn.

Figuur 4.10 toont de compositie van het *downhole sample* in ORO-01. Uit de samenstelling kan een TDS van 51,000 ppm worden opgemaakt. Dit is ruwweg dezelfde ordegrrootte als de TDS in Zevenbergen (42,000) en de brijn is daarmee aanzienlijk minder corrosief dan brijnen in diepere systemen in het West Nederland Bekken. Ervan uitgaande dat de TDS voor zoet water aan het oppervlakte 0 ppm is (Mijnlief *et al.*, 2014) is als volgt een saliniteit gradiënt berekend, waarbij z_{flash} gelijk is aan de diepte waar de druk 43 bar bedraagt:

$$\Delta TDS = \frac{(z_{res} - z_{flash}) \cdot \Delta TDS_{ORO} + z_{flash} \cdot \Delta TDS_{ZVB}}{z_{res}}$$

Voor een z_{flash} van 414 m TVD (bepaald op basis van de drukgradiënt uit sectie 4.8.3) is de saliniteit (TDS) gradiënt dan **65.4 ppm/m** of **74.8 ppm/bar**.

Het sulfaatgehalte in het formatiewater in ORO-01 is 320 mg/L, vergelijkbaar met het sulfaatgehalte in Zevenbergen waar tijdens productie significante injectiviteit problemen ontstonden door microbiologische scaling door *sulphate reducing bacteria*. Deze sulfaatwaarden zijn relatief hoog

vergeleken met andere aardwarmtesystemen in Nederland, maar kunnen niet worden gezien als extreme uitschieters. Toch zouden door de uitkoeling in lage temperatuur aardwarmtesystemen ook in het Zand van Brussel Laagpakket bij ORO-01 problemen bij dit sulfaatgehalte kunnen worden voorzien. Dit wordt verder beschreven in sectie 8.3.

Ten slotte concluderen wij dat de geproduceerde solids uit het Zand van Brussel Laagpakket een zeer laag NORM-risico hebben. Het filter residu in het doublet in Zevenbergen had een radioactiviteit van 0.11 Bq/kg (vergeleken met bijvoorbeeld 520 Bq/kg bij het diepe geothermiesysteem in Zuid-Holland). Er is pas sprake van een registratieplicht bij radioactiviteit van het filter residu tussen 1,000-10,000 Bq/kg.

Op basis van Figuur 4.10 doen wij geen observaties die impact hebben op de wijze van berekening van geothermisch productiecapaciteit, of die ontwerpkeuzes en risico mitigerende maatregelen kunnen beïnvloeden.

4.8.3 Reservoirdruk

De druk op reservoir niveau is noodzakelijk voor het bepalen van de TDS (zie sectie 4.8.2) en dichtheid van het formatiewater en de noodzaak voor *artificial lift*, welke bepalend is voor de behoefte aan hulpenergie voor een geothermieproject. De put testen van ZVB-GT-01/02 en ORO-01 leveren informatie over de druk in *downhole* condities. Bij de put testen in Zevenbergen was er geen sprake van een *pressure gauge* op reservoir niveau, maar op een diepte van 100 m TVD. De gemeten druk was hier 10 bar. Bij de put test in ORO-01 is een *pressure gauge* gehangen op 581.3 m TVD, met een mid-reservoir op 703.5 m TVD. De gemeten druk is hier 59.6 bar.

Gezien de relatief laterale continuïteit van de stratigrafie in de Voorne Trog, het relatieve gebrek aan grote (niet doorlaatbare) breuken in het onderzoeksgebied, en de uniforme, constante dalingsgeschiedenis van de Voorne Trog tijdens de afzetting van de Noordzee Groep, nemen wij een constante reservoir drukgradiënt zonder individuele zones met over- en onderdruk aan. Wij nemen aan dat de drukgradiënt op 581.3 m TVD vergelijkbaar is met de drukgradiënt op reservoir niveau. Voor het berekenen van de reservoir druk in het Zand van Brussel Laagpakket wordt in deze rapportage dus een gradiënt van **0.10253 bar/m** gehandhaafd.

4.8.4 Geothermische gradiënt

Temperatuur op reservoirniveau is cruciaal voor de bepaling van viscositeit, welke de productiviteit beïnvloedt, en de productietemperatuur, welke direct invloed heeft op de energetische potentie van een aardwarmtesysteem. In de Nederlandse ondergrond wordt de temperatuur op diepte vaak aan de hand van een geothermische gradiënt bepaald. Bonté *et al.* (2012) toont aan dat de geothermische gradiënt in de Nederlandse ondergrond zicht tot 4,000 m lineair ontwikkelt. Voor het Zand van Brussel Laagpakket wordt dus een lineaire gradiënt voldoende geacht (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Geothermische gradiënten in de Nederlandse ondergrond uit diverse onderzoeken.

Bron	Oppervlaktetemperatuur (°C)	Geothermische gradiënt (°C/km)	Opmerking
Bonté et al. (2012)	10.1	31.3	Landelijke gemiddelde trend
Geel et al. (2022)	10	32	Toepassing op Zand van Brussel Laagpakket in Voorne Trog
Deze studie	10.7	32	Op basis van BHT-metingen ORO-01 en ZVB

Tabel 4.4 weergeeft verschillende gradiënten welke eerder zijn toegepast voor het berekenen van de formatietemperatuur. Hier is gebruik gemaakt van de temperatuurmeting van het hiervoor genoemde *downhole sample* in ORO-01 en de temperatuur van de productietemperatuur in Zevenbergen:

- In ORO-01 wordt een reservoirtemperatuur van 33.6°C gemeten bij een mid-reservoirdiepte van 730 mTVD (PanTerra, 2024).
- In ZVB-GT-01 wordt aan het oppervlak een gemiddelde temperatuur van 31.6 °C bij een debiet van ongeveer 120 m³/u gemeten. Mid-reservoir is hier 694 mTVD. Wij nemen aan dat bij deze debieten, en bij productie uit een relatief ondiep reservoir, de temperatuurverliezen langs het boorgat verwaarloosbaar zijn.

Aan de hand van bovenstaande meetpunten hebben wij een nieuwe gradiënt ontwikkeld waarbij wordt uitgegaan van een oppervlaktetemperatuur van 10.7 °C (de gemiddelde buitentemperatuur in het onderzoeksgebied), en een geothermische gradiënt van 32 °C/km (Tabel 4.4).

4.8.5 Regionale trends

Dit huidige hoofdstuk beschrijft de herleiding van diverse brijnparameters die noodzakelijk zijn voor het uitvoeren van geothermische potentieberekeningen, en het inschatten van risico's en systeemoverwegingen. Hoofdstuk 8 beschrijft de stappen waarin deze parameters worden gebruikt in de berekeningen. Deze stappen omvatten onder andere het herleiden van temperatuur en drukafhankelijke brijneigenschappen zoals viscositeit, dichtheid, en warmtecapaciteit.

Zoals eerder benoemd is het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog lateraal continu, is er geen sprake van grote (niet doorlaatbare) breuken in het onderzoeksgebied, en is het gebied sinds de afzetting van het Zand van Brussel Laagpakket aan een relatief uniforme dalingsgeschiedenis onderhevig geweest. Dit betekent dat in deze paragraaf beschreven (diepte-afhankelijke) waarden van toepasbaar worden geacht op het Zand van Brussel Laagpakket in het volledige onderzoeksgebied.

Tabel 4.5 vat de brijn parameters in dit hoofdstuk zijn bepaald en de basis voor verdere potentieberekeningen vormen samen.

Tabel 4.5 Eigenschappen van het formatiewater in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.

Brijn parameter	Waarde
Oppervlaktetemperatuur (°C)	10.7
Geothermische gradiënt (°C/km)	32
Reservoirdruk gradiënt (bar/km)	102.53
Saliniteit gradiënt (ppm/km)	65,400
Aardgas coproductie	Verwaarloosbaar

5. Offset putten

5.1 Dataoverzicht

In het onderzoeksgebied zijn alle putten geselecteerd waarvan boorgatmetingen in het Zand van Brussel Laagpakket beschikbaar zijn op NLOG. De meeste van deze putten zijn eerder ook geanalyseerd in de WarmingUp studie naar het Zand van Brussel Laagpakket (Geel & Foeken, 2021). Tabel 5.1 weergeeft de beschikbare data en kwaliteitsbeoordeling.

Tabel 5.1 Overzicht beschikbare data en kwaliteitsbeoordeling.

Put	GR	SP	RES	RHOB	DT	NPHI	core	BZL diepte	QA/QC	Opmerkingen
Petrofysische analyse										
BHG-01	✓		✓	✓	✓	✓		513–584	Uitstekend	GR & DT edits
BRT-01	✓	✓		✓	✓			567–647	Goed	GR edits
BTL-01	✓				✓			623–727	Matig	GR + DT edits
HBV-01	✓				✓			712–753	Goed	GR edits
HVS-01	✓	✓	✓		✓			649–758	Goed	GR edits
PRW-01	✓	✓	✓	✓	✓			605–685	Goed	GR + RHOB edits
RDK-01	✓			✓	✓	✓		618–725	Uitstekend	RHOB edits
RSB-01	✓	✓	✓					526–654	Goed	GR & DT edits
RZB-01	✓	✓			✓			591–693	Goed	GR edits
STH-01	✓	✓	✓	✓	✓			647–755	Uitstekend	DT edits
STR-01	✓				✓	✓		636–745	Uitstekend	SP edits
STW-01	✓			✓				660–780	Goed	GR edits, RHOB bulk shifted +3
ZVB-GT-01	✓		✓	✓		✓		644–757	Uitstekend	Alleen bovenste deel LZB
KTG-01	✓		✓	✓	✓			345–405	Goed	GR + DT edits

Put	GR	SP	RES	RHOB	DT	NPHI	core	BZL diepte	QA/QC	Opmerkingen
Kernmetingen check										
DON-01		✓	✓				✓	735–844	Slecht	Geen poro logs
WAP-01		✓	✓				✓	730–743	Slecht	Geen poro logs
Niet gebruikt										
BRTZ-01	✓			~	~				Slecht	Alleen onderste deel LZB
GAG-01	✓				~				Slecht	Alleen onderste deel LZB
OBLZ-01	✓			✓	✓				Slecht	Datakwaliteit slecht; casing shoe in LBZ, gedeeltelijk door casing

5.2 QA/QC en CPI methode

De meeste putten gebruikt als *offset wells* in deze studie zijn als onderdeel van de eerdere WarmingUp studie (Geel & Foeken, 2021) en zijn dus al integraal geanalyseerd. Van deze bestaande petrofysische analyse zijn *Vshale*, PHIE en PERM beschikbaar welke als referentie gebruikt zijn. Echter, de methodiek rond ORO-01 kent twee verschillen ten opzichte van de WarmingUp studie:

1. de *poroperm-transform* is op basis van PHIT i.p.v. PHIE; en
2. de *Vshale* is gecorrigeerd voor de glauconietzone nabij de top van het Zand van Brussel Laagpakket.

Om consistente methodiek te garanderen hebben wij voor alle putten opnieuw *Vshale*, PHIT, PHIE en PERM berekend. Hierbij zijn de petrofysische parameters van de WarmingUp studie als beginpunt genomen en de globale resultaten overeengestemd. Van twee putten (DON-01 en WAP-01) in het onderzoeksgebied zijn kernmetingen beschikbaar, maar geen degelijke putmetingen. Deze kernplugmetingen zijn wel gebruikt als aanvulling op de ORO-01 kernplugmetingen om de regionale *poroperm* relatie te versterken, maar deze putten zijn verder niet gebruikt voor petrofysische analyse.

Drie putten (BRTZ-01, GAG-01, OBLZ-01) in het onderzoeksgebied zijn uitgesloten van petrofysische analyse omdat hiervoor enkel boorgatmetingen in het onderste deel van het Zand van Brussel Laagpakket beschikbaar zijn en de porositeitslogs van slechte kwaliteit zijn (Tabel 5.1).

Net zoals op ORO-01 toegepast, zijn voor putten met een glauconietzone of *bad hole* zones de kernmetingen gecorrigeerd middels interpolatie of *smoothing*. Ook gebrekkige data intervallen in RHOB en DT zijn gecorrigeerd. Gecorrigeerde put data zijn aangegeven in Tabel 5.1, daarnaast zijn alle correcties gelogd en weergegeven in Appendix A.

5.3 Petrofysische gemiddelden

De intervalgemiddelde petrofysische eigenschappen zijn per put samengesteld voor de Zand van Brussel Laagpakket sub-intervallen zand 1, 2 en 3 (S1, S2, S3), en daarna geaggregeerd naar het volledige Zand van Brussel Laagpakket interval met dikte-gewogen gemiddelden (bruto-gewogen voor bruto-eigenschappen, netto-gewogen voor netto-eigenschappen) (zie voor een samenvatting van de resultaten Tabel 5.2, en de volledige datatabel met petrofysische gemiddelden in Appendix B).

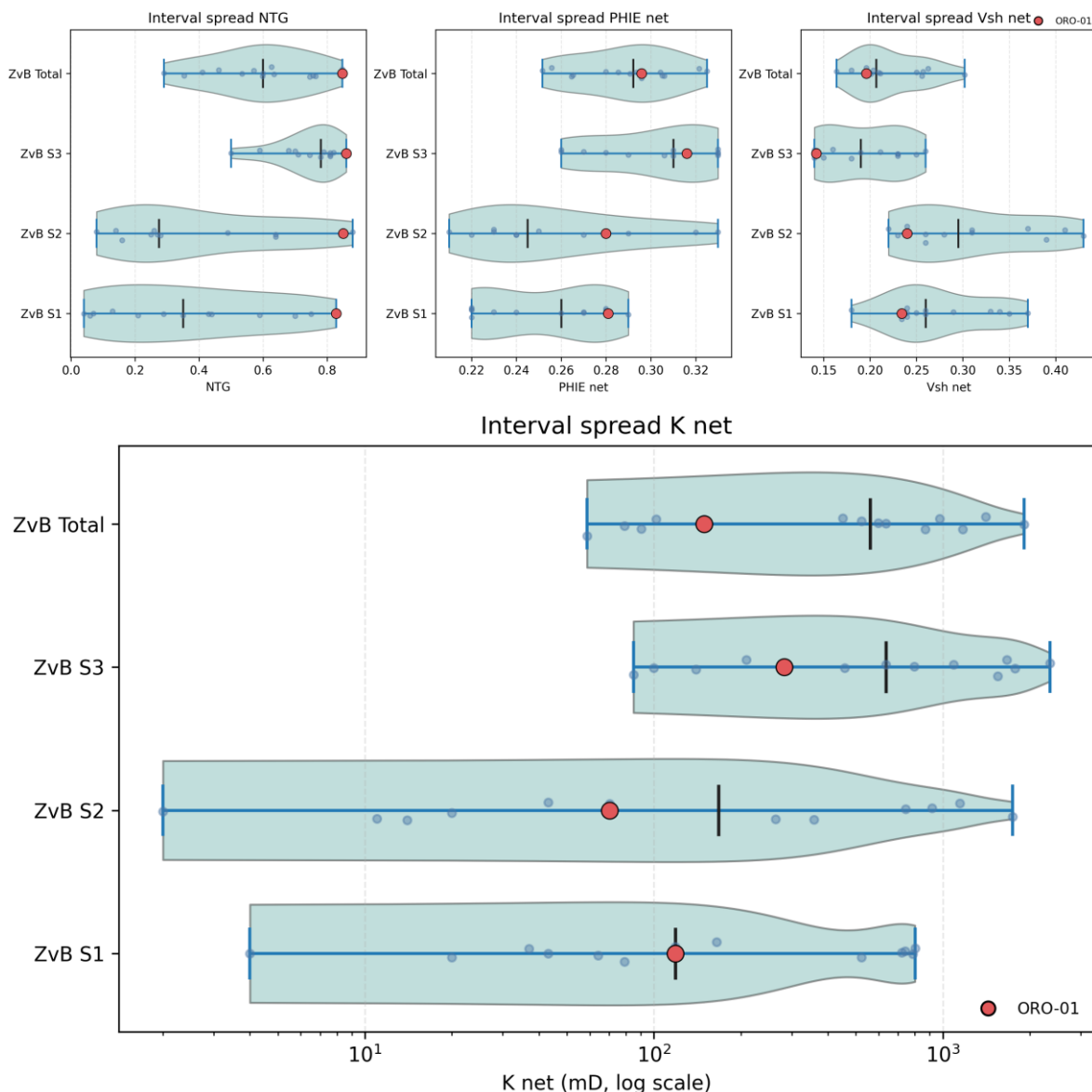
Tabel 5.2 Samenvatting petrofysische gemiddelden (P50) offset wells incl. ORO-01

Zand van Brussel Laagpakket Interval (# putten)	Dikte [m]		Netto /bruto [-]	Vshale [-]		PHIT (netto) [%]	PHIE (netto) [%]	K (netto) [mD]	K*H (netto) [mDm]
	bruto	netto		bruto	netto				
S3 (n=13)	73	58	0.78	0.27	0.19	38%	31%	636	39,800
S2 (n=12)	44	11	0.28	0.43	0.30	39%	25%	167	2,361
S1 (n=13)	47	16	0.35	0.46	0.26	38%	26%	119	2,970
Zand van Brussel Laagpakket totaal (n=14)	163	86	0.60	0.35	0.21	38%	29%	560	41,778

Figuur 5.1 toont een vergelijking van reservoir eigenschappen tussen alle putten en voor verschillende reservoirintervallen. Opvallend is dat uit de nieuwe analyse van ORO-01 blijkt dat deze put bovengemiddeld, ten opzichte van andere putten in het onderzoeksgebied, goede netto-bruto, effectieve porositeit (PHIE), en kleivolume (*Vshale*) eigenschappen heeft, maar onder gemiddelde permeabiliteitswaardes. Hierbij wordt benadrukt dat de permeabiliteitswaardes voor ORO-01 absoluut gezien goed zijn.

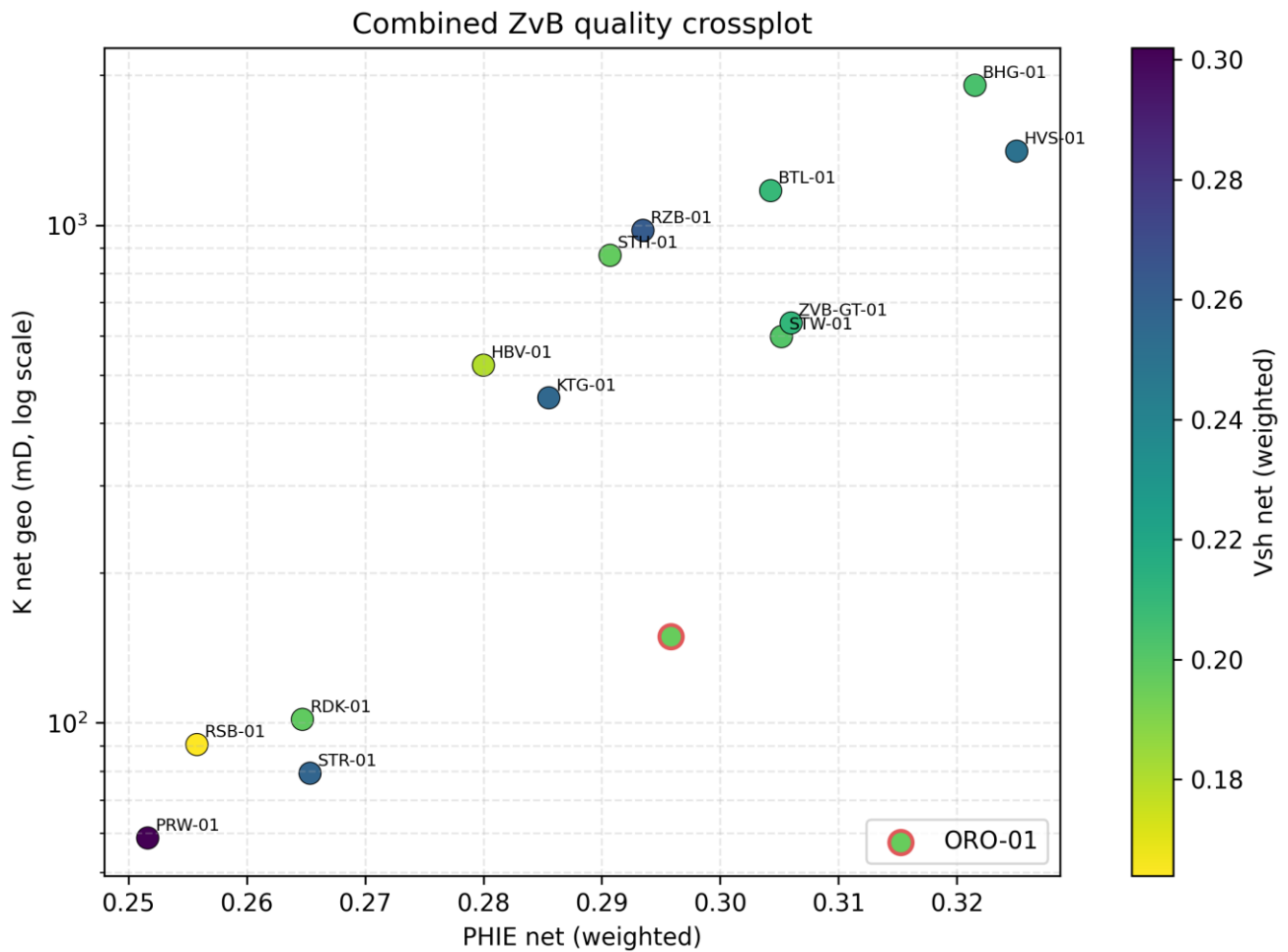
Figuur 5.1 laat zien dat Zand 3 (S3) de kleinste spreiding tussen putten heeft en toont de beste reservoir eigenschappen. Zand 2 (S2) kent de grootste variatie in eigenschappen tussen de verschillende putten en heeft gemiddeld de minst voordelige eigenschappen. Zand 1 (S1) kent ook grote variatie tussen de putten, maar heeft gemiddeld betere eigenschappen dan Zand 2 (S1).

Opvallend is dat uit de nieuwe analyse van ORO-01 blijkt dat deze boring bovengemiddeld, ten opzichte van ander putten in het onderzoeksgebied, goede netto-bruto, effectieve porositeit (PHIE), en kleivolume (*Vshale*) eigenschappen heeft, maar onder gemiddelde permeabiliteitswaarden (Figuur 5.1). Hierbij wordt wederom benadrukt dat de permeabiliteitswaarden voor ORO-01 absoluut gezien goed zijn.



Figuur 5.1 Vergelijking meest relevante petrofysische gemiddelden van boringen en sub-intervallen.

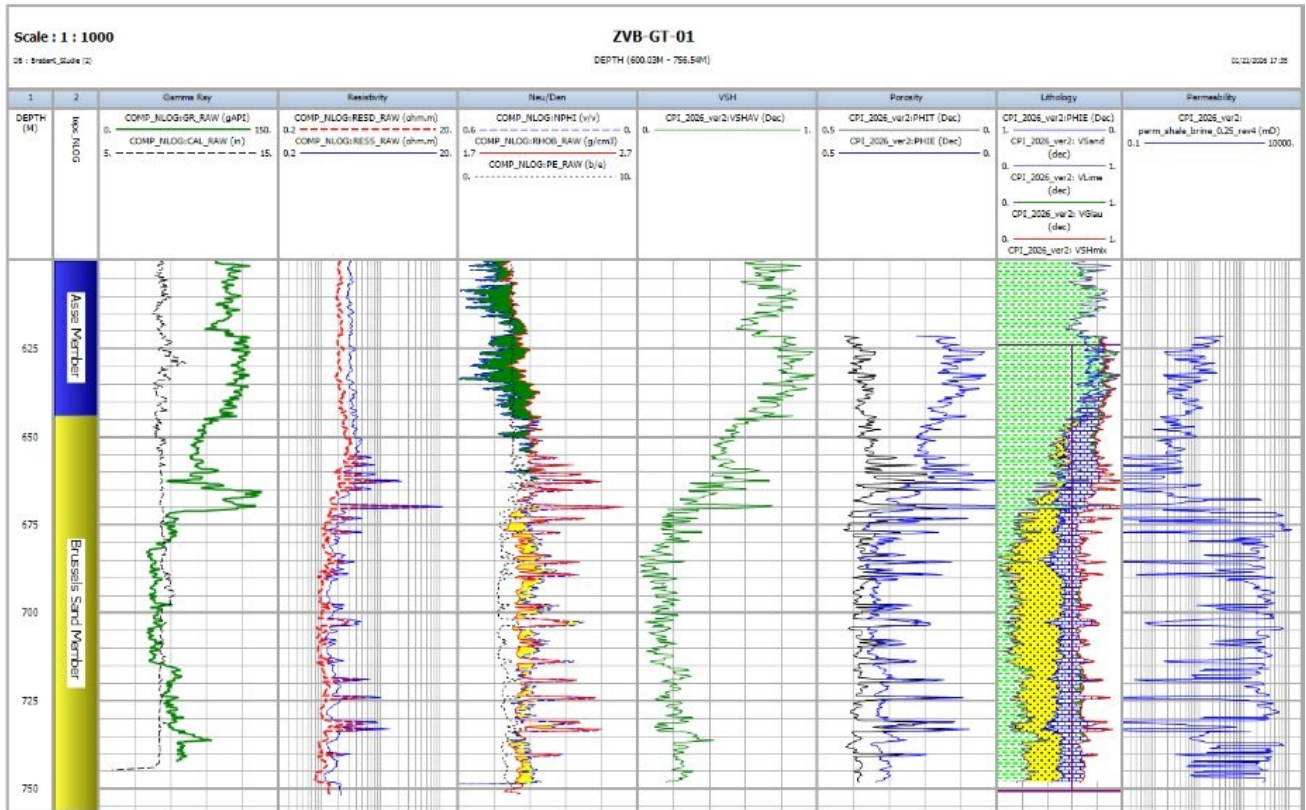
Dit plaatst ORO-01 in een domein van relatief hoge porositeit, laag kleivolume, en iets onder gemiddelde permeabiliteit ten opzichte van andere putlocaties in het onderzoeksgebied (Figuur 5.2).



Figuur 5.2 Cross-plot van gemiddeld porositeit-permeabiliteit, met kleivolume, van reservoirintervallen in het Zand van Brussel Laagpakket, per put.

5.4 CPI van ZVB-GT-01

Vanwege de beschikbaarheid van een well test rapport is naast ORO-01 ook voor ZVB-GT-01 een gedetailleerde CPI gemaakt (zie Figuur 5.3). Deze dekt alleen de bovenste zandige eenheid (S3) in het Zand van Brussel Laagpakket. Dezelfde uitgangspunten zijn toegepast voor de CPI van ZVB-GT-01 als voor de CPI van ORO-01.



Figuur 5.3 CPI voor ZVB-GT-01.

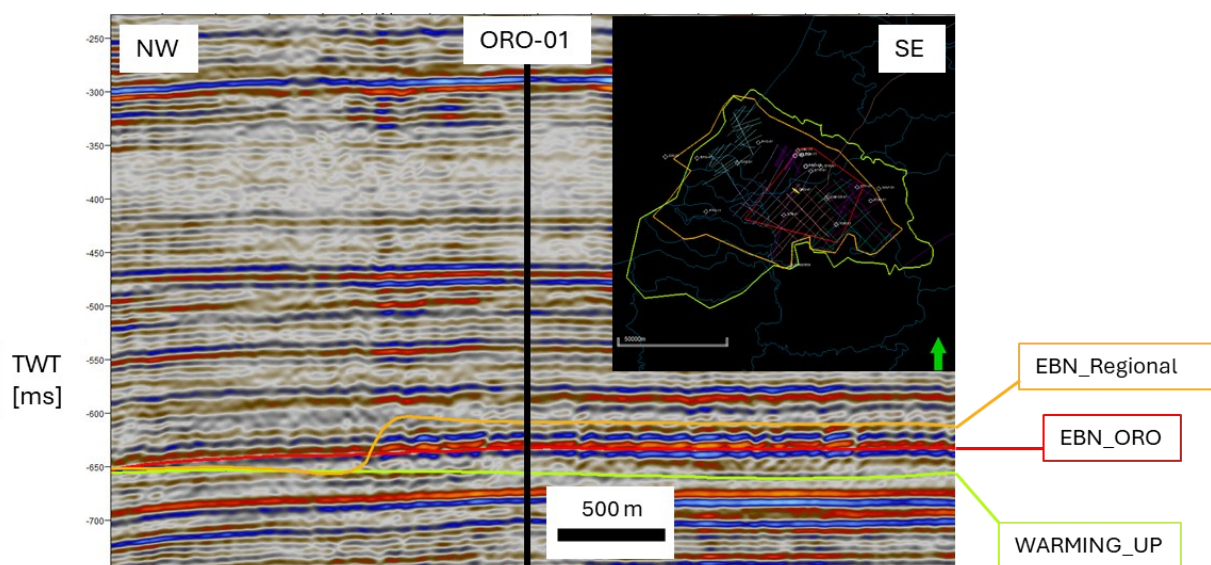
6. Seismische data en interpretaties

De workflow voor seismische interpretatie bestaat uit: (i) het inladen en samenvoegen van de verschillende seismische reflectie datasets, (ii) de kalibratie van *sonic logs*, (iii) het uitvoeren van *well-to-seismic-ties*, en (iv) kwaliteitscontrole (QA/QC) van de reeds uitgevoerde interpretaties om waar nodig nieuwe of verbeterde horizons te karteren (Tabel 3.3). Vervolgens is een *gridding*- en diepteconversie framework opgesteld welke als input voor het statische model dient.

Gezien de relatief ondiepe ligging van het reservoir en de afwezigheid van structurele complexiteit, observeren wij dat de introductie van de ORO-01-put slechts tot kleine verschillen in de structurele architectuur, het breuken framework, en de diepteconversie op het niveau van het Zand van Brussel Laagpakket leidt in vergelijking met de bestaande *legacy*-modellen (e.g., WarmingUp).

6.1 Seismische reflectie data

Omdat de gebruikte seismische reflectie datasets verschillende referentiekaders hebben en op verschillende manieren zijn ge-(re)processed is na het inladen van de data in SLB's softwarepakket Petrel eerst een data integratie ("*data alignment*") proces uitgevoerd om ervoor te zorgen dat de data binnen het onderzoeksgebied lateraal consistent is. Onderdeel van dit proces is een gedetailleerde seismische *mis-tie-analyse* uitgevoerd met behulp van de speciale *mis-tie manager-tool* in Petrel. De lijn L2EBN2023A door ORO-01 is hierbij gebruikt als referentielijn, en de andere seismische reflectie data zijn vervolgens gecorrigeerd om ervoor te zorgen dat de reflectoren binnen het diepte interval van het Zand van Brussel Laagpakket lateraal continu zijn tussen verschillende seismische reflectie dataset (Figuur 6.1). Dit is gedaan om *gridding* problemen en de introductie van mogelijke artefacten in het statische modelgrid te voorkomen.



Figuur 6.1 Beschikbare interpretaties langs L2EBN2023A (zie Tabel 3.3). Noot dat de seismische lijn waarlangs de interpretaties zijn weergegeven nog niet beschikbaar was tijdens het maken van deze interpretaties.

De *mis-tie-analyse* voor deze studie omvat niet alleen een bulk shift van de data, maar ook fase-aanpassingen en frequentie *resampling* in gevallen waarin verschillende workflows voor processing op de seismische reflectie datasets waren toegepast. Deze stappen zijn uitsluitend uitgevoerd om de interpretatie tussen de verschillende seismische reflectie data te vergemakkelijken.

6.2 QA/QC methode

Nadat de statische dataset is geïntegreerd en gecorrigeerd hebben we een kwaliteitscontrole uitgevoerd op de bestaande beschikbare interpretaties (zie sectie 3.3). Hier observeren wij hoe inconsistent de verschillende interpretaties binnen het onderzoeksgebied zijn. Dit is vooral duidelijk in het gebied rond ORO-01, waar de interpretatie uitgevoerd door EBN vlak nadat ORO-01 was geboord (EBN_ORO in Figuur 6.1) de meest aannemelijke horizontale geometrie weergeeft. Om deze reden beschouwen wij deze als de meest betrouwbare interpretatie, en is deze dus gebruikt binnen het seismische interpretatie framework van onze studie. Echter omdat het laterale bereik van deze interpretatie beperkt is tot slechts ~1600 km² rondom ORO-01, en omvat het niet het volledige onderzoeksgebied van deze studie. Om deze reden hebben wij deze interpretatie rond ORO-01 gebruikt en vervolgens uitgebreid over het gehele onderzoeksgebied met behulp van de andere twee interpretaties (EBN_Regional en Warming_UP) als proxies.

Vervolgens is de *seismic-to-well* tie voor ORO-01 gecontroleerd om de kwaliteit en nauwkeurigheid van de EBN_ORO-interpretatie te valideren en de seismische expressie van de verschillende geologische markers te beoordelen. Aangezien er geen *seismic-to-well-tie* analyse beschikbaar was, hebben wij zelf deze analyse uitgevoerd op basis van de beschikbare ORO-01-gegevens (Figuur 6.2).

Omdat ORO-01 onder andere *sonic*- en *density-logs* bevat was het mogelijk om een nauwkeurig synthetisch seismogram te maken (Figuur 6.2). Bovendien door de beschikbaarheid van *checkshot-logs* is kalibratie van de *sonic* log mogelijk, waardoor het resulterende synthetische seismogram robuuster is. De *seismic-to-well-tie* richt zich uitsluitend op de top en de basis van Zand van Brussel Laagpakket, aangezien deze markers de belangrijkste inputs vormen die nodig zijn voor het statische model (Figuur 6.2).

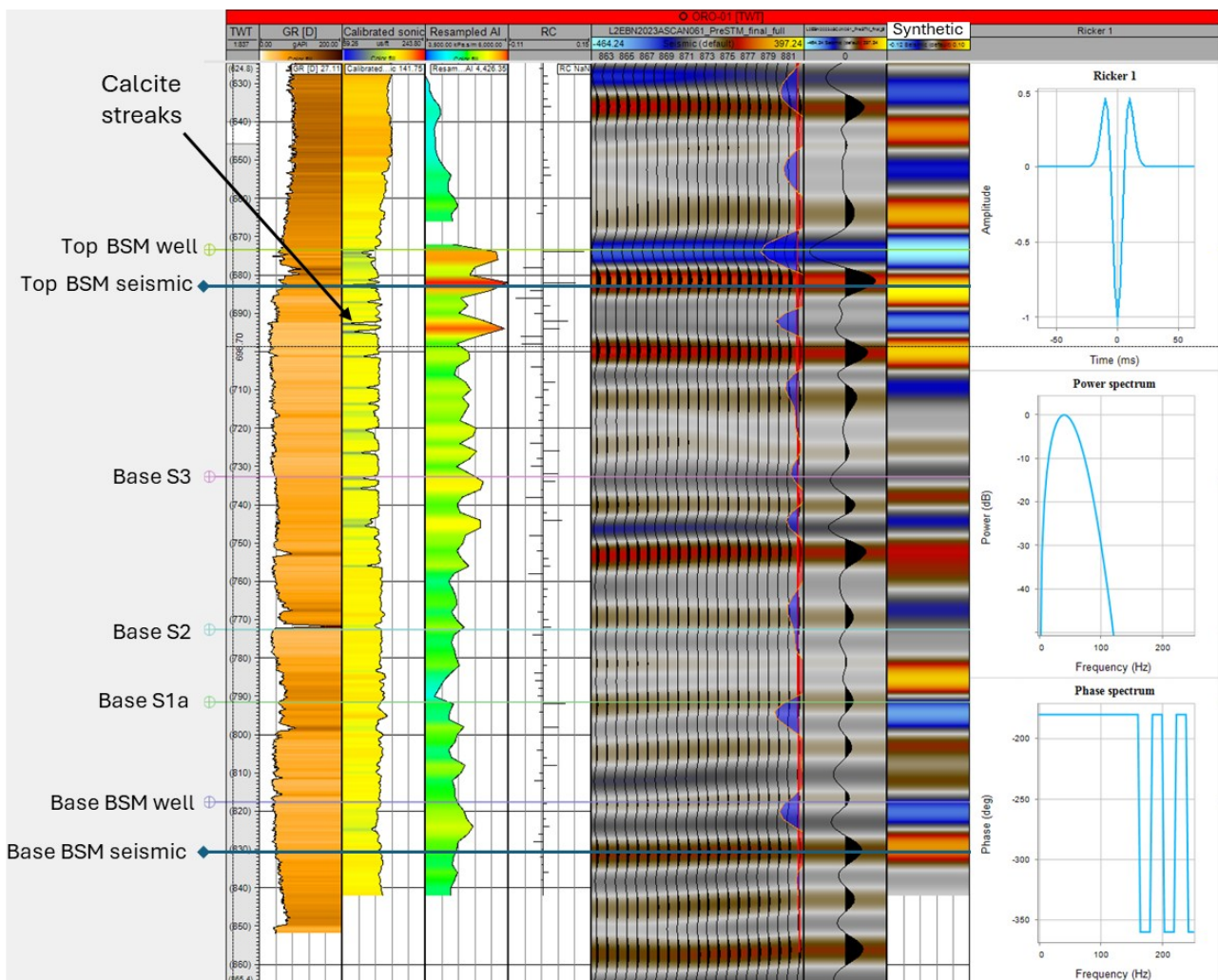
De top van het Zand van Brussel Laagpakket gaat gepaard met een toename in akoestische impedantie, gerelateerd aan de aanwezigheid van gecementeerde lagen met een hogere snelheid en dichtheid welke duidelijk zichtbaar zijn als pieken in zowel de *density*- als de *sonic*-logs. De seismische polariteit is *reverse*, wat betekent dat een toename in akoestische impedantie overeenkomt met een dal (negatieve amplitude).

Onder deze reflector bevindt een uitgesproken piek met een grotere amplitude dan de dalvorm erboven, waarschijnlijk als gevolg van de hogere frequentie die gepaard gaat met de calciet gecementeerde lagen. Deze reflector is in dit onderzoek gekozen als representatief voor de bovengrens van het Zand van Brussel Laagpakket. Wij achten deze benadering passend omdat de twee reflectoren over het onderzoeksgebied grotendeels parallel blijven lopen. Daarom beschouwen wij deze reflector als representatief voor de geometrie van de bovengrens van het Zand van Brussel

Laagpakket. Onder deze twee loops verliezen de overige reflectoren van het Zand van Brussel Laagpakket aan amplitude en zijn ze relatief transparant op de seismische lijnen.

De basis van het Zand van Brussel Laagpakket wordt niet gekenmerkt door een sterke verandering in akoestische impedantie, wat de meer geleidelijke overgang weerspiegelt vanuit de kleisteen van het onderliggende Laagpakket van Ieper. Toch is op dit niveau een toename in akoestische impedantie zichtbaar, welke overeenkomt met een dal in de seismische reflectie data.

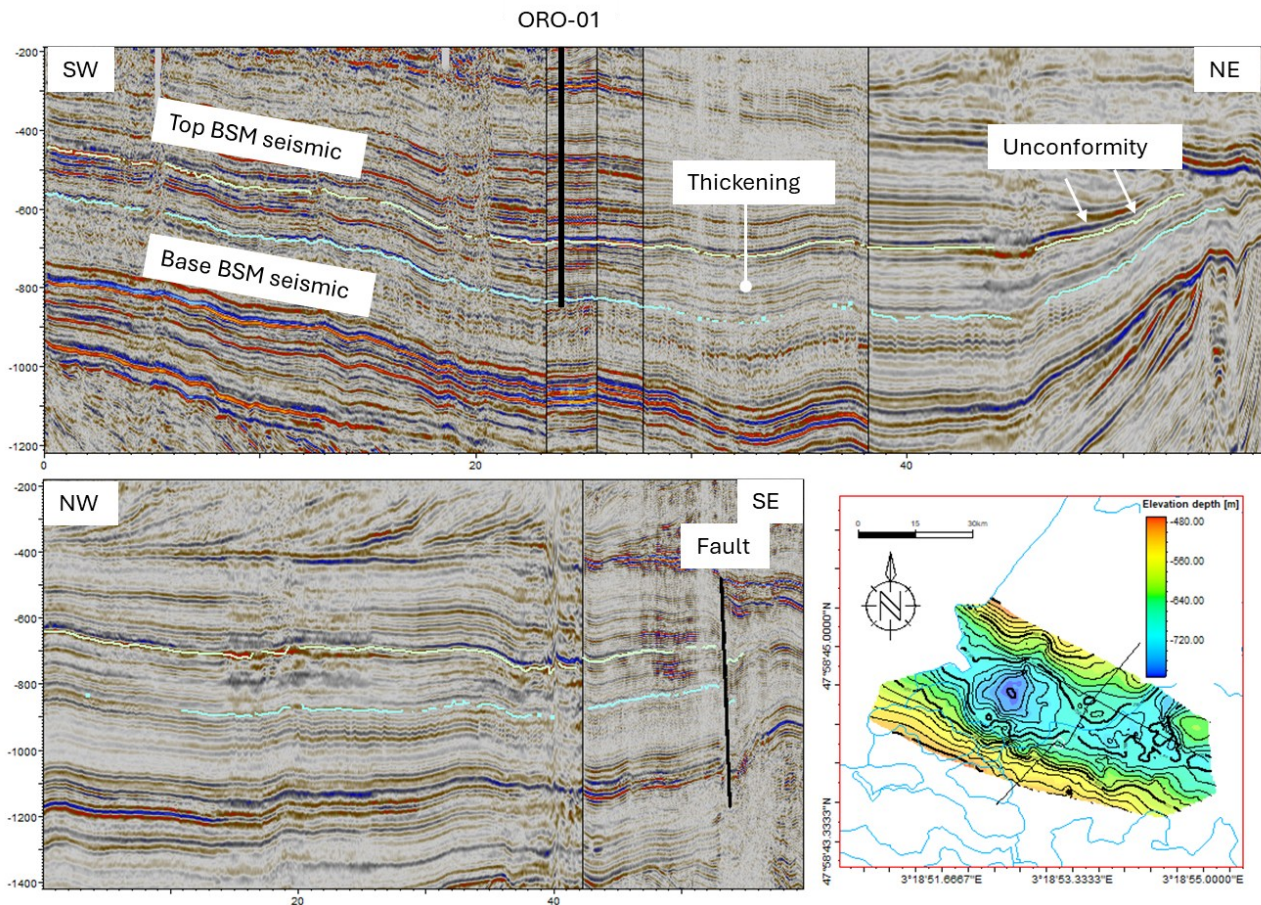
Echter achten we het betrouwbaarder om de piek (positieve amplitude) direct daaronder te selecteren als basis, gezien het veel helderdere en meer continu karakter van deze reflector binnen het gehele onderzoeksgebied. Net als bij de top van het Zand van Brussel Laagpakket beschouwen we deze reflector als voldoende representatief voor de geometrie van de basis van Zand van Brussel Laagpakket.



Figuur 6.2 Seismic-to-well tie tussen ORO-01 en L2EBN2023. Zie dat de gepikte horizons voor de top en base van het Zand van Brussel Laagpakket (Top / Base BSM seismic) zich onder de daadwerkelijke well tops bevinden (Top / Base BSM well).

6.3 Karteren van het Zand van Brussel Laagpakket

Na het QA/QC proces van de seismische reflectie data hebben we de boven- en ondergrens horizons van het Zand van Brussel Laagpakket binnen het onderzoeksgebied gekarteerd (seismische top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket in Figuur 6.3). De eerste iteratie is uitgevoerd met behulp van de 2D-autotrackingfunctie in Petrel. Gezien de relatief eenvoudige geometrie en de hoge laterale continuïteit van de reflectoren levert deze werkwijze goede resultaten op en kon het onderzoeksgebied snel in kaart worden gebracht.



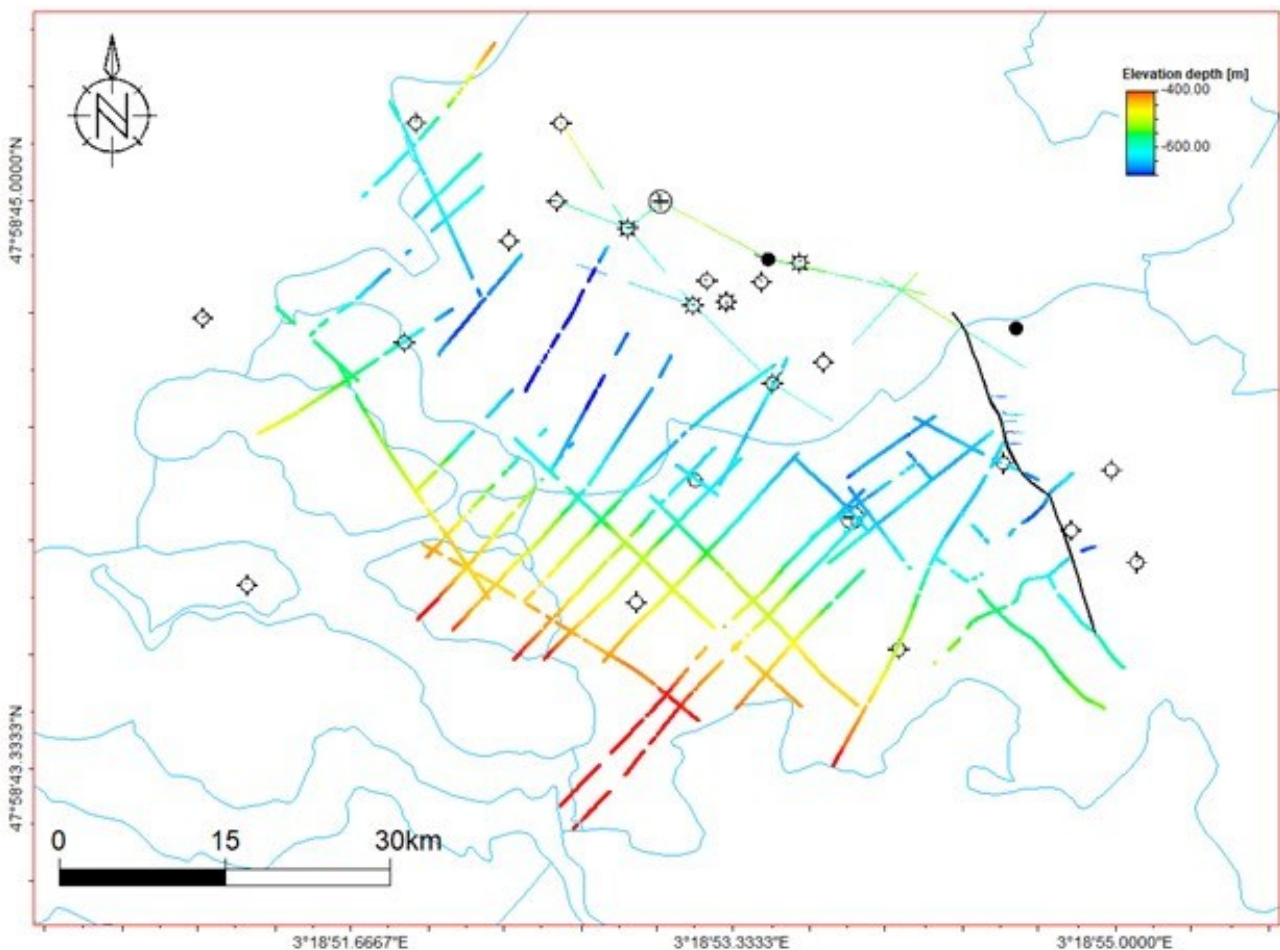
Figuur 6.3 Representatieve profielen die de interpretaties van de top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket (BSM) weergeven. De twee profielen zijn weergegeven op de kaart rechtsonder, welke tevens de top van het Zand van Brussel (bulk-shifted) weergeeft.

Vervolgens is de interpretatie handmatig gecontroleerd, waarbij de beschikbare bestaande interpretatie als referentie is gebruikt. Slechts één breuk in het oostelijke deel van het gebied veroorzaakt een duidelijke verschuiving van de reflectoren; in de buurt van deze breuk is de interpretatie handmatig uitgevoerd.

Binnen het onderzoeksgebied zijn beiden geïnterpreteerde horizons grotendeels continu. Over het algemeen wordt het Zand van Brussel Laagpakket dieper in het centrale deel van het onderzoeksgebied, waar de top een diepte van meer dan 700 m bereikt, en ondieper naar de flanken toe, waar de top plaatselijk op minder dan 500 m diepte ligt (Figuur 6.4). Er zijn geen interne

geometrieën in kaart gebracht. Op seismische schaal blijven de reflectoren relatief subparallel en intern continu.

In het noorden/noordoosten komt het Zand van Brussel Laagpakket aan de voet van de Rupel-discordantie aan het oppervlak, echter is deze geometrie niet in detail in kaart is gebracht omdat deze net buiten het onderzoeksgebied ligt. In het oostelijke deel van het onderzoeksgebied zorgt een NW-ZO-breuk voor een verschuiving van het Zand van Brussel Laagpakket. Deze breuk hebben we op het niveau van het Zand van Brussel Laagpakket geïnterpreteerd en in het geomodel verwerkt. Ten oosten van de breuk is het Zand van Brussel Laagpakket nog steeds aanwezig, maar toont deze een verminderde dikte.



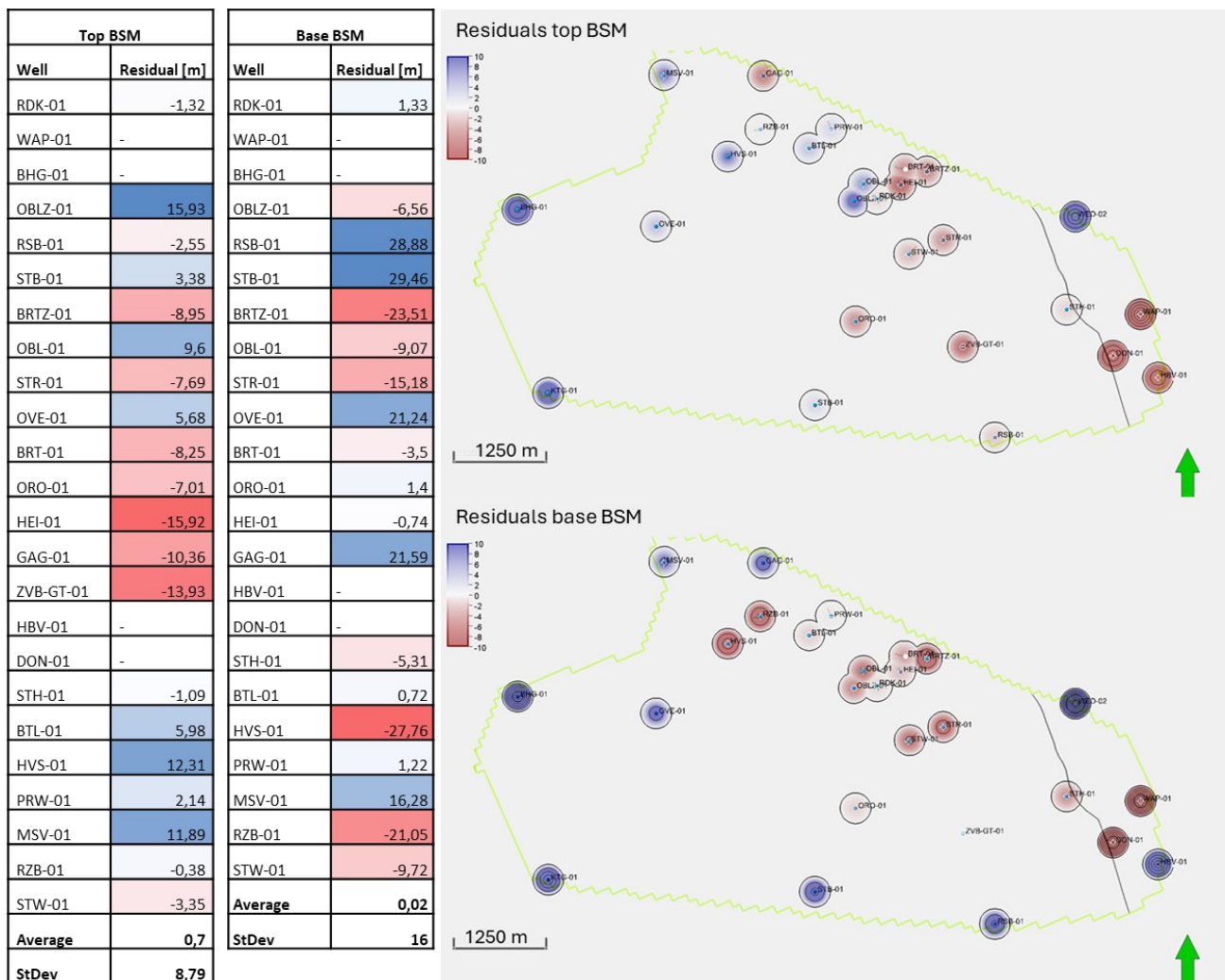
Figuur 6.4 Resultaat van de diepte interpretaties van de top Brussel Zand langs de seismische lijnen door het onderzoeksgebied.

6.4 Gridding, residuals, en diepteconversie

Nadat de top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket zijn gekarteerd, zijn de horizons omgezet in een TWT-raster van 500 × 500 m met behulp van het *convergent gridding* algoritme van Petrel. Vervolgens is een diepteconversie van de *surfaces* uitgevoerd met behulp van het regionale Velmod 4-model (Dalfsen *et al.*, 2006). Aangezien de onderburden niet relevant is voor het project, zijn alleen de secties van de Noordzee-supergroep en de Krijt-kalk meegenomen en is het model vanaf 3 km

onder het maaiveld afgesneden. Het snelheidsmodel is lateraal ook beperkt tot een gebied van ongeveer 92 × 72 km, welke net het onderzoeksgebied bestrijkt, wat de rekestijd tijdens de diepteconversie beperkte.

Vervolgens hebben we de *residuals* ten opzichte van de well tops in het onderzoeksgebied beoordeeld en middels een *residual* analyse eventuele resterende dieptefouten voor beide horizons (top en basis Zand van Brussel Laagpakket) gecorrigeerd. Hierbij waren enkele *residuals* te verwachten, aangezien de well tops een ander seismisch event (“*hanger*”) markeren in vergelijking met de geïnterpreteerde horizons.



Figuur 6.5 Residuals tussen de bulk-shifted grids en de well tops voor de top en basis Zand van Brussel Laagpakket.

De gemiddelde *residuals* van de top en basis horizons van het Zand van Brussel bedroegen aanvankelijk respectievelijk 47 en 17 m. Met behulp van deze gemiddelden hebben we vervolgens positieve *bulk shifts* toegepast op de top- en basis horizons, en hebben we de *residuals* opnieuw berekend. Na deze aanpassing bedragen de nieuwe gemiddelde *residuals* 0.7 en 0.02 m voor respectievelijk de top en basis horizons van het Zand van Brussel Laagpakket (Figuur 6.5). Deze lage

waarden komen overeen met de eenvoudige structurele opbouw en de verwachte uniforme snelheden in de overburden. Het is belangrijk om hier aan te geven dat de residuals van putten waaromheen geen seismische data zijn geïnterpreteerd niet zijn weergegeven in Figuur 6.5.

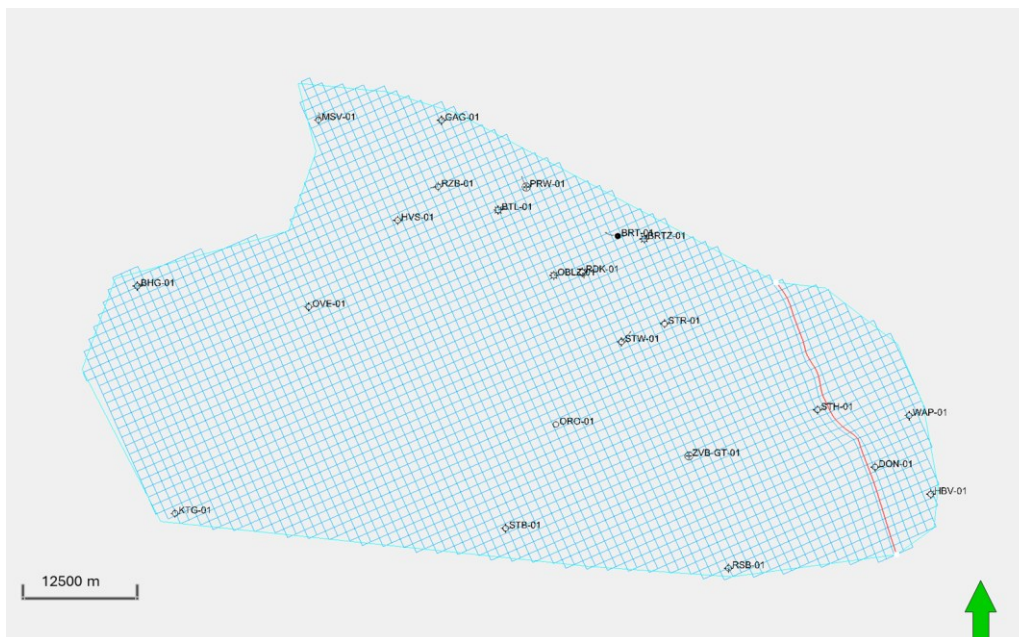
Vervolgens hebben we *residual* kaarten voor de boven- en onderkant van het Zand van Brussel Laagpakket berekend met behulp van *kriging*-interpolatie. Hierbij worden de *residuals* arithmetisch opgeteld bij de eerder naar diepte geconverteerde kaarten en gebruikt om het TNO Velmod-model te conditioneren. Dit geconditioneerde (“gekoppelde”) snelheidsmodel hebben we vervolgens gebruikt om de oorspronkelijke horizons en breuken naar diepte te converteren. Deze horizons dienen als de belangrijkste geometrische inputs voor het statische model.

7. Statisch model

Dit hoofdstuk beschrijft en presenteert de modelopzet en -validatie van een statisch reservoirmodel van het Zand van Brussel Laagpakket in het onderzoeksgebied. Het model is bijgewerkt met de recente inzichten van ORO-01 waarmee het een basis vormt voor actuele berekeningen van geothermische potentie. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste stappen voor het opzetten en uitvoeren van het statisch model uiteengezet, waaronder structureel modelleren, raster realisatie, modelzoning, horizondefinities, facies modellering, en het modelleren van de reservoir-eigenschappen. Het model bevat in totaal 26 putten die allen gebruikt zijn voor zoning en horizondefinities, waarvan elf putten met bruikbare log gegevens gebruikt zijn voor bepaling van reservoirkwaliteit. Van deze elf putten hebben we de CPI's (*Computer Processed Interpretation*) eerder in dit rapport beschreven en bijgevoegd in Appendix A.

7.1 Structureel model

De belangrijkste input voor het breukmodel zijn de breukvlakken en -polygoenen uit onze seismische interpretatie. Binnen het onderzoeksgebied hebben we een enkele breuk met een ZO-NW oriëntatie gekarteerd welke in het model is geïntegreerd (Figuur 1.1). Dit is gedaan om de relevante offset putten in de hangwand (*“hanging-wall”*) aan de NO-zijde van deze breuk ook in het model te kunnen integreren. Deze geïnterpreteerde breukvlakken zijn vervolgens omgezet naar een kolom netwerk (*“pillar grid”*) breukstructuur en aangepast door onder andere *smoothing* en *shortening* om overmatig vervormde cellen in het uiteindelijke netwerk te voorkomen. Bij deze ingrepen hebben we *gids-horizons* gebruikt zodat de daadwerkelijke breukgeometrie gewaarborgd blijft. Dit resulteert in een modelnetwerk zonder significante celvervorming of cellen met negatief volume.

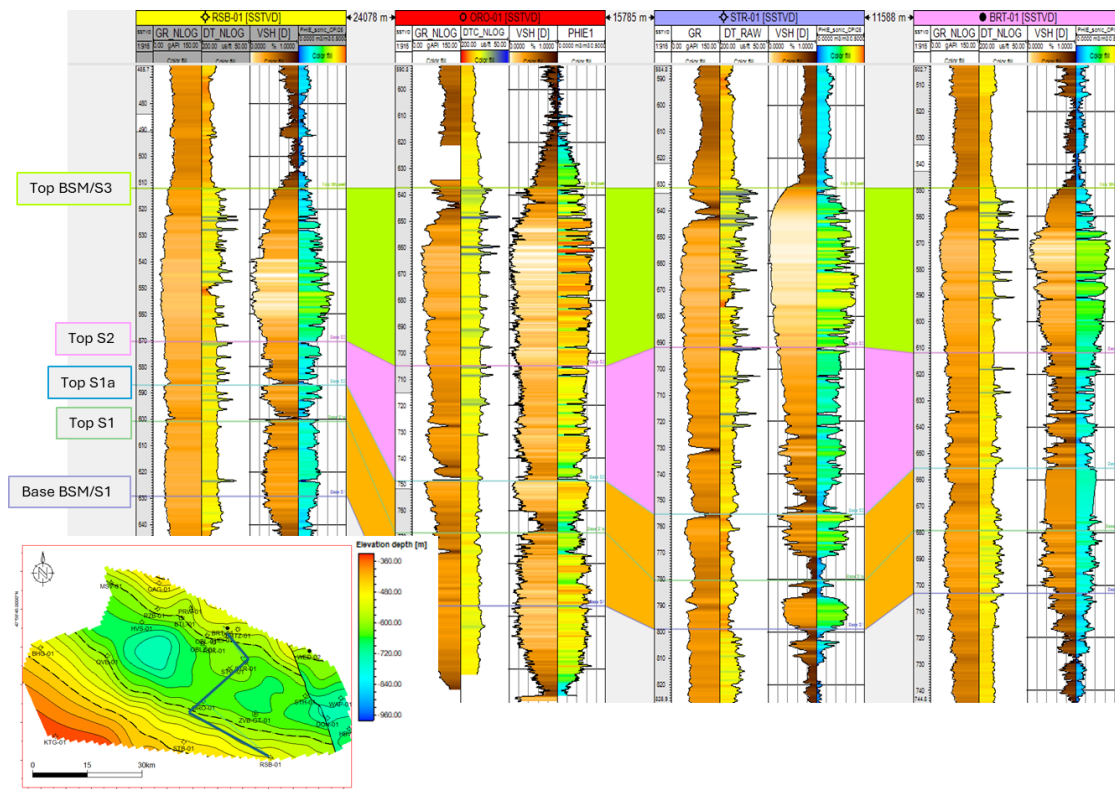


Figuur 7.1 Top geraamte statisch model. De rode lijn weergeeft de gekarteerde breuk.

7.2 Put correlatie en reservoirzoning

Voor de definitie van modelzones gebruiken we het WarmingUp stratigrafische raamwerk ("Brussels_Sequences_Work_Def_SH_TNO"), aangezien de nieuwe ORO-01 put geen sterke aanleiding geeft om hier van af te wijken. Deze keuzes zijn verder toegelicht in sectie 4.2.

Echter hebben we wel voor aangepaste interpretatie van de boorgatmetingen gekozen zoals ook toegelicht in Hoofdstuk 4, waarbij *Vshale*, DT en PHIE leidend zijn bij het plaatsen van de zoning. Zo kan bijvoorbeeld op basis van enkel het GR-sigitaal een glauconietzone onterecht worden geïnterpreteerd als een klei-interval omdat deze beiden positieve GR uitschieters teweegbrengen (Figuur 7.2).



Figuur 7.2 Stratigrafische correlatie en modelzoning. De hoge GR waarden vlak onder de top van het Zand van Brussel Laagpakket in zowel ORO-01 als STR-01 komen niet overeen met hoge *Vshale* waarden uit onze CPI.

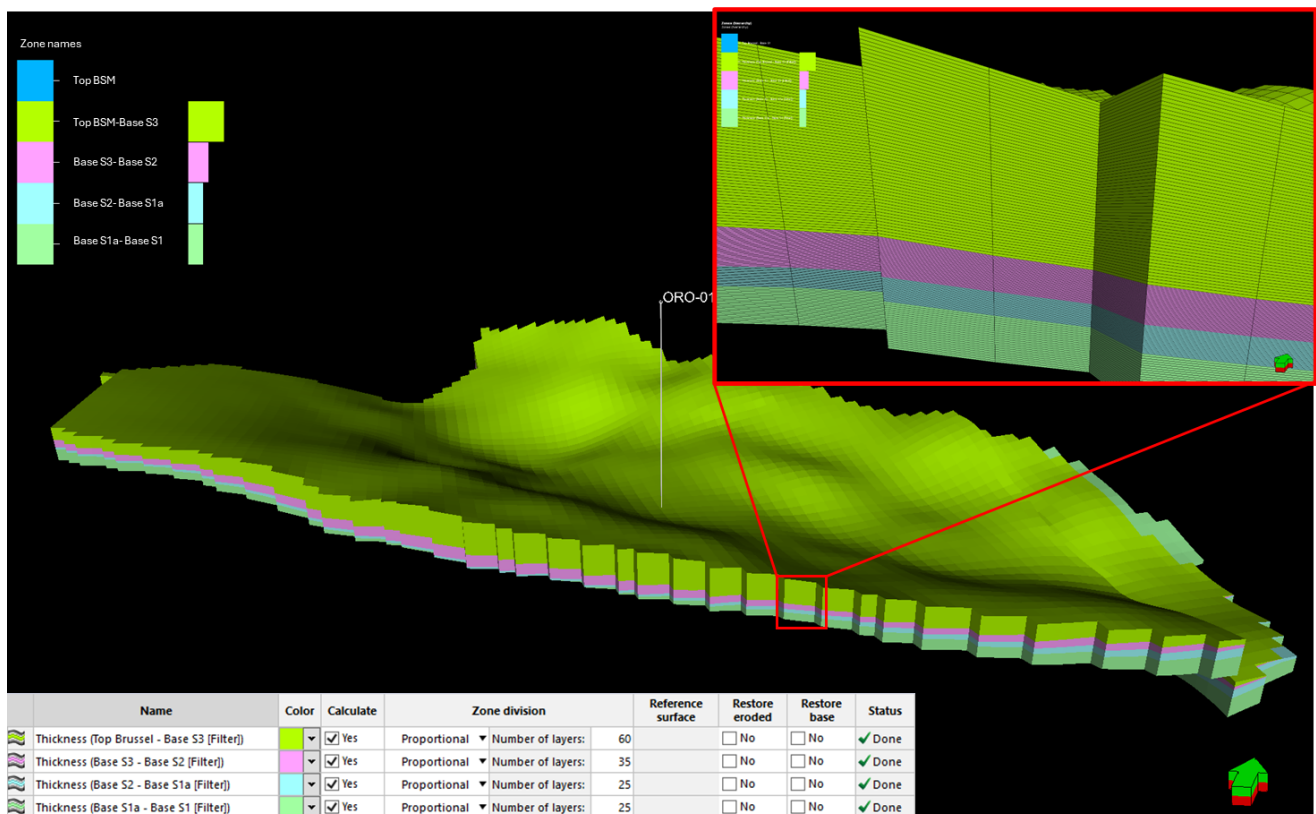
De top en basis van het Zand van Brussel Laagpakket zijn in het statisch model gedefinieerd op basis van de geïnterpreteerde seismische horizons. Omwille van eenvoud zijn beide horizons als conform gemodelleerd (Figuur 7.3). In het oostelijke deel van het model is een kleine hoekdiscordantie aanwezig, echter hebben we door het beperkte laterale bereik van deze structuur niet gekozen voor een wijziging van het type horizon. Op de horizons is bovendien *smoothing* toegepast om artefacten in het model te voorkomen. Dit leidt niet tot een overschatting van de dikte van de beste zandige eenheden omdat er voldoende well control is in de zones van het onderzoeksgebied waar de hoekdiscordantie leidt tot een diktereductie van de S3 eenheid van het Zand van Brussel Laagpakket, en omdat in deze zone voldoende seismische interpretaties bevat.

Index	Horizon name	Color	Calculate	Horizon type	Conform to another horizon	Status	Smooth iterations	Use horizon-fault lines	Well tops	Input #1	
1	Top Brussel		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Conformable	No	1	✓ Done	10	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Top Brussel (Warming_UP_SprouleERCE_CPI26)	Top Brussel EC - fault
2	Base S1		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Conformable	No	1	✓ Done	10	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Base S1 (Warming_UP_SprouleERCE_CPI26)	Base Brussel EC - fault

Figuur 7.3 Data inputs for the horizon model.

De overige zones zijn gegenereerd met op put data gebaseerde *isochores* (Figuur 7.4). De dikte is berekend op basis van put tops en verwerkt met de *isochore*-algoritmes van Petrel. De laagdikte is dusdanig gekozen dat de verticale variabiliteit van de reservoir eigenschappen goed wordt vertegenwoordigd.

De laagdikte is vervolgens geschat door verticale porositeitslog variogrammen te berekenen. Het variogram geeft een verticaal bereik van ongeveer 2 m, waarboven de ruimtelijke continuïteit afneemt. Dit bereik definieert de diktegrens waarboven correlatie van reservoir eigenschappen minder waarschijnlijk wordt. Echter zou een laagdikte van 2 m te grof zijn om de dunne calciet-gecementeerde banken op een schaal van 0.2–1 m goed te representeren. Daarom is gekozen voor een laagdikte van 0.5 m om deze gecementeerde horizons vertegenwoordigd te hebben in het model. Een fijnere laagindeling verhoogt de rekentijd aanzienlijk en introduceert tevens extra ruis in het model.



Figuur 7.4 Geomodel horizons and zones.

7.3 Facies modelling

Op basis van CPI-drempelwaardes en geologische trends en inzichten uit de ORO-01 kernstudie hebben wij een facies model ontwikkeld. Met dit facies model zijn de porositeits- en permeabiliteitsmodellen geconditioneerd.

De vier hoofdfacies zijn op putschaal gediscrèteerd op basis van de volgende CPI-drempelwaardes:

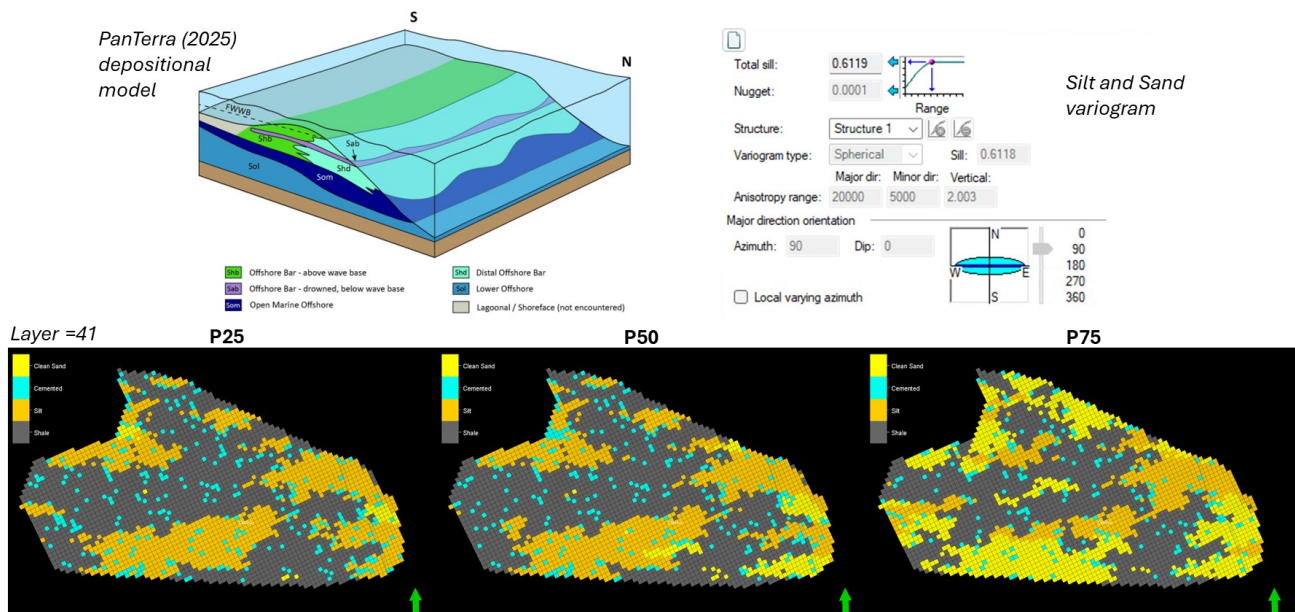
- **Sand (zand):** $V_{shale} < 25\%$ en $PHIE > 20\%$
- **Silt:** $25\% < V_{shale} < 50\%$ en $PHIE > 20\%$
- **Calcite (calciet):** $DT < 110$ ft/s
- **Shale (klei/schalie):** $V_{shale} > 50\%$ en $PHIE < 20\%$

Hierna zijn deze facies opgeschaald van put- naar geomodelschaal door middel van het Petrel “most of” algoritme. Vervolgens zijn de volgende drie deterministische opgeschaalde scenario's vastgesteld om mogelijke onzekerheden af te vangen die tijdens interpretatie en/of opschaling geïntroduceerd zijn:

- **Low-case** (P25 – lagere zandfractie)
- **Mid-case** (P50 – trouw aan putdata)
- **High-case** (P75 – hogere zandfractie)

Enkel de zandfractie is gevarieerd bij het opstellen van de Low en High cases, waarna de fracties van de andere drie facies opnieuw berekend zijn. Hierbij gebruiken we vervolgens elk scenario als input voor het 3D facies model resulterend in drie facies modellen met bijbehorende porositeits- en permeabiliteitsmodellen. Deze methode stelt ons in staat om goed om te gaan met de onzekerheden in faciesverspreiding (Figuur 7.5).

Voor de faciesmodellering gaan we uit van een *sequence stratigraphic model framework*, en hebben we een verticale variogram voor elke facies in elke zone berekend (Figuur 7.5). Horizontale variogrammen zijn gedefinieerd op basis van het voor ORO-01 ontwikkelde afzettingsmodel (PanTerra, 2025), welke een O-W georiënteerde paleo-kustlijn interpreteert. Deze strekking geldt dan ook als hoofdrichting voor het modelleren van zand-, silt- en calcietfracties. Hierbij wordt aangenomen dat de ondiep mariene *shoreface* sedimenten bij benadering kust-parallel werden afgezet. Voor de kleifracie (V_{shale}) hebben we voor een N-Z strekking als hoofdrichting gekozen welke transgressieve periodes loodrecht op de kustlijn vertegenwoordigd. Laterale continuïteit wordt gewaarborgd door een anisotropie-bereik van 40 km in zowel de hoofd- als bij-richtingen van de klei-facies toe te passen. De facies modellering wordt uitgevoerd met het Petrel *Sequential Gaussian Simulation* algoritme.



Figuur 7.5 Bovenanzicht van het facies model voor de drie verschillende scenario's. Een toename in de zandfractie (in geel) van P25 naar P75 is zichtbaar. Rechtsboven zijn de variogram-instellingen voor de zand- en silfracties weergegeven.

7.4 Property modelling

De petrofysische eigenschappen zijn afgeleid uit de CPI's van ORO-01 en de nabijgelegen offset putten. Aangezien niet alle putten die voor de putcorrelatie en de reservoirzoning zijn gebruikt over een volledige en toereikende reeks loggegevens beschikken om de reservoirkenmerken te berekenen, zijn slechts elf van de 26 putten gebruikt bij de reservoirzoning voor de petrofysische modellering. De *property modelling workflow* in Petrel is gericht op de modellering van de *Vshale*, en totale en effectieve porositeit en permeabiliteit.

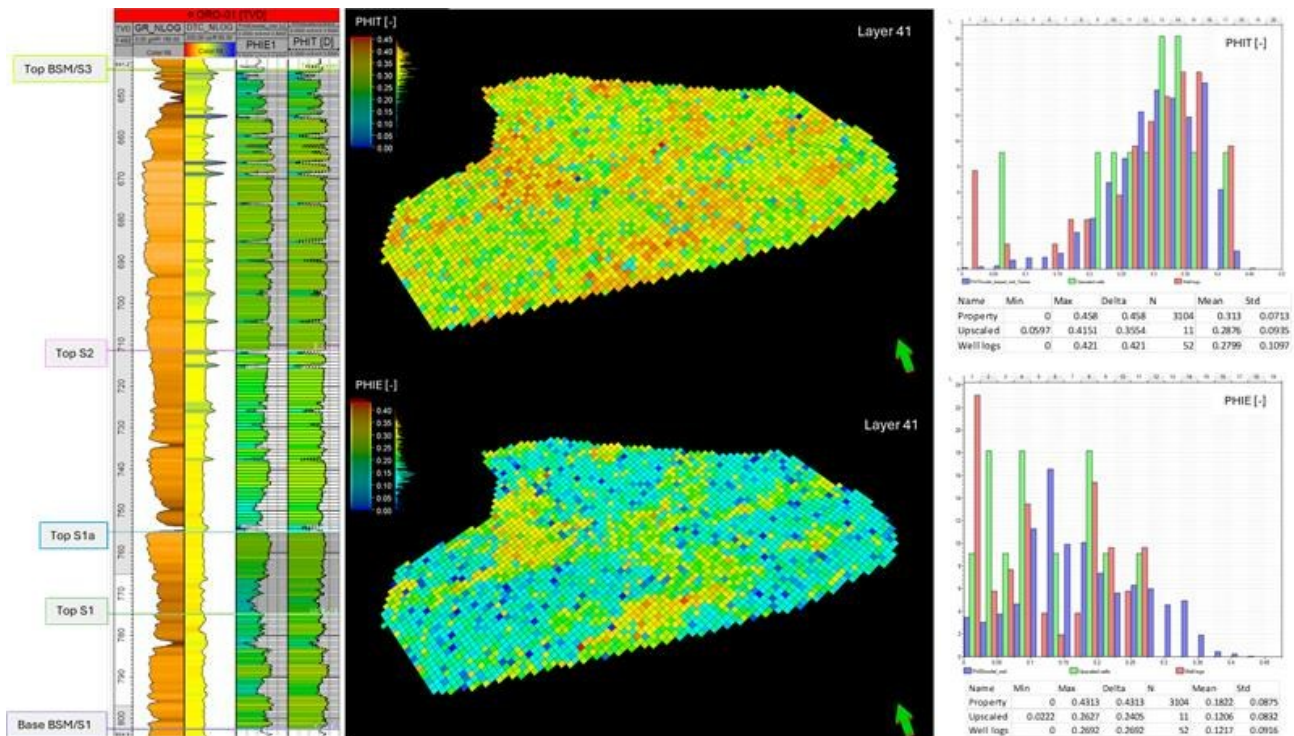
7.4.1 Porositeit

Als eerst hebben we de logs van de totale en effectieve porositeit "*ge-upscaled*" aan de hand van een *arithmetic average*, en is deze afgestemd op het faciesmodel om ervoor te zorgen dat de verdeling van de eigenschappen consistent blijft met het geologische framework en de faciesarchitectuur.

Vervolgens hebben we de porositeit afzonderlijk per zone gemodelleerd met behulp van het *Sequential Gaussian Simulation* (SGS)-algoritme, afgestemd op het bestaande faciesmodel. Deze aanpak zorgt ervoor dat het model zowel de put data als de faciesverdeling in acht wordt genomen bij het schatten van porositeitswaarden in cellen zonder put controle. Deze workflow is vervolgens herhaald voor de drie verschillende faciesmodellen, wat resulteert in drie overeenkomstige porositeitsmodellen.

Met behulp van de data-analyse module van Petrel gekalibreerd door geologische facies hebben we de datatransformaties en variogrammen afgeleid. Vervolgens hebben we de porositeitswaarden genormaliseerd zodat deze beter aansluit bij de putgegevens. Hierbij is een output truncatie van 0.5 is toegepast.

Vervolgens hebben we gebruik gemaakt van de stochastische simulatieprocedure in Petrel aan de hand een variogrammodel voor elke lithofacies of zone, waarin het ruimtelijke correlatiegedrag van de gesimuleerde eigenschap wordt beschreven. Na deze simulatie hebben we de porositeitshistogrammen uit de loggegevens-, opgeschaalde resolutie en modelschaal vergeleken om te verifiëren dat de eigenschapsverdeling consistent blijft over de schalen heen (Figuur 7.6).

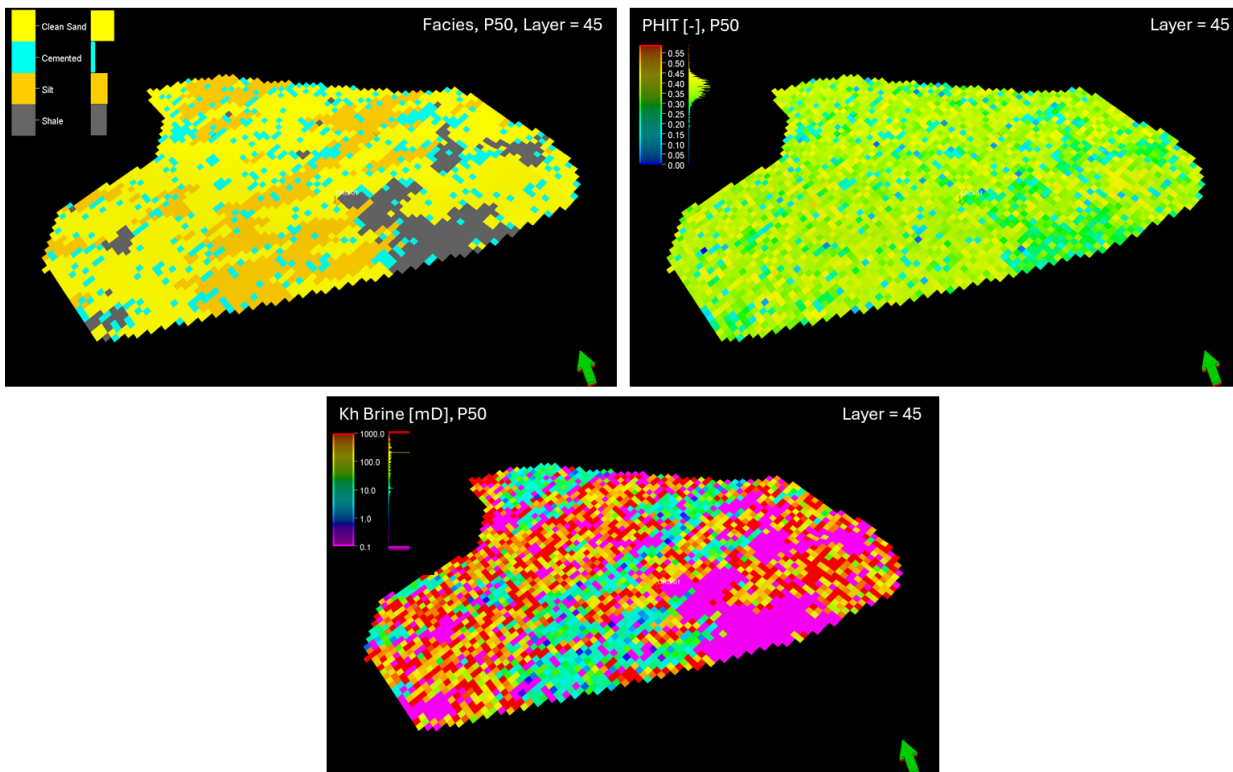


Figuur 7.6 Van links naar rechts: upscaled PHIE en PHIT, PHIT (boven) en PHIE (onder) Z-slide (laag 41 door de S3-eenheid), en eigenschapsstatistieken voor PHIT (boven) en PHIE (onder). Het bovenstaande is representatief voor het P50-scenario.

7.4.2 Permeabiliteit

Nadat we de porositeit voor het gehele modeldomein hebben berekend, is het permeabiliteitsmodel gegenereerd met behulp van de Petrel calculator. Bij deze berekeningen hebben we gebruik gemaakt van de regressies afgeleide uit de CPI (zie sectie 4.5.3). Hierbij hebben we twee regressies gebruikt: een voor zand, en een voor silt. Vervolgens hebben we de permeabiliteit in de calciet- en shale facies op 0.1 mD “ge-hardcode”, aangezien deze facies worden beschouwd als grotendeels ondoordringbaar en dus niet bijdragen aan de vloeistofstroming.

Vervolgens is de gas permeabiliteit berekend, en hebben we een truncatie toegepast bij 1000 mD voor silt en bij 3000 mD voor zand. De waarden voor de gas permeabiliteit hebben we vervolgens omgerekend naar brijn permeabiliteit met behulp vergelijkingen uit de RCA-analyse van ORO-01 (zie sectie 4.5.3). De resulterende permeabiliteitsmodellen tonen een positieve correlatie met de porositeitsdistributie (Figuur 7.7).



Figuur 7.7 Example of the facies model and PHIT model used as input for the P50 horizontal permeability calculation. The resulting permeability distribution is strongly controlled by the facies model.

7.5 Zonekaarten

Vervolgens zijn op basis van het property model kaarten geaggregeerd per zone. Vijf parameters zijn hierbij berekend: Net-to-gross, Vshale, LPSC, en permeabiliteit. De keuze voor deze parameters wordt onderbouwd in de toelichting bij de potentieberekeningen in sectie 8.1.1.

7.5.1 Net-to-gross

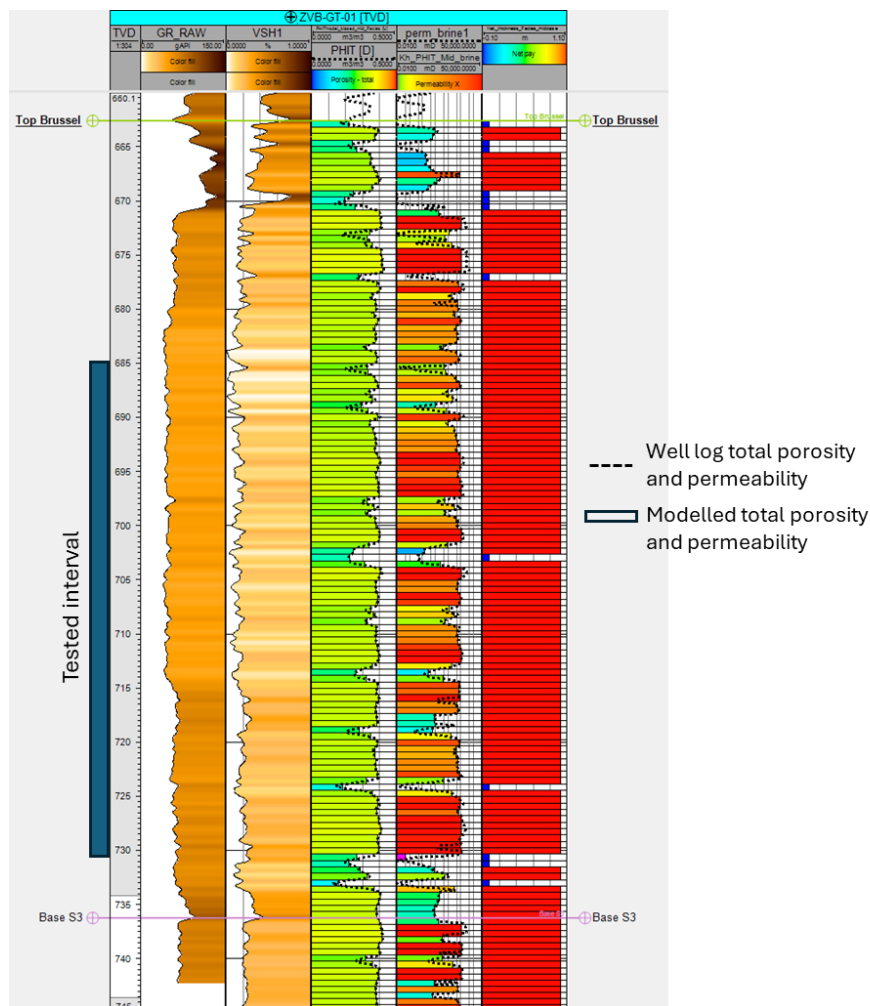
Net-to-gross is op basis van het permeabiliteitsmodel (sectie 7.4.2) per zone berekend aan de hand van de cut-offs. De onderbouwing van de gebruikte cut-offs is beschreven in sectie 4.6.

7.5.2 Vshale, LPSC, permeabiliteit

Voor de meeste parameters is een *rekenkundig gemiddelde* (“arithmetic average”) toegepast om de attribootkaarten te genereren. Echter voor de netto brijn permeabiliteit gebruiken we een *meetkundig gemiddelde*-benadering (“geometric average”) over de vier stratigrafische eenheden en de drie scenario’s. Dit is gedaan in verband met een betere kalibratie met de put data, met name bij ORO-01.

Bij ORO-01 resulteert het gemodelleerde *meetkundig gemiddelde* in een mid-case permeabiliteit van 148 mD voor het volledige Zand van Brussel Laagpakket. Dit komt goed overeen met de permeabiliteit van 160 mD afgeleid uit de puttesten. Als gevolg van de aannames bij het upscalen, zijn zulke kleine afwijkingen normaal en in de lijn der verwachting.

Echter bij ZVB-GT-01 leidt dezelfde *meetkundig gemiddelde*-benadering tot een permeabiliteit van slechts 125 mD, wat lager is dan de 696 mD verkregen uit de interpretatie van diens putttest. De put test van ZVB-GT-01 betrof echter slechts een interval van 45 m TVD, en het gemiddelde werd vervolgens berekend met een *rekenkundig gemiddelde* over dit netto-interval. Wanneer wij ons gemodelleerde *meetkundig gemiddelde* beperken tot hetzelfde interval, neemt de berekende permeabiliteit toe tot ~285 mD. En als een *meetkundig gemiddelde* in plaats van een *rekenkundig gemiddelde* wordt toegepast op het permeabiliteitslog van ZVB-GT-01 (zie sectie 4.5.4.2), dan is de berekende permeabiliteit slechts ~328 mD. Dit geeft aan dat bij ZVB-GT-01 onze modellering-methode de put test data van ZVB-GT-01 redelijk representeert wanneer we consistent het *meetkundig gemiddelde* voor permeabiliteit gebruiken. Tevens wordt de overeenkomst tussen de permeabiliteit uit de log data en de gemodelleerde permeabiliteit in ZVB-GT-01 ook bevestigd bij de vergelijking van de permeabiliteitslog uit de CPI met de permeabiliteit van het statische model (Figuur 7.8).



Figuur 7.8 Match tussen de mid case totale porositeit en de Brijn permeabiliteit voor de ZVB-GT-01 put.

Echter blijkt uit de analyse over het gehele modeldomein dat beide putten niet volledig kunnen worden gerepresenteerd met één consistente gemiddelde-methode. In deze context wordt prioriteit gegeven

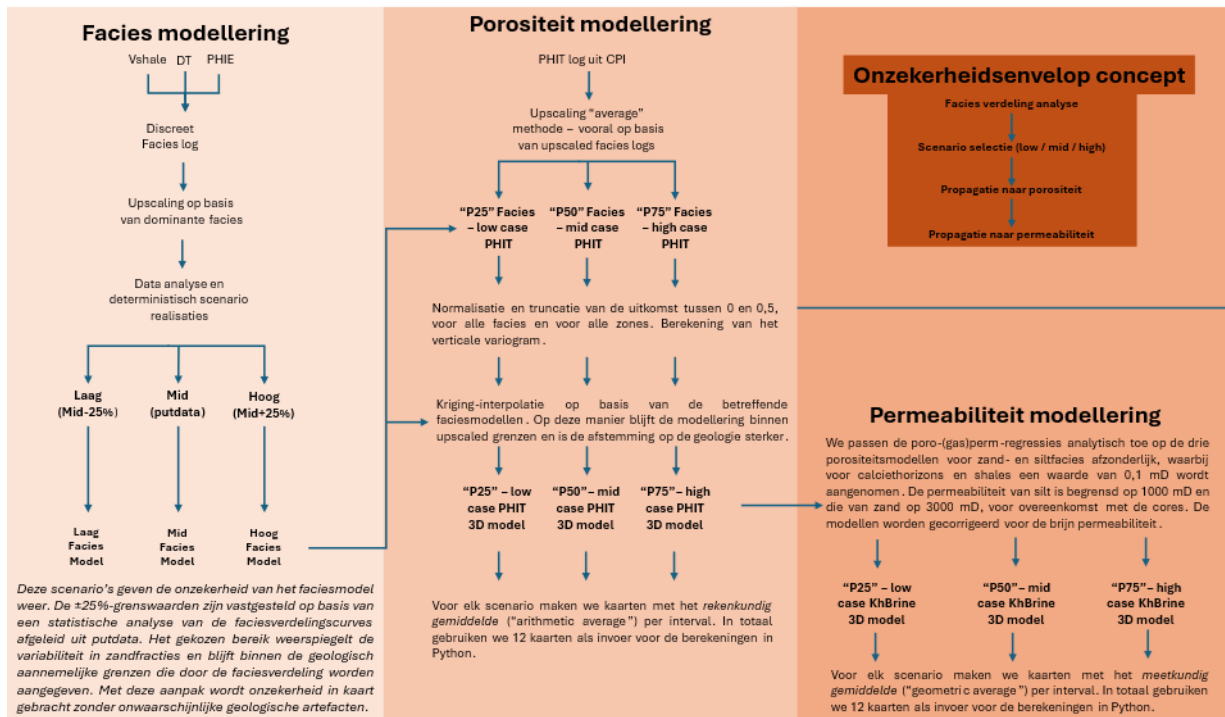
aan het matchen van ORO-01, aangezien deze put over een vollediger verticale penetratie van het Zand van Brussel Laagpakket beschikt, en in het algemeen robuustere data bevat. Voor verticale putten in gelaagde systemen is het gebruik van een *meetkundig gemiddelde* doorgaans meer geschikt, omdat hiermee de laag-permeabele barrières, welke impact hebben op de stroming, beter worden meegenomen in het model en een conservatieve schatting geven. Daarentegen is een *rekenkundig gemiddelde* juist beter geschikt voor meer homogene, lateraal continue laagpakketten, zoals bij sub-horizontale putten als ZVB-GT-01.

Het toepassen van een *rekenkundig gemiddelde* over het volledige model zou dus leiden tot een betere overeenkomst met de data van ZVB-GT-01, echter reproduceert het niet de data van ORO-01. Daarom geven wij voor onze studie voor het volledige modeldomein een voorkeur voor de *meetkundig gemiddelde*-methode. Echter benadrukken wij dat de potentiële upside wordt gepresenteerd in het hogere (P75) scenario (zie sectie 7.6).

7.6 Onzekerheden

In dit onderzoek hebben we ervoor gekozen om de geologische onzekerheid in kaart te brengen en deze consistent door te voeren in het statische modelleringsproces. Figuur 7.9 weergeeft de workflow hiervoor. De facies logs afkomstig van *Vshale*, PHIE en DT zijn “*ge-upscaled*” met behulp van een *most-of*-methode. Op basis van statistische analyse van de faciesverhoudingscurves op boorgatschaal definiëren we drie scenario’s voor de zandfractie (laag, gemiddeld, hoog). Vervolgens selecteren we een $\pm 25\%$ -envelop rond het basisscenario, geselecteerd om de variabiliteit in de faciesdistributie vast te leggen, mits deze binnen geologisch acceptabele grenzen blijft. Deze facies-scenario's bepalen vervolgens de modellering van *petrophysical averages*. In onze workflow *upscalen* en interpoleren we de porositeitslogs met behulp van *kriging* binnen elk facies-scenario, waardoor overeenkomstige modellen met lage, gemiddelde en hoge porositeit worden gegenereerd.

Vervolgens leiden we drie permeabiliteitsmodellen (laag, gemiddeld en hoog) af met behulp van de eerder beschreven porositeit-permeabiliteitsregressies voor zand- en siltfacies, waarbij we geologisch passende begrenzingen aanhouden. Hierbij is het niet zo dat verschillende poroperm relaties worden gehanteerd, dit zijn overal de relaties uit Figuur 4.4. Wel is het zo dat de eigenschap van *clean sand* varieert per model, met als resultante een andere permeabiliteit. Deze methode zorgt ervoor dat de onzekerheid die op faciesniveau wordt geïntroduceerd, consistent wordt doorgegeven aan de porositeit en permeabiliteit. Ten slotte genereren we voor elke laag en voor elk modelscenario kaarten met eigenschappen gemaakt met behulp van een algoritme voor het *arithmetic average*. Deze kaarten gebruiken we vervolgens als input voor de geothermische potentieberekening in Python. Deze workflow is schematisch weergegeven in Figuur 8.1 in Hoofdstuk 8.



Figuur 7.9 Workflow voor het bepalen van onzekerheidskaarten van het property model.

8. Toepassing van geothermie

8.1 Van statisch model naar potentiekaarten

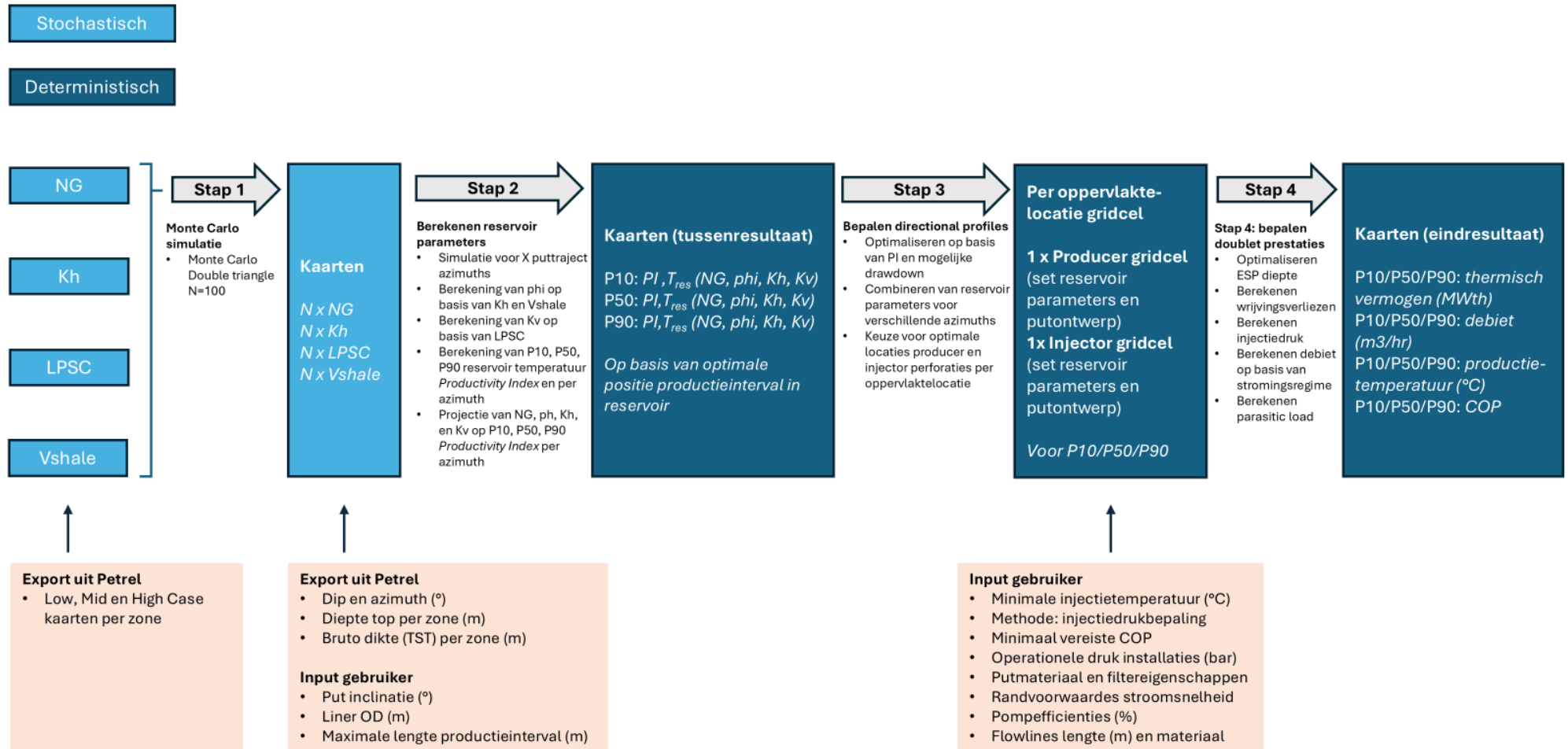
In dit hoofdstuk zijn de stappen beschreven die zijn genomen om het geologische model van het Zand van Brussel Laagpakket om te zetten naar geothermische potentiekaarten. Deze methodiek bestaat uit vier stappen, schematisch weergegeven in Figuur 8.1.

8.1.1 Stap 1: Monte Carlo simulatie

Allereerst zijn normaalverdelingen gemaakt op basis van de low-, mid-, en high-case kaarten van de reservoir eigenschappen beschreven in sectie 7.4. Een asymmetrische normaalverdeling is mogelijk gemaakt door toepassing van de *double triangle* methode, zoals beschreven in Mijnlief *et al.* (2014). Hierbij ligt de focus op de volgende eigenschappen:

- **Net-to-gross (-)** en **horizontale permeabiliteit (mD)** omdat deze als onafhankelijke parameters in de productiviteitsvergelijking zijn opgenomen;
- **LPSC (-)** naar de definitie uit Geel *et al.* (2022) omdat deze kan worden afgeleid uit het statisch model, en gerelateerd kan worden aan verticale permeabiliteit. Deze is noodzakelijk voor het bepalen van de effecten van anisotropie die bij gedeveerde en horizontale putten de productiviteitsindex (PI) aanzienlijk kunnen beïnvloeden;
- **Vshale (-)** omdat het *shale volume* bepalend is voor de *poroperm* relatie die moet worden gebruikt om horizontale permeabiliteit aan porositeit te relateren (zie Hoofdstuk 4). Porositeit is niet noodzakelijk voor het berekenen van de productiviteitsindex maar kan wel worden gebruikt voor het inschatten van de *Geothermal Area of Interest* (GT-AoI) (Mijnlief *et al.*, 2023). De GT-AoI is een inschatting van maximale laterale bereik van de invloed van een aardwarmtesysteem in het reservoir en geeft onder andere inzicht in de thermische doorbraaktijd van het systeem. In onze studie is de GT-AoI gebruikt om het maximale debiet van een geothermiesysteem te begrenzen.

Voor de geometrische parameters zoals bruto *true stratigraphic thickness*, diepte, *dip angle*, en *dip azimuth* zijn geen low-, mid-, en high-case kaarten gegenereerd. In dit onderzoek berekenen we namelijk een zeer lage *average residual* (zie sectie 6.4), waardoor geen significante onzekerheden worden verwacht in de geometrie van het Zand van Brussel Laagpakket. In totaal zijn 100 Monte Carlo simulaties per zone van het Zand van Brussel Laagpakket uitgevoerd, en per bovengenoemde geologische parameter. Het resultaat is 100 scenario's met variërende geologische eigenschappen per zone, binnen het domein tussen de low- en high-case kaarten uit sectie 7.4.



Figuur 8.1 Stappenplan voor het converteren van het statisch model naar geothermische potentiekaarten.

Aan de hand van deze 100 scenario's kunnen 100 instanties van transmissiviteit (in Dm) voor het gehele Zand van Brussel Laagpakket worden berekend door deze eerst per zone te berekenen, en daarna te sommeren. Op basis van de spreiding van de transmissiviteit in de 100 simulaties kunnen P10, P50, en P90 waardes worden herleid. De transmissiviteit is de meest objectieve graadmeter voor het vergelijken van de resultaten van dit onderzoek met eerdere publicaties, omdat deze volledig onafhankelijk is van putontwerpen en productietechnologie, waarvoor vaak verschillende aannames worden gedaan. De vergelijking van de P10, P50, en P90 transmissiviteit met eerdere publicaties wordt gedaan in sectie 8.1.2.

8.1.2 Stap 2: Berekenen reservoir parameters

Verschillende reservoir parameters zijn relevant voor verschillende geothermie concepten. In dit onderzoek ligt de focus op hydrothermische systemen waarbij *in-situ* formatiewater (brijn) via een productieput uit het aquifer/reservoir wordt gepompt, aan het oppervlak wordt afgekoeld en vervolgens middels een injectieput terug in het aquifer/reservoir wordt geïnjecteerd. Dit gebeurt doorgaans met een doublet: een combinatie van één producer en een injector. Er zijn concepten waarbij er sprake is van een triplet, meestal met twee injectieputten, maar in deze studie worden alleen berekeningen uitgevoerd op basis van een doublet. De aanname is dat op basis van de (tussen)resultaten uit deze studie relatief gemakkelijk de potentie van alternatieve concepten kan worden herleid.

Voor het beoordelen van de ondergrondse kansen voor geothermie zijn naast bepaalde puteigenschappen ook de volgende parameters van belang: (i) permeabiliteit, (ii) porositeit, (iii) reservoirtemperatuur en viscositeit, (iv) *anisotropy index* (op basis van de aanwezigheid van calciet gecementeerde lagen), (v) debiet, (vi) productietemperatuur, (vii) warmtecapaciteit, en (viii) hulpvermogen van belang.

- **Stap 2** omvat de bepaling van de eerste vier parameters (*i – iv*). Deze zijn nodig voor het bepalen van de productiviteitsindex (PI) welke in $\text{m}^3/\text{u}/\text{bar}$ wordt uitgedrukt en een maat is voor het gemak waarmee brijn van het reservoir naar de put kan worden verplaatst.
- **Stap 3** omvat geen bepaling van modelparameters, maar de optimalisatie van het doubletontwerp op basis van een bovengrondse locatie.
- **Stap 4** omvat de bepaling van de laatste vier parameters (*v – viii*). Deze zijn een maat van de efficiëntie waarmee brijn van het reservoir via de put naar de bovengrond kan worden verpompt, thermische energie aan het oppervlak uit de brijn kan worden onttrokken, en de brijn vervolgens via een injectieput weer terug het reservoir in kan worden geïnjecteerd.

8.1.2.1 Puteigenschappen

Bij het berekenen van reservoir eigenschappen is het van belang om al aannames te doen over de drie aspecten van de productie- en injectieput:

1. De diameter van de productie liner in het reservoir is van belang voor de berekening van de PI. Dit geldt voor verschillende stromingsregimes van verticale putten (*Darcy radial flow*) tot horizontale putten (*linear flow* en *radial flow*). In sectie 8.1.2.9 wordt dit verder toegelicht.
2. De horizontale afstand tussen de reservoir perforaties van de producer en injector is ook een belangrijke inputwaarde in de productiviteitsvergelijkingen voor verschillende stromingsregimes. Hoe verder de putten van elkaar worden geplaatst, hoe slechter de drukcommunicatie tussen beide putten, en des te meer pomparbeid moet worden verricht om een bepaalde stroomsnelheid tussen de putten te realiseren. De begrenzing van de maximale putafstand wordt besproken in sectie 8.3.2.1. Voor de reservoir parameters is met name de minimale putafstand van belang, omdat deze bepalend is voor de minimale putinclinatie θ_{min} (zie Paneel a in Figuur 8.2). Deze putinclinatie heeft invloed op geometrische skin, effecten van anisotropie op de PI, en, in gevallen waarin het productie- en injectie interval niet het volledige reservoir bestrijken, de gemiddelde permeabiliteit. Een te lage putafstand kan resulteren in vroegtijdige thermische doorbraak bij hoge productie-debietten.
3. Ten slotte is de omvang en de plaatsing van het productie- en injectie-interval binnen het reservoir van belang voor de gemiddelde reservoir eigenschappen. De bruto dikte van het volledige Zand van Brussel Laagpakket is ongeveer 150 meter. De gemiddelde bruto dikte van het bovenste productieve interval in het Zand van Brussel Laagpakket is ongeveer 85 meter. Voor een verticale put zou een productie-interval van 85 m voldoende zijn voor productie uit de volledige bovenste productieve zone in het Zand van Brussel Laagpakket. Voor een put met een inclinatie van 65° zou in de bovenste productieve laag een productie interval van maximaal 201 meter kunnen worden gepast, aannemende dat de laag horizontaal is (zie Paneel a in Figuur 8.2). Voor een horizontale put zou de lengte van het theoretisch mogelijke productie interval in de put technische begrenzingen overschrijden. Om die reden passen we een maximaal productie-interval toe. Deze wordt in sectie 8.3.2.1 toegelicht.

Paneel b in Figuur 8.2 demonstreert dat bij zeer gedeveierde putten en een begrensde maximaal productie-interval, de effectieve reservoir dikte langs het productie interval lager kan zijn dan de reservoir dikte zelf. Zoals in sectie 8.1.1 is beschreven, worden de geologische eigenschappen per zone in het geothermische model geladen. In scenario's waar de effectieve reservoirdikte groter is dan de bruto dikte van losse zones worden de gemiddelde eigenschappen van het reservoir interval bepaald aan de hand van een optimalisatie algoritme, waarbij het reservoir interval wordt geplaatst in de aansluitende zones waarbij de cumulatieve permeabiliteit het hoogste is. De putinclinatie θ is dus belangrijk voor het bepalen van de reservoir-eigenschappen, vooral bij zeer gedeveierde putten.

Paneel c in Figuur 8.2 illustreert dat bij een niet-horizontaal reservoir niet alleen de putinclinatie θ van belang is maar ook de putoriëntatie φ . Hierbij wordt enerzijds duidelijk dat sommige producer-injector oriëntaties niet mogelijk zijn omdat de putafstand dan lager is dan het hiervoor besproken minimum (zie de Producer 2-Injector combinatie in Paneel c van Figuur 8.2). Anderzijds kan een putoriëntatie parallel aan de dip van een laag leiden tot een langer productie-interval dan een putoriëntatie meer haaks op de dip van een laag (zie het verschil tussen Producer 1 en Producer 2 in Paneel c van

Figuur 8.2). Omdat optimale putoriëntaties later in de workflow (zie sectie 8.1.3) worden bepaald, is gekozen om per simulatie de reservoir eigenschappen te berekenen voor putoriëntaties in alle richtingen, met stappen van 45 graden.

8.1.2.2 Gemiddelde permeabiliteit

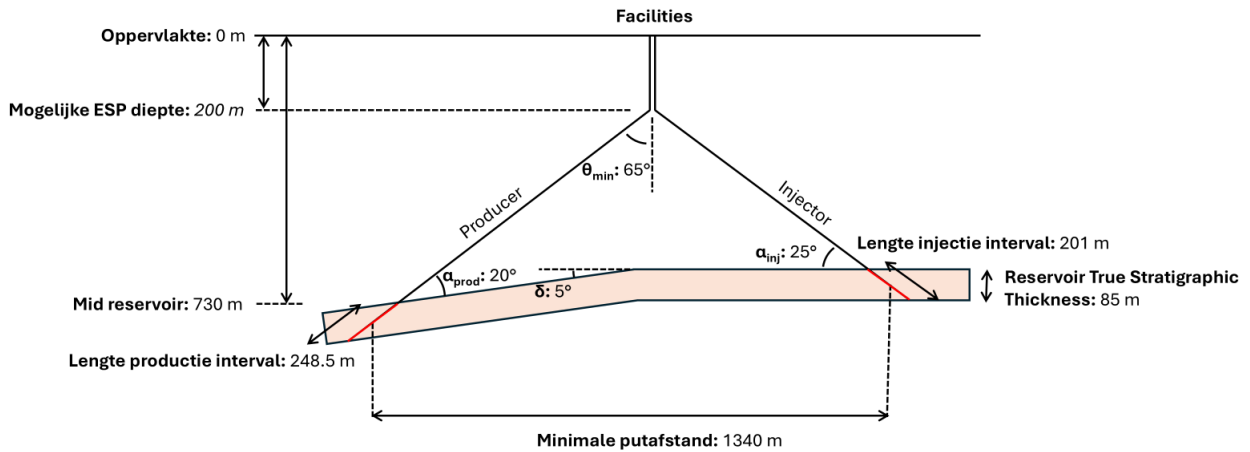
Op basis van de optimalisering van het productie- en injectie-interval (zie sectie 8.1.2.1) wordt op basis van de overlap van het interval met verschillende zones, een gewogen gemiddelde berekend van de permeabiliteit.

8.1.2.3 Vshale en gemiddelde porositeit

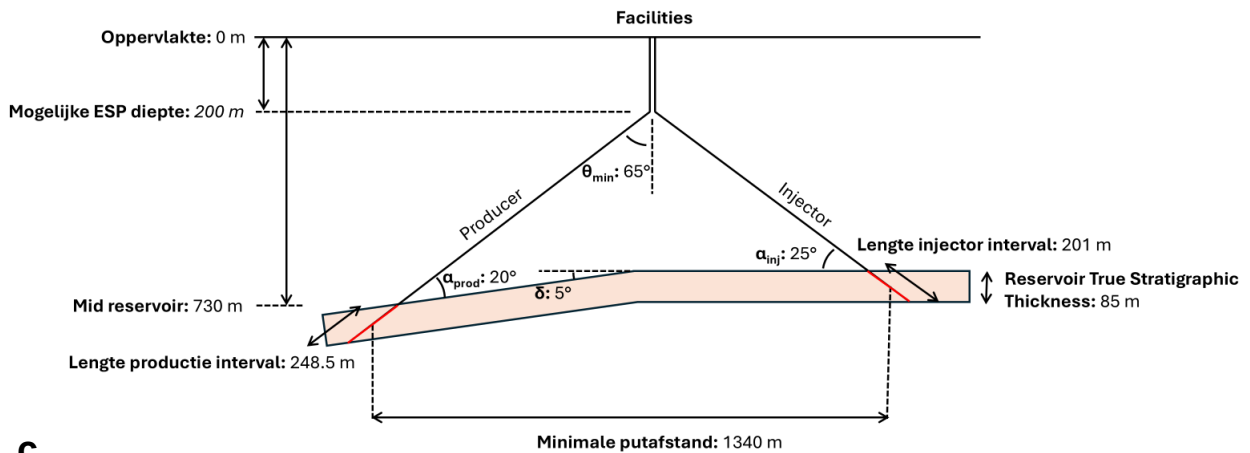
Zoals eerder vermeld is de porositeit van belang om een bovengrens te stellen voor de debieten voor een aardwarmtesysteem. In sectie 4.5.3 beschrijven we de nieuwe regionale *k-Phi transform* welke voor het Zand van Brussel Laagpakket de porositeit aan permeabiliteit relateert: we definiëren twee vergelijkingen welke afhankelijk zijn van de *Vshale*.

Per zone wordt eerst op basis van *Vshale* een porositeit teruggerekend aan de hand van de permeabiliteit. Vervolgens wordt op basis van de optimalisering van het productie- en injectie interval (zie sectie 8.1.2.1) op basis van de overlap van het interval met verschillende zones, een gewogen gemiddelde berekend van de porositeit.

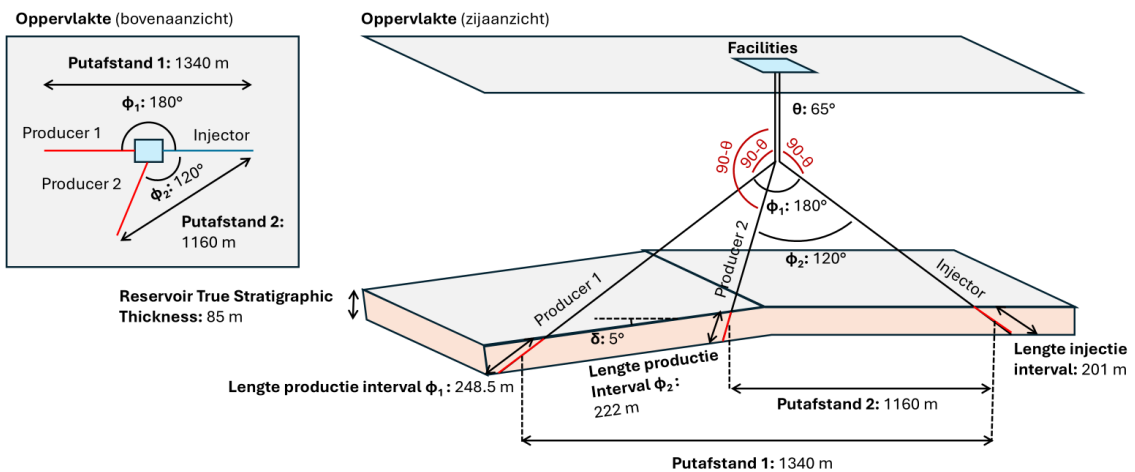
a



b



c



Figuur 8.2 Drie voorbeelden van het effect van putinclinatie θ en put oriëntatie ϕ op het productie- en injectie-interval in (dippende) stratigrafie.

8.1.2.4 Gemiddelde LPSC

LPSC wordt in Geel & Foeken (2021) gedefinieerd als “*Low Permeable Streak continuous upscaled*”. Deze waarde representeert het percentage van verticale gridcellen waarin sprake is van calcietcementatie. Op basis van het facies model beschreven in sectie 7.3 kan de LPSC op zone-niveau worden berekend. Op basis van de optimalisering van het productie- en injectie interval (zie sectie 8.1.2.1) wordt vervolgens op basis van de overlap van het interval met een verschillende zones, een gewogen gemiddelde berekend van de LPSC.

8.1.2.5 Netto effectieve reservoirdikte

Op basis van de optimalisering van het productie- en injectie-interval (zie sectie 8.1.2.1) wordt op basis van de overlap van het interval met een verschillende zones, een gewogen gemiddelde berekend van de *net-to-gross* (N/G). Deze wordt vermenigvuldigd met de bruto effectieve reservoirdikte om tot een netto effectieve reservoirdikte te komen.

8.1.2.6 Gemiddelde PVT-eigenschappen formatiewater

Sectie 4.8.4 beschrijft een geothermische gradiënt waarmee de temperatuur van het formatiewater op diepte kan worden bepaald. Met deze gradiënt zijn temperatuurkaarten per zone gegenereerd. Op basis van de optimalisering van het productie- en injectie-interval (zie sectie 8.1.2.1) wordt op basis van de overlap van het interval met verschillende zones, een gewogen gemiddelde berekend van de reservoirtemperatuur.

Een soortgelijke methode is gebruikt voor het bepalen van de saliniteit (sectie 4.8.2) en reservoirdruk (4.8.3).

8.1.2.7 Viscositeit

De viscositeit is een input voor de productiviteit vergelijkingen voor verschillende stromingsregimes van verticale (*Darcy radial flow*) tot horizontale putten (*linear flow*). Viscositeit is gerelateerd aan saliniteit (sectie 4.8.2) en reservoirtemperatuur (sectie 4.8.4). We gebruiken empirische vergelijkingen uit Batzle & Wang (1992) voor het bepalen van de viscositeit van het formatiewater.

8.1.2.8 Anisotropy index

Zoals al is beschreven in Hoofdstuk 7 is er in het Zand van Brussel Laagpakket veelvuldig sprake van calciet gecementeerde bankjes die niet alleen een aanzienlijk effect hebben op de verticale permeabiliteit, maar op lokaal niveau ook tot stroomcompartimentering kunnen leiden.

Bij het ontbreken van een dynamisch model kan de verticale permeabiliteit van een reservoir aan de hand van een harmonisch gemiddelde worden berekend, maar bij deze methode is $k_v \gg k_h$. Dit heeft een negatief effect op de prestaties van (sub)horizontale putten. Geel & Foeken (2021) hebben de prestaties van zeer gedeveerde en horizontale putten in het Zand van Brussel Laagpakket met dynamische simulaties gemodelleerd. Het onderzoeksgebied betrof hier een gebied van 6 x 6 km rondom Zwijndrecht.

Op basis van inversie van de resultaten van deze simulaties is een vergelijking opgesteld welke de horizontale permeabiliteit aan de verticale permeabiliteit relateert aan de hand van LPSC. Omdat de LPSC als resultante uit het statisch model kan worden gehaald hebben wij besloten om de vergelijking uit Geel & Foeken (2021) te gebruiken. Gezien de relatief laterale continuïteit van de stratigrafie in de Voorne Trog, en de uniforme, constante dalingsgeschiedenis van de Voorne Trog tijdens de afzetting van de Noordzee Groep, nemen wij aan dat de calciet gecementeerde bankjes min of meer uniform zijn ontstaan in de Voorne Trog, en de vergelijking uit Geel & Foeken (2021) naast de omgeving van Zwijndrecht dus op het gehele onderzoeksgebied kan worden toegepast.

Aan de hand van de horizontale en verticale permeabiliteit is de *anisotropy*-index vervolgens op basis van Mijnlief *et al.* (2014) berekend, en ingevoerd in de verschillende productiviteitsvergelijkingen die in sectie 8.1.2.9 worden besproken.

8.1.2.9 Productiviteitsindex (PI)

De PI is een maat voor de kwaliteit van een reservoir en is afhankelijk van de dominante stromingsregimes in het reservoir bij een bepaald putontwerp:

- Voor verticale putten is dit *Darcy radial flow* zoals beschreven in Dake (1970);
- Voor gedeveierde putten wordt een aangepaste versie van *Darcy radial flow* toegepast:
 - in gevallen waar sprake is van een grote mate van anisotropie in het reservoir (zie sectie 8.1.2.8) wordt een anisotropie correctie zoals beschreven in Economides *et al.* (1994) toegepast;
 - in gevallen waar de netto effectieve reservoirdikte lager is dan de netto reservoirdikte zoals in Paneel b in Figuur 8.2 wordt een *partial penetration correction* toegepast zoals beschreven in Cinco Ley *et al.* (1975).
- Voor (sub-)horizontale putten of voor reservoirs waar de mate van anisotropie dermate hoog is dat het lineaire stromingsregime aanzienlijk is zijn vergelijkingen voor horizontale putten toegepast. Babu & Odeh (1989) geldt hierbij als de standaardmethode voor horizontale productieputten in olie en gas reservoirs, maar deze methode wordt door de grootte van een *hydraulic drainage area* begrensd, niet door de lengte van het productie-interval. Het Zand van Brussel Laagpakket is lateraal continu met een uitstralingsgebied dat het invloedsgebied van een enkel doublet overstijgt. Om die reden wordt de oplossing uit Joshi (1991) gebruikt om de PI van horizontale putten te benaderen. In deze methode geldt de lengte van het productie-interval als belangrijke inputwaarde.

Tabel 8.1 geeft een overzicht van de gebruikte methodes voor het berekenen van PI bij verschillende putinclinaties, laaggeometrieën, en waarden voor anisotropie. Hierbij gaan we uit van relatief lange gedeveierde putten, uitgedrukt door de waarde Δ wordt bepaald op basis van de lengte van het productie- of injectie-interval $L_{interval}$ en de bruto effectieve reservoirdikte H_{eff} :

$$\Delta = \frac{L_{interval}}{H_{eff}}$$

Voor situaties waar de lengte van het productie interval extreem laag is ($\Delta < 3$) wordt zelfs bij horizontale putten uitgegaan van een PI op basis van alleen *Darcy radial flow*.

Tabel 8.1 Methode voor bepaling van PI voor verschillende put en reservoir eigenschappen en $\Delta > 5$.

		Put-reservoir hoek (α)			
		0–60°	60–70°	70–75°	>75°
Anisotropie k_h/k_v	0–10	Dake (1970)	Dake (1970)	Dake (1970)	Dake (1970)
		Dake (1970)	Economides <i>et al.</i> (1994)	Economides <i>et al.</i> (1994)	Economides <i>et al.</i> (1994)
	10–50	Dake (1970)	Dake (1970)	Dake (1970)	Dake (1970)
		Dake (1970)	Economides <i>et al.</i> (1994)	Economides <i>et al.</i> (1994)	Joshi (1991)*
	>50	Dake (1970)	Dake (1970)	Dake (1970)	Dake (1970)
		Dake (1970)	Economides <i>et al.</i> (1994)	Joshi (1991)*	Joshi (1991)

*Voor putten met een lagere Δ (3-5) wordt de PI in deze scenario's aan de hand van Dake (1970) en Economides *et al.* (1994) bepaald.

De berekening van de PI wordt uitgevoerd voor 100 Monte Carlo simulaties en voor diverse putdimensies, -inclinaties, en -oriëntaties (zie sectie 8.1.2.1). Voor elke set putaanname zijn dus 100 kaarten gegenereerd van de PI in het onderzoeksgebied met de modelresolutie zoals beschreven in Hoofdstuk 7.

Per gridcel in de kaart zijn vervolgens P10, P50, en P90 PI's bepaald. Vervolgens zijn voor de eigenschappen welke noodzakelijk zijn in Stap 4 (porositeit, permeabiliteit, netto dikte, reservoirtemperatuur, reservoirdruk, formatiewater saliniteit, en anisotropie index) de aan de P10, P50, en P90 PI gekoppelde waarden opgeslagen. Dit wil zeggen dat voor deze variabelen geen aparte P10/P50/P90 wordt berekend. Dit om interne afhankelijkheden tussen de variabelen te bewaken. Vanaf dit punt zijn de berekeningen deterministisch in plaats van stochastisch.

8.1.3 Stap 3: Bepalen directional profiles

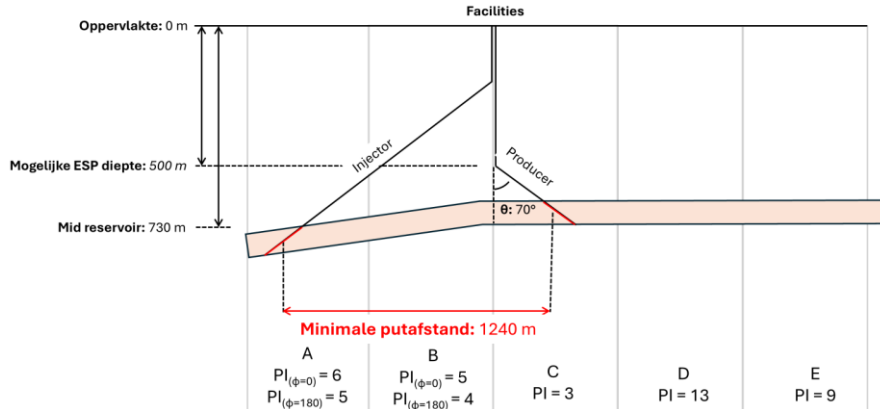
Stap 3 gebruikt als vertrekpunt de P10, P50, en P90 PI kaarten voor verschillende sets putaanname welke in Stap 2 zijn gegenereerd. Het doel van deze studie is om voor elke gridcel in het onderzoeksgebied de geothermische potentie aan het oppervlak te berekenen. Omdat de modelresolutie 1 x 1 km bedraagt (zie Hoofdstuk 7), en de afstand tussen de producer en injector groter kan zijn dan een enkele gridcel (zie sectie 8.1.2.1) kan voor de berekening van de geothermische potentie in een gridcel, de PI uit omringende gridcellen van belang zijn.

Om die reden wordt voordat potentieberekeningen worden uitgevoerd een optimaal koppel van twee gridcellen bepaald, waarbij naar verwachting de geothermische potentie aan het oppervlakte maximaal is. Op basis van de gekozen putinclinatie θ en de reservoirdiepte wordt bepaald wat de verst mogelijke gridcellen zijn die voor een bepaalde oppervlaktelocatie in aanmerking kunnen komen. In Figuur 8.3 en Figuur 8.4 zijn voorbeelden gegeven van mogelijk gridcel combinaties voor één vaste oppervlakte locatie een put oriëntatie van 0° voor de injector, en een put oriëntatie van 180° voor de producer (vergelijkbare opstelling met Producer 1 – Injector in Paneel c van Figuur 8.2). De gridcellen zijn gelabeld met hoofdletters en de PI is geannoteerd. Voor gridcellen waar het reservoir horizontaal is heeft de PI geen verschillende waarden voor verschillende put oriëntaties. Voor gridcellen zoals A en B waar het reservoir een *dip angle* heeft, verschilt de PI voor verschillende put oriëntaties. Dit in verband met verschillende lengtes van het productie/injectie interval en verschillende anisotropie gerelateerde effecten (zie secties 8.1.2.1 en 8.1.2.9). Voor de injector moet in deze Figuren dus in dit geval $PI_{(\varphi=0)}$ worden aangenomen.

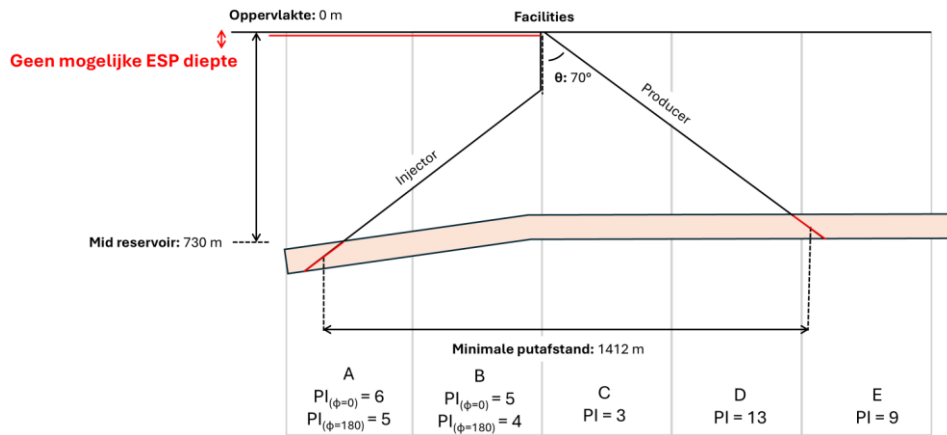
Voordat een gridcel combinatie in een shortlist wordt gezet wordt gecontroleerd of de combinatie aan een drietal criteria voldoet:

1. De vereisten voor minimale putafstand worden gehonoreerd. In sectie 8.1.2.1 wordt deze vereiste nader onderbouwd. Gegeven een theoretische minimale putafstand van 1250 m, is de gridcel combinatie A-C uit Paneel a van Figuur 8.3 niet haalbaar.
2. Er is voldoende *drawdown* mogelijk voor een ESP-systeem. Aangenomen wordt dat een ESP alleen in een verticale sectie van een productieput kan worden afgehangen. In Paneel b van Figuur 8.3 is de gekozen gridcel E voor de producer dusdanig ver van de oppervlaktelocatie dat de put direct van het oppervlak al moet deviëren om het reservoir in de geselecteerde gridcel te penetreren. In dit voorbeeld is er onvoldoende ruimte beschikbaar om een ESP af te hangen;
3. De put bestaat niet uit een extreem lange horizontale leg. Als een put (sub)horizontaal is, kunnen in theorie gridcellen op zeer grote afstand van de oppervlaktelocatie worden bereikt. Te lange horizontale legs zijn zowel technisch als economisch niet wenselijk. Dit is het geval voor gridcel J, zoals aangetoond in Paneel c van Figuur 8.3. In dit paneel is ook een vuistregel in rood aangegeven welke afhankelijk is van de putafstand, de lengte van het productie-interval, en de horizontale *well outstep*. Deze vuistregel wordt gebruikt in dit onderzoek om te bepalen of een combinatie van twee gridcellen technisch en economisch wenselijk is.

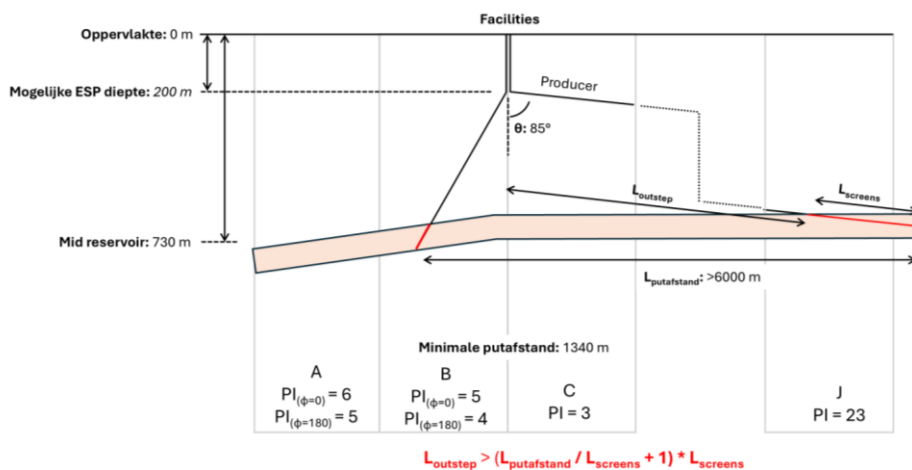
a



b

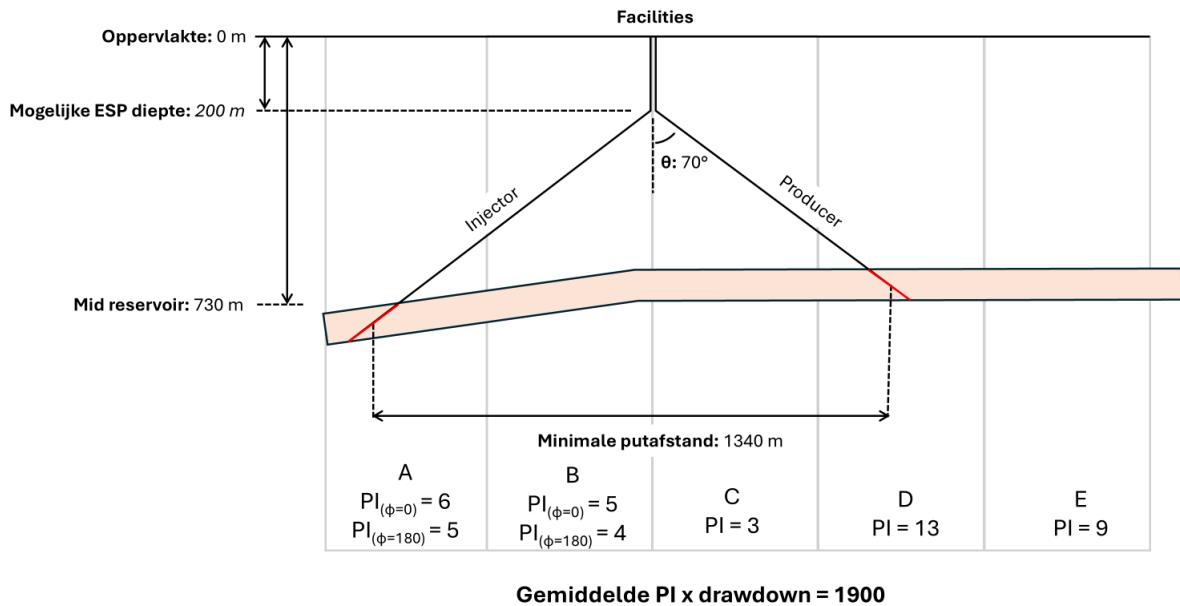


c

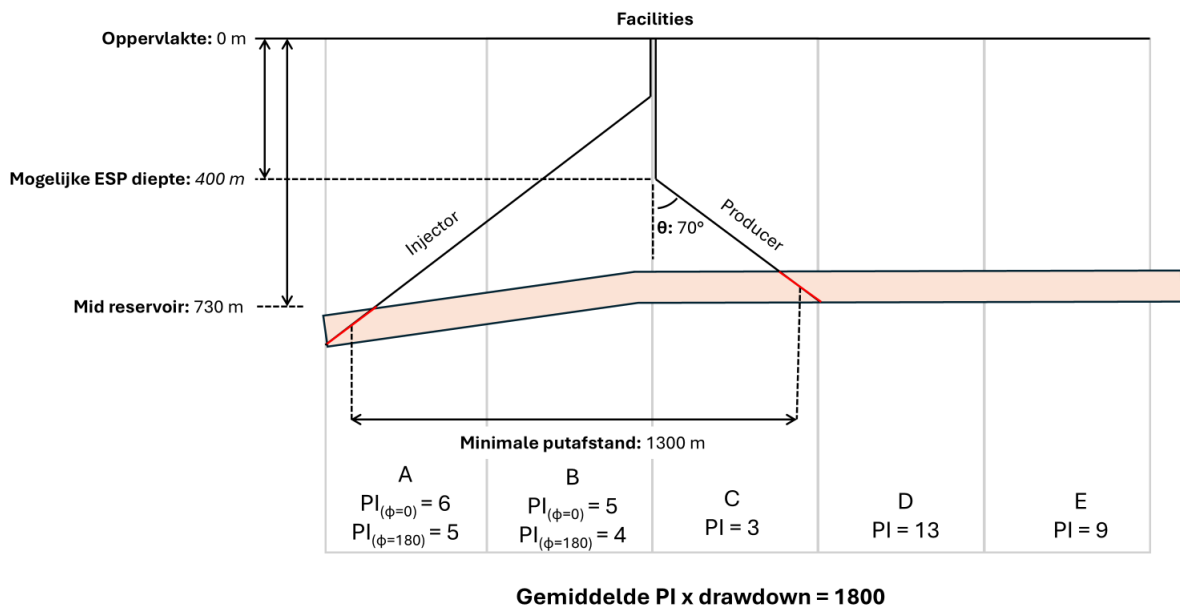


Figuur 8.3 Drie scenario's waarin de een voor putinclinatie θ in combinatie met een ondergrondse locatie van het productie- en injectie-interval leidt tot tot technisch niet haalbare doubletten.

a



b



Figuur 8.4 Voorbeeld van de rangschikking van twee geldige doubletontwerpen op basis van beschikbare ESP drawdown en de gemiddelde PI.

Alle gridcel combinaties waarbij alle bovenstaande regels wordt voldaan komen vervolgens op de shortlist terecht. De combinatie die het meest gunstig is voor geothermische productie is vervolgens bepaald op basis van het product van twee succesfactoren: (i) de gemiddelde PI van de twee gridcellen, en (ii) de maximaal haalbare drawdown van de ESP. Figuur 8.4 toont aan dat gridcel

combinaties A-D en A-C beiden mogelijk zijn, maar combinatie A-D op basis van de hiervoor beschreven evaluatie de meest gunstige combinatie is.

Op deze wijze worden per oppervlaktelocatie gridcel de P10, P50, en P90 eigenschappen (beschreven in sectie 8.1.2) voor de optimale ondergrondse gridcel combinatie voor de producer en injector perforaties opgeslagen. Deze eigenschappen worden in Stap 4 gebruikt voor het berekenen van de geothermische potentie.

8.1.4 Stap 4: Bepalen doublet prestaties

De doublet capaciteit is per oppervlaktelocatie berekend aan de hand van de eigenschappen van de gekozen producer en injector gridcellen. Dit gebeurt op basis van een serie berekeningen met *feedback loops*. Bijvoorbeeld: bij een bepaald debiet is er sprake van afkoeling langs de productieput. Dit zorgt voor een relatief dichtere, zwaardere hydrostatische kolom in de put waardoor er een hogere *drawdown* van de ESP noodzakelijk is om de kolom in beweging te brengen. Alle berekeningen van de doublet prestaties zijn stationair, en worden geïtereerd tot een bepaalde mate van convergentie is bereikt.

8.1.4.1 Debiet

Het P10/P50/P90 debiet is op basis van vier begrenzings bepaald:

1. **Het maximale debiet in de productieput** op basis van een drukbalans in de productieput van de volgende factoren:
 - o drukverschil in het reservoir op basis van de *drawdown* bij verschillende ESP afhangdieptes. De ESP-afhangdiepte wordt vastgezet in de opzet waar de grootste debieten kunnen worden behaald. Daarnaast wordt bij de keuze van de optimale ESP afhangdiepte optioneel een minimaal COP-criterium toegepast (sectie 8.1.4.5);
 - o drukverschil in het reservoir op basis van de PVT-eigenschappen (sectie 8.1.2.6) en de temperatuurverliezen in de productieput (sectie: 8.1.4.2);
 - o hydraulische drukverliezen in de put op basis van de Darcy-Weisbach vergelijkingen (Manning & Thompson, 2006), een putontwerp op basis van de *directional profiles* uit sectie 8.1.3, en de ontwerpconsideraties uit sectie 8.3.2; en
 - o degasser druk in de oppervlakte installaties op basis van de ontwerpconsideraties uit sectie 8.3.2.2.
2. **Het maximale debiet in de injectieput** op basis van een drukbalans in de injectieput van de volgende factoren:
 - o degasser druk in de oppervlakte installaties op basis van de ontwerpconsideraties uit sectie 8.3.2.2;

- drukverschil aan de top van de injectieput op basis van een maximale injectiedruk. De bepaling van de maximale injectiedruk is gebied specifiek, en wordt verder toegelicht in sectie 8.3.4.1.2;
 - drukverschil in het reservoir op basis van de PVT-eigenschappen (sectie 8.1.2.6), minimale injectietemperatuur (zie sectie 8.3.4.1.1), en temperatuurverliezen in de injectieput (sectie: 8.1.4.2); en
 - hydraulische drukverliezen in de put op basis van de Darcy-Weisbach vergelijkingen (Manning & Thompson, 2006), een putontwerp op basis van de *directional profiles* uit sectie 8.1.3, en de ontwerpconsideraties uit sectie 8.3.2.1;
3. **Het maximale debiet ter voorkoming van casing erosie.** In dit onderzoek wordt de maximale snelheid van het formatiewater in de put begrensd op 5 m/s. Dit is een waarde die in de industrie vaak als baseline wordt aangehouden zonder aanvullende maatregelen (in sommige gevallen wordt ook 6 m/s gebruikt uit de API-14E standaard). Bij hogere snelheden treedt namelijk mogelijk erosie op in de casing. Grote putdiameters kunnen in theorie in het model dus grotere debieten aan.
4. **Het maximale debiet in het reservoir.** Uitgaande van een geothermische business case van 30 jaar en de maximale gemiddelde jaardebieten uit sectie 8.3.4.2 kan op basis van een aanname van *Darcy radial flow* de hydraulische verspreiding van koudebel worden benaderd. Door de berekening van een thermische retardatiefactor (Bear & Bachmat, 1984) kan vervolgens het maximale debiet worden berekend waarbij net geen sprake is van thermische doorbraak gedurende de operationele levensduur van een aardwarmtesysteem. Dit gebeurt op basis van de gemiddelde reservoir eigenschappen (porositeit en netto dikte) tussen de gridcellen voor de producer en injector penetraties. Daarnaast wordt een formatiedichtheid van 2,650 kg/m³ aangehouden (zie ook Tabel 8.2).

Voor (sub-)horizontale putten geldt dat de effectieve netto reservoirdikte zoals gedefinieerd bij het berekenen van de PI zeer laag is; deze omvat namelijk het diepte verschil tussen de Top en Base van het productie-interval. In theorie zou bovenstaande methode bij dit soort putten leiden tot een zeer snelle doorbraaktijd. Hoewel we aannemen dat de calciet gecementeerde bankjes lokaal verticaal zeer slecht doorlatend zijn, is er reden om aan te nemen dat deze bankjes lateraal niet zeer continu zijn (Geel & Foeken, 2021). Met andere woorden, flow buiten het effectieve netto reservoir is mogelijk. Voor (sub-)horizontale putten hanteren we om die reden bij de berekening van de thermische doorbraaktijd een andere definitie voor de effectieve netto reservoirdikte dan bij de berekening van de PI (sectie 8.1.2.9): namelijk de netto dikte van de *zone* (zoals gedefinieerd in sectie 7.5) waarin het productie-interval is gelegen.

Tabel 8.2 Aannames voor de berekening van warmteverliezen langs de putten.

Parameter	Waarde
Formatiedichtheid (kg/m ³)	2,650
Thermische diffusie coëfficiënt formatie (m ² /s)	1.2 x 1e ⁻⁶
Thermische conductiviteit formatie [W/(m x K)]	1.81-2.64
Specifieke warmtecapaciteit formatie [J/(kg x K)]	780
Tijd (s)	1
e^Eulers constante	1.781072

8.1.4.2 Productietemperatuur en temperatuurverliezen

Warmteverliezen in de put zijn berekend op basis van de methode uit Garcia-Gutierrez *et al.* (2001). Hierbij zijn de aannames uit Tabel 8.2, het debiet uit sectie 8.1.4.1, de reservoirtemperatuur en saliniteit uit sectie 8.1.2.6, de *directional profiles* uit sectie 8.1.3, en de ontwerpconsideraties uit sectie 8.3.2 gebruikt. Voor de injectieput zijn daarnaast de minimale injectietemperatuur (zie sectie 8.3.4.1.1), en de saliniteit van het ontgaste formatiewater (zie sectie 8.1.4.3) gebruikt.

Empirische vergelijkingen uit Batzle & Wang (1992) zijn gebruikt voor het bepalen van veranderingen in dichtheid in de stationaire kolom als gevolg van temperatuurveranderingen.

8.1.4.3 Thermisch vermogen

In dit rapport is het doel gesteld om op basis van een ondergrondmodel van het Zand van Brussel Laagpakket kaarten te maken van het haalbare geothermische vermogen. Omdat het Zand van Brussel Laagpakket met een diepte van <1000 m TVD als een “lage temperatuur aardwarmtebron” kan worden gezien, zal de productietemperatuur in veel gevallen lager zijn dan de temperatuureisen van potentiële warmtevragers. In zulke gevallen kan de inzet van warmtepompen als systeemoplossing worden overwogen. Warmtepompen verlagen de energetische efficiëntie van een aardwarmtesysteem en verhogen de mate van uitkoeling van de aardwarmtebron.

Dit rapport focust op de ondergrond. Om die reden wordt geen rekening gehouden met bovengrondse systeemaanpassingen zoals warmtepompen. De efficiëntie- en vermogensberekeningen gelden dus voor het ondergrondse systeem tot aan de warmtewisselaar. De kansen voor de systeemaanpassingen worden besproken in het Stap 2 rapport van de ORO-01 implicatiestudie. Wel is in dit rapport voor het berekenen van het thermische vermogen uitgegaan van de minimaal haalbare injectietemperatuur, ook als deze alleen met het gebruik van een warmtepomp kan worden gerealiseerd.

Het thermische vermogen is afhankelijk van het debiet (sectie 8.1.4.1), de productietemperatuur (sectie 8.1.4.2), de dichtheid, en de warmtecapaciteit van het geproduceerde water. Deze laatste twee variabelen zijn afhankelijk van de operationele druk aan het oppervlak: een systeem overweging besproken in sectie 8.3.2.2, en de saliniteit van het geproduceerde water.

De saliniteit aan het oppervlak is berekend op basis van de brijnmetingen beschreven in sectie 4.8.2. De aanname is dat tijdens productie door de gedeeltelijke ontgassing van het formatiewater de saliniteit TDS iets af zal nemen aan het oppervlak. Omdat de samples van het aardwarmteproject in Zevenbergen aan het oppervlakte zijn genomen als representatief worden gezien voor een het ontgaste formatiewater, is de volgende relatie gebruikt voor het berekenen van de saliniteit aan het oppervlakte in een producerende put:

$$TDS_{surface} = TDS_{ORO} - \frac{(TDS_{ORO} - TDS_{ZVB}) \cdot (P_{Bubble_{ORO}} - P_{facilities})}{P_{Bubble_{ORO}} - P_{facilities_{ZVB}}}$$

Op basis van temperatuur, druk, en saliniteit is met behulp van de empirische vergelijkingen uit Batzle & Wang (1992) een dichtheid van het geproduceerde water berekend. De empirische vergelijkingen uit Grunberg (1970) zijn vervolgens toegepast voor het berekenen van de warmtecapaciteit van het geproduceerde water. Met een delta T (vastgesteld op basis van de minimale injectietemperatuur uit sectie 8.3.4.1.1) is vervolgens een thermisch vermogen aan de warmtewisselaar berekend.

8.1.4.4 Injectiviteitsindex (II)

Voorheen is voornamelijk gerekend met een productiviteitsindex (PI). Voor het vaststellen van de energievraag van de injectiepompen moet echter gekeken worden naar een injectiviteitsindex (II). De injectiviteitsindex is in de volgende stappen berekend:

- aan de hand van de minimale injectietemperatuur uit sectie 8.3.4.1.1 en de warmteverliesberekening uit sectie 8.1.4.2, is de temperatuur van het geïnjecteerde water op reservoirniveau berekend;
- aan de hand van de methode uit sectie 8.1.2.7 en de saliniteit aan het oppervlak (sectie 8.1.4.3) is de viscositeit van het geïnjecteerde water op reservoirniveau berekend; en
- op basis van de methodes uit Tabel 8.1 in sectie 8.1.2.9 is vervolgens de II berekend.

De berekende II zorgt voor een nieuwe *feedback loop* in de potentieberekening. Wanneer de II daalt, daalt ook het haalbare debiet in de injectieput bij een vaste maximale injectiedruk (sectie 8.3.4.1.2). Daarom zijn na de berekening van de II, secties 8.1.4.1-8.1.4.3 nogmaals uitgevoerd totdat er sprake is van convergentie.

8.1.4.5 Parasitic load en COP

De COP (*Coefficient of Performance*) is een maat voor de efficiëntie van een energiesysteem. In het geval van een aardwarmtesysteem als de hoeveelheid thermische energie die per eenheid elektriciteit kan worden geleverd. De COP is een uitkomst van dit model bij het berekenen van het maximaal haalbare debiet. Echter worden in het Stap 2 rapport van de ORO-01 implicatiestudie, in

overleg met EBN, economische begrenzings aangehouden om zodat de uitkomsten van het model bij een geschikte ondergrond commercieel interessante/rendabele projecten opleveren. De onderbouwing van deze economische begrenzing, en de impact hiervan op de resultaten wordt in sectie 8.4 gegeven.

De elektriciteitsvraag van een project is berekend op basis van het debiet, en bestaat uit drie componenten:

1. De elektriciteitsvraag van de ESP is berekend op basis van het drukverschil tussen de stationaire en dynamische situatie bij de ESP inlet voor een bepaald debiet. Hierbij is de drukbalans van kracht die al in sectie 8.1.4.1 is besproken;
2. De elektriciteitsvraag van de injectiepompen is berekend op basis van het verschil tussen de operationele druk in de facilities (sectie 8.3.2.2) en de maximale injectiedruk (sectie 8.3.4.1.2);
3. Meestal zijn in de facilities boosterpompen noodzakelijk om de operationele druk te borgen. De elektriciteitsvraag van de boosterpompen hangt af van twee factoren:
 - o *drukverliezen over de filters*, deze hangen af van de filterspecificaties van het aardwarmtesysteem (sectie 8.3.2.2); en
 - o *drukverliezen in de flowlines*, deze hangen af van de diameter, lengte en materiaalkeuze van de flowlines. De diameter van de flowlines wordt bepaald op basis van een benchmark voor de maximale stroomsnelheid in een warmteleiding van 2 m/s. De lengte en materiaalkeuze van de flowlines is project specifiek en wordt besproken in sectie 8.3.2.2).

Voor alle pompen worden benchmark efficiëntiewaardes toegepast (Tabel 8.3).

Tabel 8.3 Aannames voor de efficiëntie van pompinstallaties.

Installatie	Efficiëntie
ESP assembly	45 %
Injectiepompen	78 %
Boosterpompen	85 %

8.2 Implicatie van ORO-01

Deze implicatiestudie heeft als hoofddoel het aantonen van de waarde van de in het kader van de ORO-01 boring vergaarde datasets voor het inschatten van de potentie van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog. In dit kader is een nulmeting van belang.

8.2.1 Nulmeting

De meest recente evaluatie van de reservoir geometrie is gedaan in het kader van WarmingUp door Haan *et al.* (2020). In Hoofdstuk 3 wordt besproken in welke mate deze studie als gids heeft gediend voor de interpretatie van well tops en controle van seismische horizons in deze implicatiestudie.

De meest recente evaluatie van de reservoir eigenschappen is uitgevoerd in het kader van WarmingUp (Geel & Foeken, 2021) op basis van interpretatie van petrofysische logs en kernmonsters. Daarnaast is door Veldkamp *et al.* (2022) een evaluatie van reservoir eigenschappen gedaan op basis van boorgruis. Hierbij zijn interpretaties van de korrelgroottedistributie toegepast op de vergelijkingen uit van Baaren (1978) en Bialas (1966) om tot een inschatting van permeabiliteit te komen. De auteurs geven aan dat onzekerheden gepaard met de behandeling van het boorgruis leiden tot significante afwijkingen in permeabiliteit wanneer deze wordt vergeleken met de resultaten uit Geel & Foeken (2021). Met name de scheiding van boorvloeistof en boorgruis, en in sommige gevallen het wassen van boorgruis, leidt tot een onderschatting van het *finer*-gehalte in de monsters welke zijn weerslag heeft op de bepaling van porositeit. Daarnaast bestaat het Zand van Brussel Laagpakket deels uit met calciet gecementeerde lagen (Geel & Foeken, 2021) welke de permeabiliteit significant beïnvloeden, goed kunnen worden geïdentificeerd op *sonic logs*, maar welke niet worden meegenomen in de op *Particle Size Distribution* gebaseerde methode uit Veldkamp *et al.* (2022).

Om die reden is in deze implicatiestudie gekozen om prioriteit te geven aan petrofysische logs en de *helium porosity* en *Air-* en *Klinkenberg*-gecorrigeerde kern permeabiliteit uit de *Routine Core Analyses* uit ORO-01 voor het karakteriseren van het Zand van Brussel Laagpakket. De mineralogische modellen welke gebruikt zijn bij de *CPI* zijn hierbij geïntegreerd met *core-derived datasets* zoals XRD-metingen (zie Hoofdstuk 4). Echter zijn de beschikbare *cuttings data*, en *Laser Particle Size Analysis* rapporten hierbij alleen als *benchmark* gebruikt.

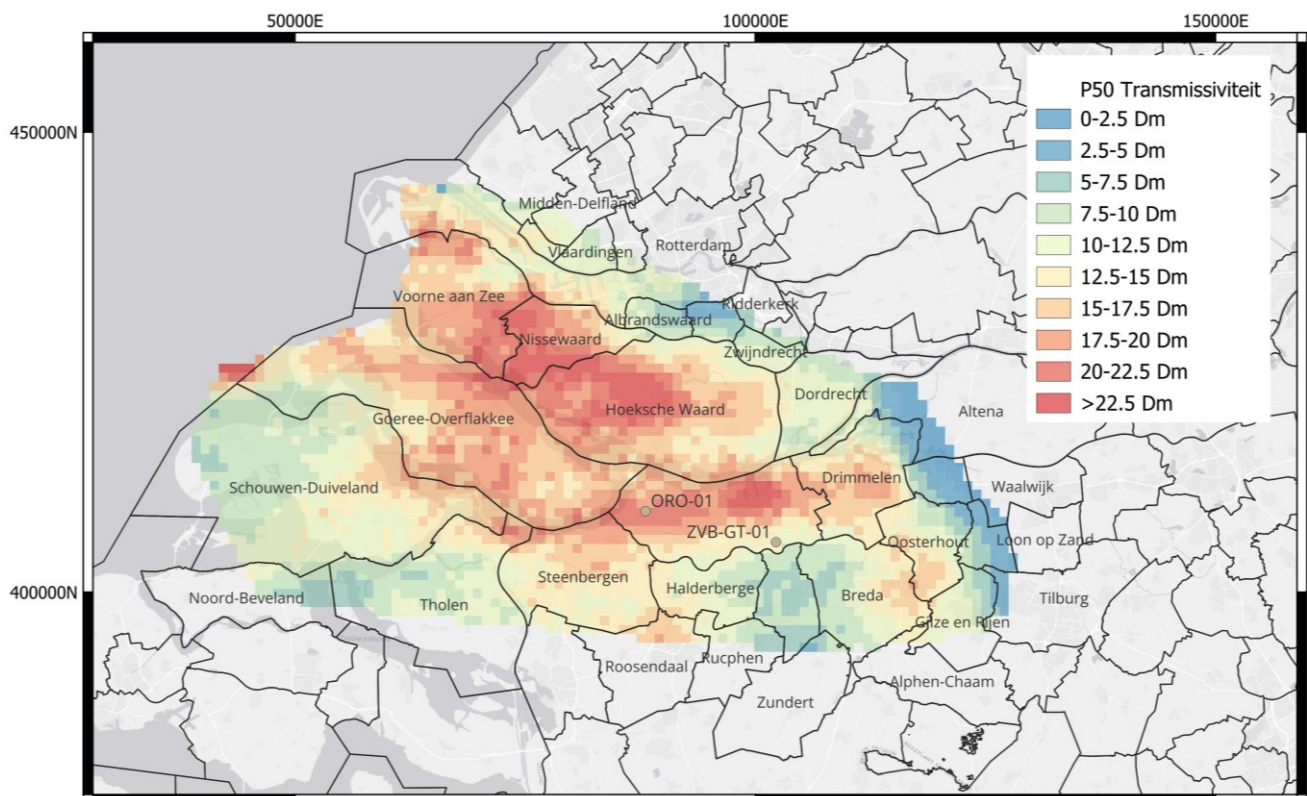
Uit WarmingUp is ook geconcludeerd dat de reservoir karakterisering uit Geel & Foeken (2021), als meer definitief kan worden beschouwd dan Veldkamp *et al.* (2022). In samenhang met de reservoir kaarten uit Haan *et al.* (2020), is deze reservoir karakterisering gebruikt voor het updaten van de eigenschappen van het Zand van Brussel Laagpakket in ThermoGIS. Voor het genereren van deze reservoir kaarten is de methodiek uit Pluymaekers *et al.* (2012) en Vrijlandt *et al.* (2019, 2020) toegepast, waarin porositeitskaarten door middel van *Kriging* met diepte als co-variabel worden verkregen. De resultaten, te raadplegen op <https://www.thermogis.nl/thermogis-mapviewer/>, tonen de geothermische potentie van het Zand van Brussel Laagpakket op verschillende niveaus, van puur fysische proxies als temperatuur en transmissiviteit, tot met behulp van engineering aannames verkregen waardes als debiet en vermogen, en op basis van economische randvoorwaarden verkregen inschattingen van mogelijk winbare warmte. Deze kaarten worden in deze implicatiestudie beschouwd als de eerdergenoemde nulmeting.

Omdat onze implicatiestudie bij de inschatting van geothermische potentie locatie-specifieke aannames hanteert voor putontwerp en operationele parameters zoals injectietemperatuur welke in veel gevallen afwijken van de aannames in ThermoGIS, wordt het niet verstandig geacht om de implicatie van ORO-01 op laag niveau (lees: debiet of thermisch vermogen) te vergelijken met de

kaartlagen uit ThermoGIS. In plaats daarvan lijkt transmissiviteit de meest eerlijke vergelijking met de nulmeting, omdat deze parameter rechtstreeks op basis van het statisch model kan worden bepaald, de Productiviteitsindex (PI) lineair beïnvloedt, en de overige fysische parameters die de PI en het thermisch vermogen beïnvloeden (temperatuur, viscositeit en specifieke warmtecapaciteit) diepteafhankelijk zijn en met grotendeels dezelfde PVT-vergelijkingen zijn bepaald als in ThermoGIS, waardoor ze met een kleinere bandbreedte zullen variëren ten opzichte van de bestaande interpretaties dan de op basis van petrofysische data afgeleide transmissiviteit (zie Hoofdstuk 4).

8.2.2 ORO-01 en de transmissiviteit van het Zand van Brussel Laagpakket

Figuur 8.5 weergeeft de transmissiviteit van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog op basis van een P50-simulatie op basis van het voor deze implicatiestudie gemaakte statisch model. Te zien is dat de transmissiviteit vooral in het centraal deel van de Voorne Trog op zijn hoogst is met waarden boven 23 Dm. Naar het zuiden en noorden neemt de transmissiviteit door verminderde netto dikte en permeabiliteit af tot waarden van 5–10 Dm. De laagste transmissiviteit (0–2.5 Dm) is berekend ten oosten van de Rijen breuk waar het Zand van Brussel Laagpakket een significant lagere dikte heeft dan in de Voorne Trog.

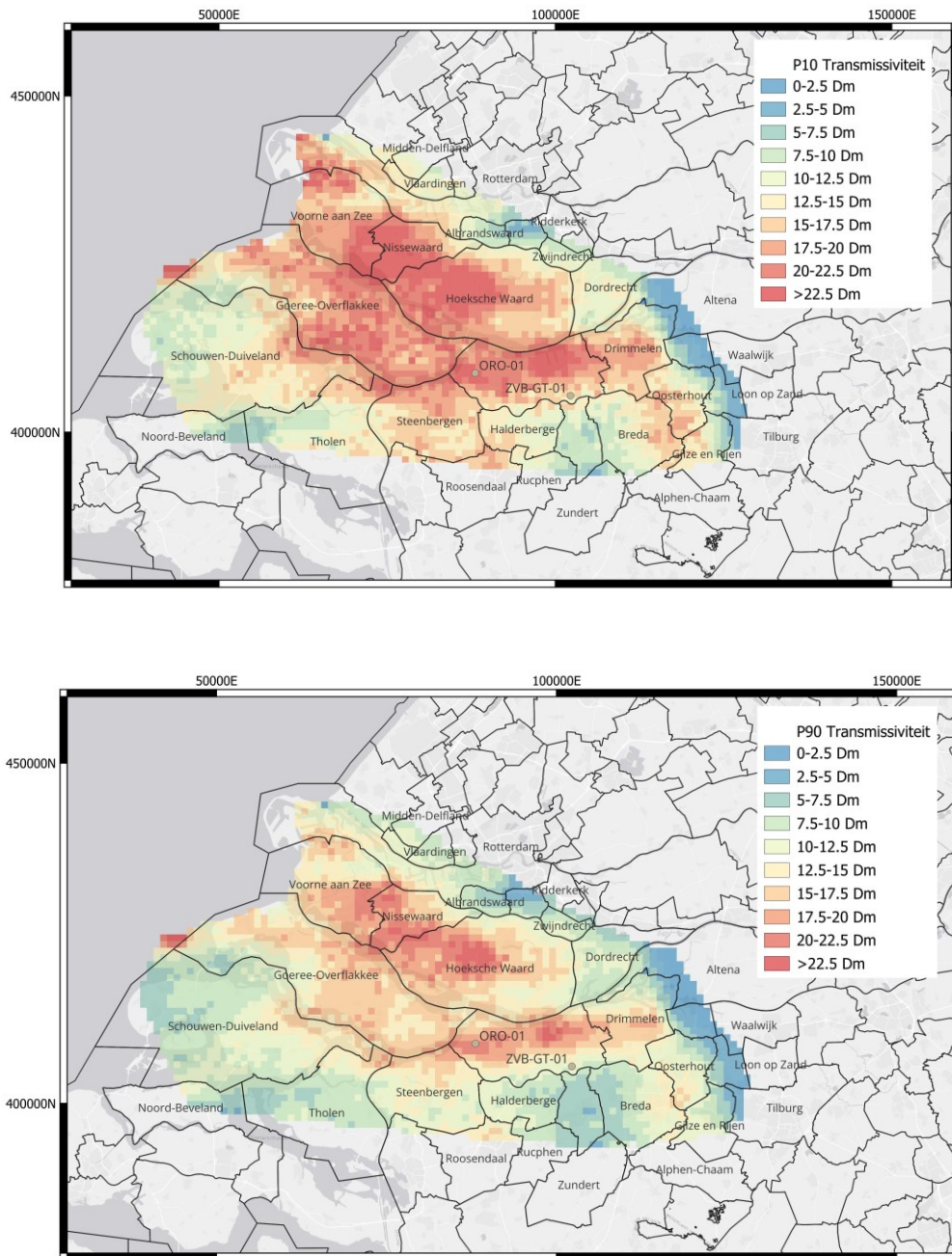


Figuur 8.5 P50 transmissiviteit (Dm) van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.

8.2.3 Modelonzekerheid

Figuur 8.6 visualiseert de spreiding tussen de P10- en P90-simulaties van transmissiviteit. Te zien is dat het maximale verschil tussen beide scenario's ongeveer 5 Dm bedraagt. Dit in tegenstelling tot ThermoGIS, waar het verschil tussen P10 en P90 met regelmatig >100 Dm bedraagt. De reden voor dit grote verschil in onzekerheid heeft meerderere oorzaken:

- Allereerst is de *poroperm* welke mede op basis van de ORO-01 kerndata is bepaald minder steil dan de eerdere grotendeels op WYK-12 gebaseerde *poroperm* uit Geel & Foeken (2021). Hierdoor ontstaat een dempend effect waarbij positieve en negatieve uitschieters in de transmissiviteit kaart van ThermoGIS worden genormaliseerd.
- Ten tweede faciliteert de methode waarin deze implicatiestudie porositeitskaarten genereert (*property modelling* op basis van een *sequence stratigraphic approach*) een kleinere onzekerheidsmarge vergeleken met de minder geologische, meer statistische aanpak van ThermoGIS op basis van *co-kriging*. Zoals in sectie 7.6 wordt toegelicht representeren de *high* en *low cases* in dit onderzoek een P75 en P25. De probabilistische kaarten (hierna gerefereerd als P90, P50 en P10) bevinden zich binnen het interval van de geologische *high* en *low cases*;
- Ten derde hebben we de Monte Carlo simulatie onafhankelijk per zone van het Zand van Brussel Laagpakket gedraaid. Dit wil zeggen dat lage permeabiliteit in de bovenste zone niet direct samenhangt met lager permeabiliteit in de onderste zone van het Zand van Brussel Laagpakket. Ook dit heeft een dempend effect op het verschil tussen de P10 en P90 realisaties.
- Daarnaast is er sprake van een *smoothing* van de kaarten doordat gridcellen met een goede potentie voor meerdere oppervlaktelocaties kunnen worden gebruikt door de implementatie van een *well outstep*.



Figuur 8.6 P10 (boven) en P90 (onder) transmissiviteit (Dm) van het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.

8.2.4 Dataonzekerheid

We benadrukken dat enkele zones met verhoogde transmissiviteit, bijvoorbeeld in de gemeente Goeree-Overflakkee samenhangen met de afwezigheid van putten met petrofysische logs. In deze zones kan dus naast modelonzekerheid rekening worden gehouden met een data-gerelateerde onzekerheid, ook al worden realistische geologische uitgangspunten gehanteerd bij het maken van

het model. We verwachten vanwege deze dataonzekerheid dat in ieder geval bij projecten gelegen op een afstand van meer dan 5 km van een van de putten die voor property modelling is gebruikt (zie sectie 3.2), vergelijkbare ontwikkeltrajecten zijn te voorzien als bij eerdere aardwarmteontwikkelingen in gebieden met dataonzekerheid. Denk hierbij aan:

- het gefaseerd uitvoeren van de geothermische boring en facilities, waarbij de facilities pas worden gebouwd na een positieve well test;
- bankfinancieringstrajecten waarbij financiering pas vrijkomt na een positieve well test.

8.2.5 Vergelijking met ThermoGIS

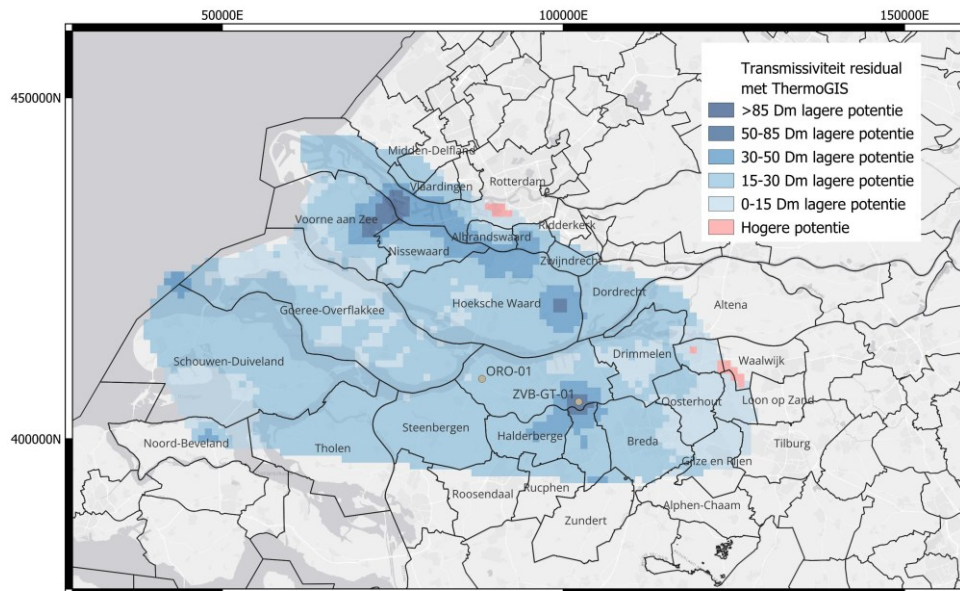
Figuur 8.7 visualiseert de implicatie van deze studie op basis van ORO-01 door middel van de *residual* van transmissiviteit met de gegevens uit ThermoGIS. Aan de hand van deze afbeelding wordt duidelijk in het P50-scenario, de data uit ORO-01 vrijwel overal rond de 15-30 Dm lager is dan in voorgaande studies aangenomen. Hierbij benadrukken we vooral dat we in deze studie een andere berekening voor de gemiddelde permeabiliteit toepassen, dan in WarmingUp is gebruikt (Geel & Foeken, 2021). Het gebruik in deze studie van een *meetkundig gemiddelde* per zone, zoals is onderbouwd in sectie 7.5.2, zorgt vrijwel in het gehele onderzoeksgebied voor een >2x lagere transmissiviteit, dan als de in WarmingUp gebruikte methode wordt toegepast (Figuur 8.8). Dunne streaks met een hoge permeabiliteit in Zones 1 en 2 van het Zand van Brussel Laagpakket zorgen wanneer een *rekenkundig gemiddelde* wordt gebruikt voor een overschatting van de gemiddelde doorlaatbaarheid in dit deel van het reservoir. Een *meetkundig gemiddelde* zorgt voor een goede match met put test van ORO-01, maar resulteert dus ook in kaarten met een lagere geologische potentie dan wordt getoond in de kaarten in ThermoGIS

De grootste verschillen bevinden zich rondom enkele van de bestaande putten (bijvoorbeeld >50 Dm lagere transmissiviteit nabij Zevenbergen). Wij verwachten dat de permeabiliteit rondom deze putten significant werd overschat omdat de bestaande *poroperm* voornamelijk is gebaseerd op kerndata uit de door zand gedomineerde bovenste zone in het Zand van Brussel Laagpakket. Zoals in Hoofdstuk 4 wordt beschreven lijken de door silt gedomineerde intervallen meer aanwezig in diepere zones van het Zand van Brussel Laagpakket, zich langs een andere regressie te gedragen. De toepassing van een op zand gebaseerde regressie kan daardoor een overschatting introduceren van de transmissiviteit in ThermoGIS welke door de keuze voor *co-kriging* bij het genereren van de kaarten met name uitgesproken is nabij de bestaande putten.

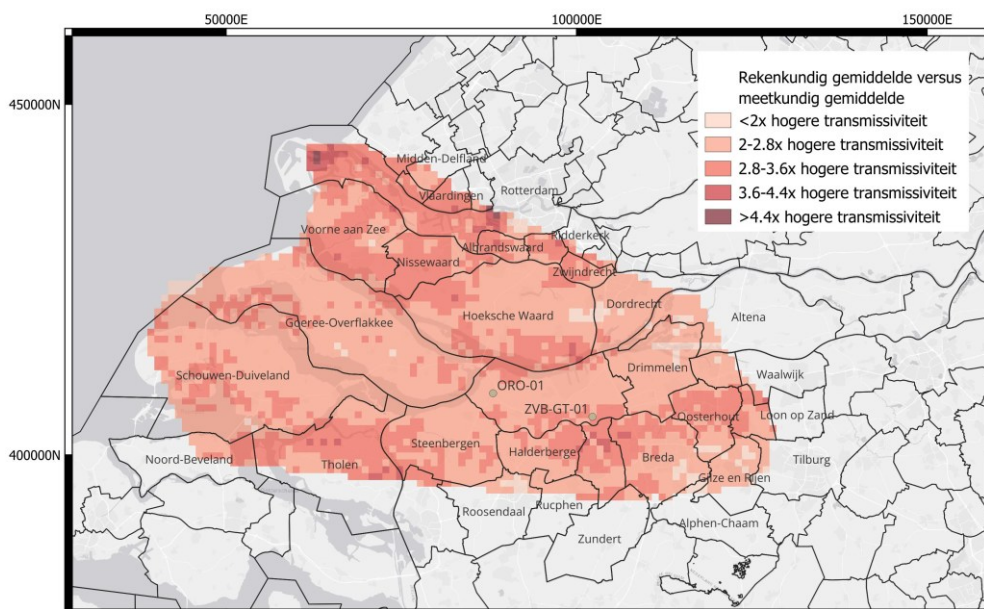
8.2.6 Implicaties voor SCAN

Ondanks de onzekerheden benoemd in sectie 8.2.3 en vooral in sectie 8.2.4, benadrukken wij dat de range tussen de lage en hoge transmissiviteit waarden relatief laag is in ons model vergeleken met ThermoGIS in de Voorne Trog. Daarnaast benadrukken we dat we in het *upscalen* relatief conservatieve algoritmes hebben gebruikt om petrofysische gemiddelden te berekenen (zie sectie 7.5.2), dus er is ruimte voor een potentiële *upside* in the transmissiviteit. Tenslotte zijn de haalbare vermogens uit het Zand van Brussel Laagpakket, en de Capex die geassocieerd is met een Lage Temperatuur Aardwarmte Project relatief beperkt vergeleken met dieper gelegen hoge temperatuur

projecten. Om die reden achten wij het niet de hoogste prioriteit dat als onderdeel van SCAN nieuwe onderzoeksboringen worden uitgevoerd in de Voorne Trog om de dataonzekerheid genoemd in sectie 8.2.4 verder te begrenzen.



Figuur 8.7 Residual van transmissiviteit met ThermoGIS op basis van het nieuwe statisch model in het P50 scenario.



Figuur 8.8 Impact van de keuze voor een rekenkundig gemiddelde vergeleken met het in deze studie gekozen meetkundig gemiddelde voor de transmissiviteit van het Zand van Brussel Laagpakket.

Wij gaan ervan uit dat het detailniveau en databeschikbaarheid van dit model voldoende is voor het geologisch onderzoek dat nodig is voor de *aanvraag startvergunning*. Ook verwachten wij dat de resterende geologische onzekerheden na dit onderzoek tot een beheersbaar niveau zijn teruggebracht.

8.3 Risico's en systeemoverwegingen

In Nederland is er zeer beperkte ervaring met “lage temperatuur aardwarmte” uit het Zand van Brussel Laagpakket. Het enige gerealiseerde project in deze laag in de Voorne Trog, LTA Zevenbergen, is uitgevoerd door Greenbrothers en Visser Smit Hanab. Dit project, geboord in de periode 2017–2018 heeft geproduceerd van december 2019 en tot maart 2022. Het project laat goed zien dat productie en injectie mogelijk is in het Zand van Brussel Laagpakket.

In het buitenland zijn er meer relevante referentie projecten in medium diepte zandstenen. Een aantal bekende projecten die relevant kunnen zijn om te beschouwen voor *lessons learned* zijn: Waren, Müritz (Duitsland), Klaipeda (Litouwen), Skåne (Sweden) en de Hambach bruinkoolmijn drainage systemen, welke ook warmte afgeven aan de lokale bedrijfshallen.

8.3.1 Ervaringen uit LTA Zevenbergen

Ondanks de goede geologie, kent het project LTA Zevenbergen een historie van technische uitdagingen. De uitgangspunten van LTA Zevenbergen tijdens het design waren meer gebaseerd op WKO-systemen dan op diepe geothermie systemen. Hierdoor zijn een aantal uitdagingen ontstaan die vergelijkbaar zijn met diepe geothermie, zowel tijdens de boringen als tijdens de commissioning (opstart) en de exploitatie.

De boringen zelf, welke bijna horizontaal in het reservoir zijn gerealiseerd, kenden tal van uitdagingen. Ten eerste omdat er was gekozen om een *Horizontal Directional Drilling* (HDD)-boortoren te gebruiken voor deze geothermie-boring. Naast een aantal uitdagingen tijdens de boringen, welke uiteindelijk gewoon geslaagd zijn, was het resultaat dat de spuitkruizen zeer dicht op elkaar staan en de injector onder een hoek aan het oppervlak komt, hetgeen uitdagingen gaf in de operationele fase. In de commissioning fase waren er tegenslagen met de gekozen pomp configuratie en is er uiteindelijk toch voor een conventionele ESP van diepe geothermie systemen gekozen. De horizontale secties in het reservoir zijn theoretisch zeer goed voor een hogere productiviteit en injectiviteit vanwege het grotere oppervlak waar water kan stromen tussen het reservoir en de put, maar deze maakte het ook lastig en duur om een logging-operatie en schoonmaakacties uit te voeren. Deze booruitgangspunten waren interessant om de HDD boortoren te gebruiken en om hogere productiviteit te bereiken, maar het is de vraag of het dit project goed heeft gedaan, gezien de hoge mate van anisotropie in het reservoir (zie sectie 8.1.2.4).

Echter de grootste uitdaging, welke het project uiteindelijk heeft stil doen leggen, was een combinatie van microbiologie, corrosie, en ijzersulfide-scaling. Na teruglopende injectiviteit en contaminatie in de filterstraat werd duidelijk dat er grote concentraties bacteriën konden groeien in het systeem aan zowel de productie- als injectiezijde. Een combinatie van sulfaat reducerende bacteriën (SRB's), microbiologisch geïnduceerde bacteriën (MIC's), en de aanwezigheid van grote hoeveelheden ijzer

sulfide hebben gezorgd voor problemen met de putintegriteit en de injectiviteit. Deze tegenslagen zijn een voorbeeld van de verkeerde ontwerputgangspunten en kunnen in een volgend project sterk gemitigeerd worden, door bijvoorbeeld gebruik te maken van andere boorspoeling en putmaterialen. Ook kan er preventief gekeken worden naar protocollen om microbiologie vanaf de start te monitoren en mitigaties reeds in de opstartvergunning op te nemen.

Met andere woorden: het uitblijven van significante operationele successen in Zevenbergen was voornamelijk gerelateerd aan ontwerp- en engineeringkeuzes tijdens de design, boor, en commissioning fases. Er kan dus niet worden geconcludeerd dat nieuwe projecten in het Zand van Brussel Laagpakket een lage succeskans hebben.

Het resterende deel van deze sectie is bedoeld om de gebruikte systeemparameters voor de geothermische potentieberekeningen verder te onderbouwen. Hierbij wordt soms verwezen naar de ervaringen en geleerde lessen in Zevenbergen. In sommige gevallen verwachten we mogelijk risico's welke niet aanwezig zijn bij de locatie in Zevenbergen. Locatie-afhankelijke parameters worden in meer detail besproken, bijvoorbeeld in secties 8.3.4.1 en 8.3.4.2.

8.3.2 Ontwerpfase

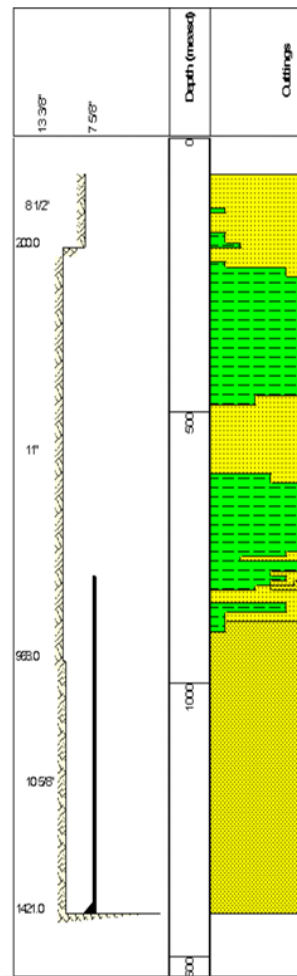
8.3.2.1 Putontwerp

In sectie 8.1.2.1 wordt een uitgebreide discussie gegeven van de impact van het putontwerp op de prestaties van een aardwarmtesysteem. Hier worden de volgende uitgangspunten toegepast.

- De OD van de liner van de producer en injector in Zevenbergen is 7 5/8". Een andere industrie geaccepteerde maat voor de productie en injectie liner in een ondiep geothermiesysteem is 9 5/8". Grotere maten leiden al snel tot een escalatie in de investeringskosten zonder significante toenames in geothermische opbrengst. In dit onderzoek zijn simulaties gedraaid voor zowel 7" als 9 5/8" liner OD's. De resultaten tonen relatief weinig variatie, omdat de haalbare debieten lager zijn dan de drempelwaarden waarbij significante drukverliezen in een 7" liner plaatsvinden.
- Er is gekozen om als minimale putafstand op reservoir niveau, de well outstep (putafstand) van het doublet in Zevenbergen aan te nemen. Deze bedraagt ongeveer 1340 m. Het doublet in Zevenbergen produceerde sinds de start maximaal met 160 m³/u, maar is oorspronkelijk ontworpen voor debieten >300 m³/u. Om deze reden achten we een minimale putafstand van 1340 m acceptabel.
- Wij passen een maximaal productie-interval toe van 500 m, ongeveer gelijk aan de lengte van de screens in het Zevenbergen doublet. Langere productie- en injectie-intervallen dan 500 m worden technisch en economisch onwenselijk geacht.
- Voor deze studie is gekozen om drie cases te modelleren: (i) een licht gedeveerde put van 45°, (ii) een zeer gedeveerde put van 70°, en (iii) een sub-horizontale put van 85°. Lagere deviaties dan 45° resulteren in het grootste gedeelte van het onderzoeksgebied in doubletconfiguraties waarbij de minimale afstand van 1340 m tussen de productieput en

injectieput niet gehaald wordt (zelfs bij 45° is beperking de mogelijke doubletlocaties zich tot de as van het onderzoeksgebied, zie sectie 8.4) De WarmingUp onderzoeken constateren dat de aanwezigheid van calciet gecementeerde bankjes in het Zand van Brussel Laagpakket significante invloed hebben op anisotropie gerelateerde effecten op de productiviteit van aardwarmtesystemen (Geel & Foeken, 2021). Voor volledig horizontale putten kan stroomcompartimentering als gevolg van de aanwezigheid van deze bankjes zelfs leiden tot significante reductie van de netto effectieve reservoirdikte. Om deze reden is gekozen om geen volledig horizontale putten te simuleren.

- In dit onderzoek zijn geen aannames gedaan ten aanzien van drukverliezen over de screens of perforaties. Wel is van belang dat LPSA analyses in ORO-01 (PanTerra, 2025) onder andere hebben aangetoond dat de bovenste productieve zone van het Zand van Brussel Laagpakket een bimodale korrelgrootteverdeling heeft met een grote fractie (~90 %) van 70-120 µm, en een kleine fractie (~10 %) van 0.1-12 µm. Deze kleine fractie heeft mogelijk in Zevenbergen voor verstoppingsproblemen gezorgd. De risico's van wash-out door relatief ongeconsolideerde intervallen in het Zand van Brussel Laagpakket zijn bekend, en ook in het kader van WarmingUp onderzocht (Peters et al., 2022). Een mogelijke mitigerende maatregel voor verstoppingen door zandproductie zou het combineren van *sandscreens* met een *gravel pack completion* kunnen zijn. Het ontwerp van de screens is echter niet het doel van deze rapportage, en wordt niet meegenomen in de potentieberekeningen.



Figuur 8.9 Putontwerp van de producer in Zevenbergen (Geolog, 2018).

- Wij adviseren het gebruik van corrosie-bestendige materialen in de put om microbiologie problemen en schade aan de screens te voorkomen (zie sectie 8.3.1). In deze studie is een getrapte putarchitectuur met twee binnendiameters aangenomen, vergelijkbaar met de putten in Zevenbergen (Figuur 8.9). Omdat het niet het doel van deze studie is om al bepaalde keuzes voor het putontwerp vast te zetten wordt er geen binnenste verbuizing in de bovenste casing gemodelleerd (ook al zou dit vanuit corrosiemanagement wel aan te raden zijn). Daarnaast wordt voor de frictieberekeningen de ruwheid van L80-staal aangehouden voor de putten en ESP tubing (0.0001 m) in plaats van die van coated L80-staal of GRE. Voor de screens is wel de ruwheid van een corrosie-bestendig metaal aangenomen (13Cr: 0.0000015 m).

De hierboven beschreven set aannames leveren verschillende potentiekaarten op voor verschillende gemodelleerde putconcepten. In sectie 8.4 kunnen deze resultaten met elkaar worden vergeleken. Voor het Stap 2 rapport, waarin de potentie uit de ondergrond aan de warmtevraag wordt gekoppeld zijn de volgende conceptkeuzes gemaakt om tot een eenduidige potentiekaart te komen:

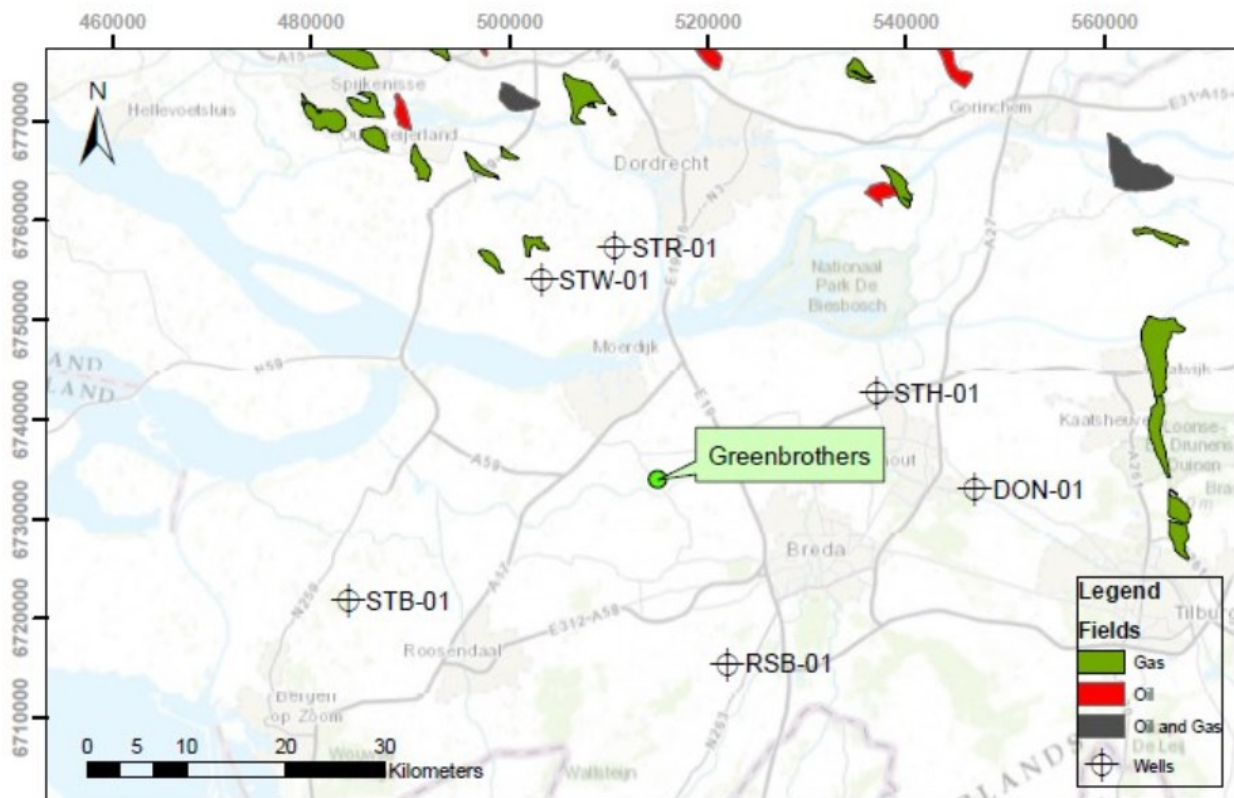
- Voor deze studie hanteren we de potentiekaarten op basis van 9 5/8" productie interval, maar we benadrukken dat deze kaarten ook aansluiten bij de situatie voor een 7" liner.
- Er is gekozen voor een putinclinatie van 70°. Dit zodat het reservoircontact wordt gemaximaliseerd, en voldoende well outstep wordt bereikt om thermische doorbraak te voorkomen in het gehele onderzoeksgebied zonder dat de anisotropie van het Zand van Brussel Laagpakket de productiviteit significant aantast.

8.3.2.2 Facilites ontwerp

Het facilities ontwerp kan in veel aspecten vergelijkbaar zijn met die in Zevenbergen. De *gas-to-water* ratio in Zevenbergen is zeer laag: $<0.1 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$. Om die reden wordt in het model bij deze studie een relatief lage operationele druk in de facilities van 1.4 bar aangenomen. Geen co-generatie van elektriciteit door de verbranding van geproduceerd gas in WKK's wordt aangenomen, wat in veel andere Nederlandse geothermiesystemen zorgt voor een COP-verhoging.

Wij merken op dat in sommige putten *shallow gas* is gevonden in het Zand van Brussel Laagpakket (PanTerra, 2014). Zo is bij STR-01 1,000 *total gas ppm* gevonden, en bij STW-01 200 *total gas ppm*. Bij ZVB-GT is daarentegen geen *shallow gas* gevonden. Het voorkomen van deze concentraties *shallow gas* is gerelateerd aan de nabijheid van gasvelden, waar een verhoogd risico bestaat dat ontsnapt gas naar ondiepere lagen is gemigreerd (sectie 8.3.3). Voor projecten nabij deze gasvelden is er een zeer lage kans dat het nodig is om een hogere operationele druk te hanteren. Bij hoge *gas-to-water* ratio's kan namelijk in de productieput veel gas uit de oplossing treden, wat kan resulteren in *ESP failures*. Omdat de kans op deze voorkomens van *shallow gas* zeer laag is, achten wij het verdedigbaar dat voor het gehele projectgebied één operationele druk wordt aangehouden. Wel dient bij ieder nieuw aardwarmteproject een site-specifieke gas risico analyse worden uitgevoerd

Naast de injectiepompen en de ESP zijn boosterpompen nodig om de operationele druk in de facilities te beperken. Het drukverlies in de flowlines is in deze studie berekend op basis van een aanname van 200 m aan flowlines in de facilities, ruwweg vergelijkbaar met het Zevenbergen project. Voor de flowlines wordt een ruwheid van 0.000015 m aangehouden, representatief voor dat van corrosiebestendig staal. De drukverliezen over de filters worden berekend op basis van micron ratings van 5 μ (upstream kaarsenfilters) en 200 μ (downstream zakkenfilters). Deze opstelling is ook vergelijkbaar met de facilities in Zevenbergen.



Figuur 8.10 Aanwezigheid van operationele olie en gasvelden in het Aol (PanTerra, 2014).

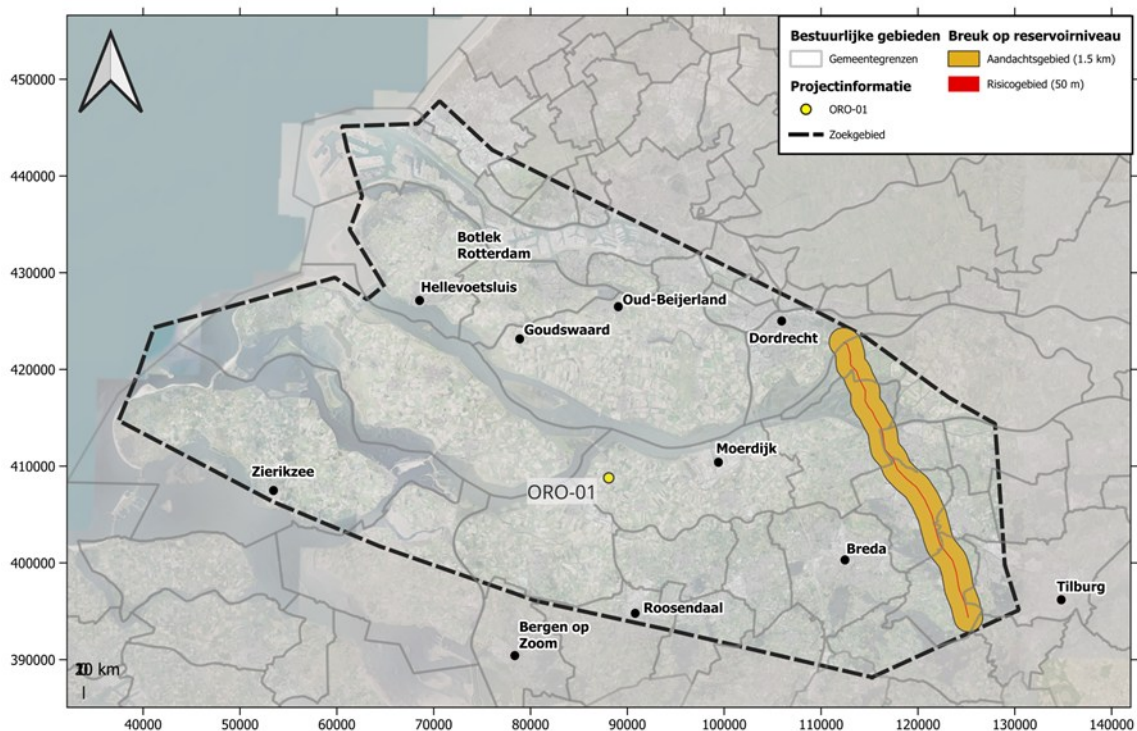
8.3.3 Boor- en testfase

Voor de boor- en testfase raden wij aan om de *lessons learned* uit Zevenbergen ter harte te nemen (sectie 8.3.1). Hiermee kunnen een groot aantal ondergrondse risico's al worden gemitigeerd. Wij achten het nodig om drie extra locatie-specifieke afwegingen te benoemen:

- De kans op *shallow gas shows* in het Zand van Brussel Laagpakket speelt niet alleen een rol bij het ontwerp van de faciliteiten (sectie 8.3.2.2), ook bij het voorbereiden van het boorprogramma is het van belang om de aanwezigheid van *shallow gas* te de-risken. Zodra in een laag wordt geboord waarin grote hoeveelheden gas onder druk in het formatiewater zijn opgelost kan dit gas spontaan uit de oplossing treden en *gas kicks* veroorzaken waarbij druk ongecontroleerd door de put naar het oppervlak komt en grote materiële en persoonlijke schade kan aanrichten. In Figuur 8.10 worden de operationele olie- en gasvelden nabij het onderzoeksgebied getoond. Nabij deze velden, specifiek in STR-01 (1,000 ppm) en STW-01 (200 ppm) zijn *shallow gas showings* geobserveerd. Wij raden dan ook aan om in ieder geval in potentiële projectgebieden nabij deze velden met een “*Blow-out Preventer*” (BOP) te boren. Dit wordt verder besproken in de risicoparagraaf in het Stap 2 rapport;
- Het Zand van Brussel Laagpakket bevindt zich grotendeels dieper dan 500 m, waardoor het boren met BOP volgens de huidige wetgeving noodzakelijk is. Echter, is het risico op grote overdruk tijdens het boren minimaal doordat het reservoir zich significant ondieper

dan de meeste olie- en gasvelden bevindt, en ondiepe olie- en gasophoping in het grootste deel van het zoekgebied onwaarschijnlijk zijn. Op dit moment wordt in het kader van het programma *Versnelling Lage Temperatuur Aardwarmte* (LTA) onderzocht of voor reservoirs zoals het Zand van Brussel Laagpakket in de toekomst ook eenvoudigere boorinstallaties zonder BOP gebruikt mogen worden, wat de aanlegkosten van een geothermie-installatie significant kunnen verminderen;

- In het onderzoeksgebied is slechts sprake van één significante breuk (sectie 7.1). Figuur 8.11 weergeeft deze breuk inclusief een arbitraire bufferzone van 1.5 km. In deze zone is het mogelijk dat tijdens een boring gebroken gesteente wordt aangetroffen. Hier kan er sprake zijn van *lost circulation* waarbij kostbare boorvloeistof aan de formatie verloren gaat. In deze gebieden is het van belang om op kleine schaal met seismisch reflectie onderzoek de breuken nabij de well trajectories te karakteriseren, en waar nodig is met LCM's te boren.



Figuur 8.11 Positie van de Rijen breuk in het onderzoeksgebied, met een bufferzone van 1.5 km.

8.3.4 Operationele fase

Voor de operationele fase raden wij ook aan om de *lessons learned* uit Zevenbergen ter harte te nemen (sectie 8.3.1). Hiermee kunnen een groot aantal ondergrondse risico's al worden gemitigeerd. Wij merken op dat de producerende- en tijdelijke verlaten gasvelden rondom de Botlek in principe geen ondergrondse belemmerende risico's vormen. De argumentatie voor deze keuze is dat

reservoirs waaruit olie en gas geproduceerd worden niet in contact staan met het Zand van Brussel Laagpakket, en er dus geen drukinterferentie verwacht wordt.

Wel zijn twee ondergrondse risico's vanuit regelgevend vlak cruciaal om locatie-specifiek te onderzoeken bij het boren van nieuwe doubletten in het Zand van Brussel Laagpakket. Hierbij gaat het om: (i) het risico tot het breken van afsluitende lagen (*seal integrity failure*) boven het reservoir door hoge injectiedrukken, waardoor verschillende watervoerende lagen met elkaar komen te vermengen, en (ii) het risico op afkoeling langs een nabijgelegen breuk met geïnduceerde seismiteit en schade aan gebouwen als gevolg.

Voor *seal integrity failure* zijn de injectiedruk en de minimale injectietemperatuur belangrijke parameters. Voor het risico voor geïnduceerde seismiteit is vooral het gemiddelde debiet van belang. Dit bepaalt immers de snelheid van de verspreiding van een koudebel rondom een injector, en de grootte van de afgekoelde zone van een breukvlak aan het eind van de levensduur van een aardwarmte doublet.

De injectiedruk, injectietemperatuur, en debietbegrenzingsen zijn de laatste parameters in het geothermiemodel die in dit Hoofdstuk nog niet zijn onderbouwd. Deze worden in de volgende twee secties op basis van een risico-afweging in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog bepaald.

8.3.4.1 Seal integrity

8.3.4.1.1 Minimale injectietemperatuur

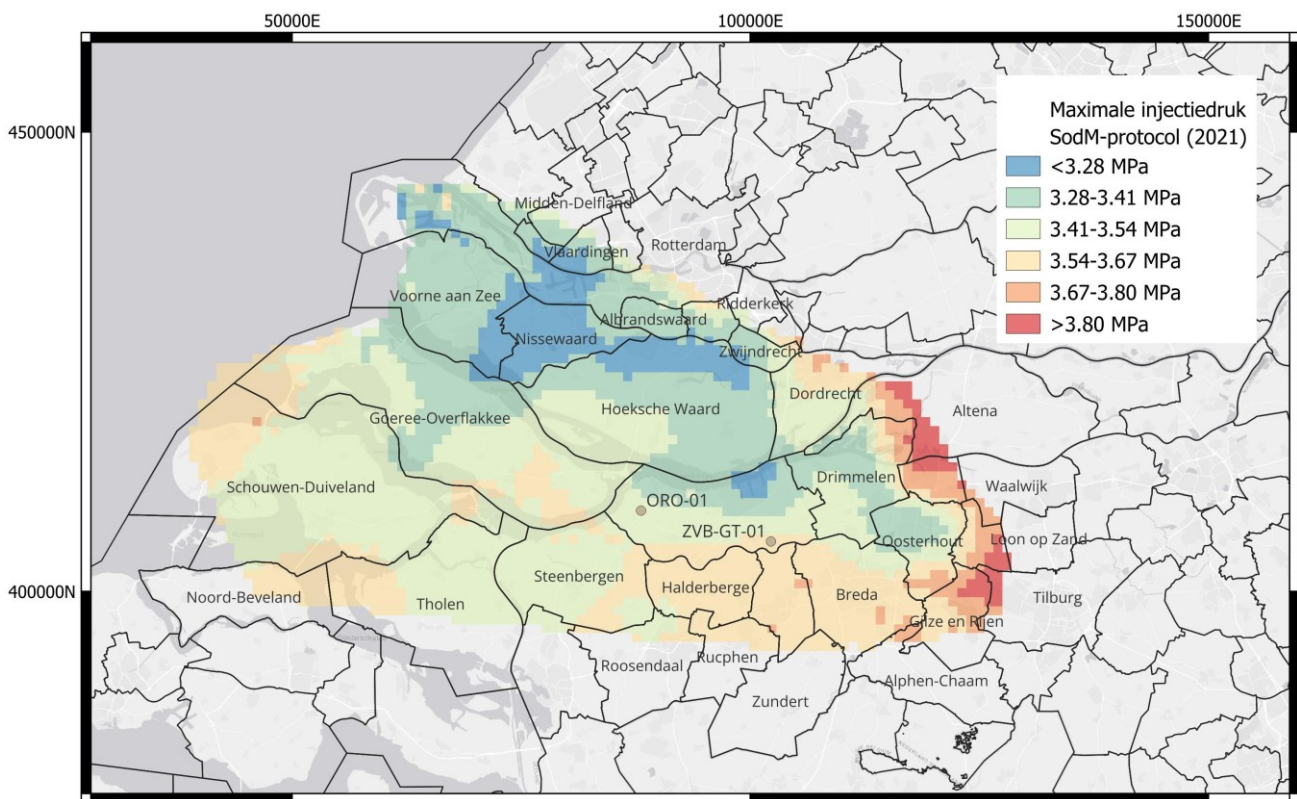
De minimale injectietemperatuur en injectiedruk beïnvloeden beide de kans op *seal integrity failure*. Maar waar een lager injectietemperatuur te allen tijde voor een hogere geothermische opbrengst zorgt (secties 8.1.4.3-8.1.4.5), is dat niet direct het geval voor de injectiedruk. Hogere injectiedrukken kunnen inderdaad leiden tot hogere debieten, maar hier zijn ook extra wrijvingsverliezen aan verbonden die de prestaties van een doublet vanaf een bepaalde injectiedruk doen stagneren. Om die reden kiezen wij in deze studie om voor de minimale injectietemperatuur een zo laag mogelijke temperatuur te definiëren, en voor de maximale injectiedruk een waarde te bepalen die in combinatie met de gekozen minimale injectietemperatuur niet tot *seal integrity failure* leidt.

Figuur 8.12 toont het voorschrift uit het Instemmingsbesluit voor de operationele limieten van LTA Zevenbergen (EZK, 2021). Dit voorschrift schrijft een minimale injectietemperatuur van 8°C voor, significant lager dan de meeste andere aardwarmteprojecten in Nederland. Omdat dit de enige benchmark is voor vergunde minimale injectietemperaturen in het Zand van Brussel Laagpakket, is deze waarde als injectietemperatuur aangehouden in de potentieberekeningen.

Artikel 1

Het door Geobrothers/VSH op 11 april 2019 ingediende aardwarmte winningsplan Zevenbergen, inclusief addenda met een looptijd tot en met 1 januari 2053, een maximaal debiet van 160 m³/uur, een maximale THP van 17 bar en een minimale injectietemperatuur van het formatiewater tijdens productie van 8°C verkrijgt de instemming als bedoeld in artikel 34, derde lid, van de Mijnbouwwet. De totale hoeveelheid te produceren formatiewater bedraagt tot en met 1 januari 2053 maximaal 31,7 miljoen m³.

Figuur 8.12 Operationele limieten voor het aardwarmtesysteem LTA Zevenbergen uit het concept-Instemmingsbesluit.

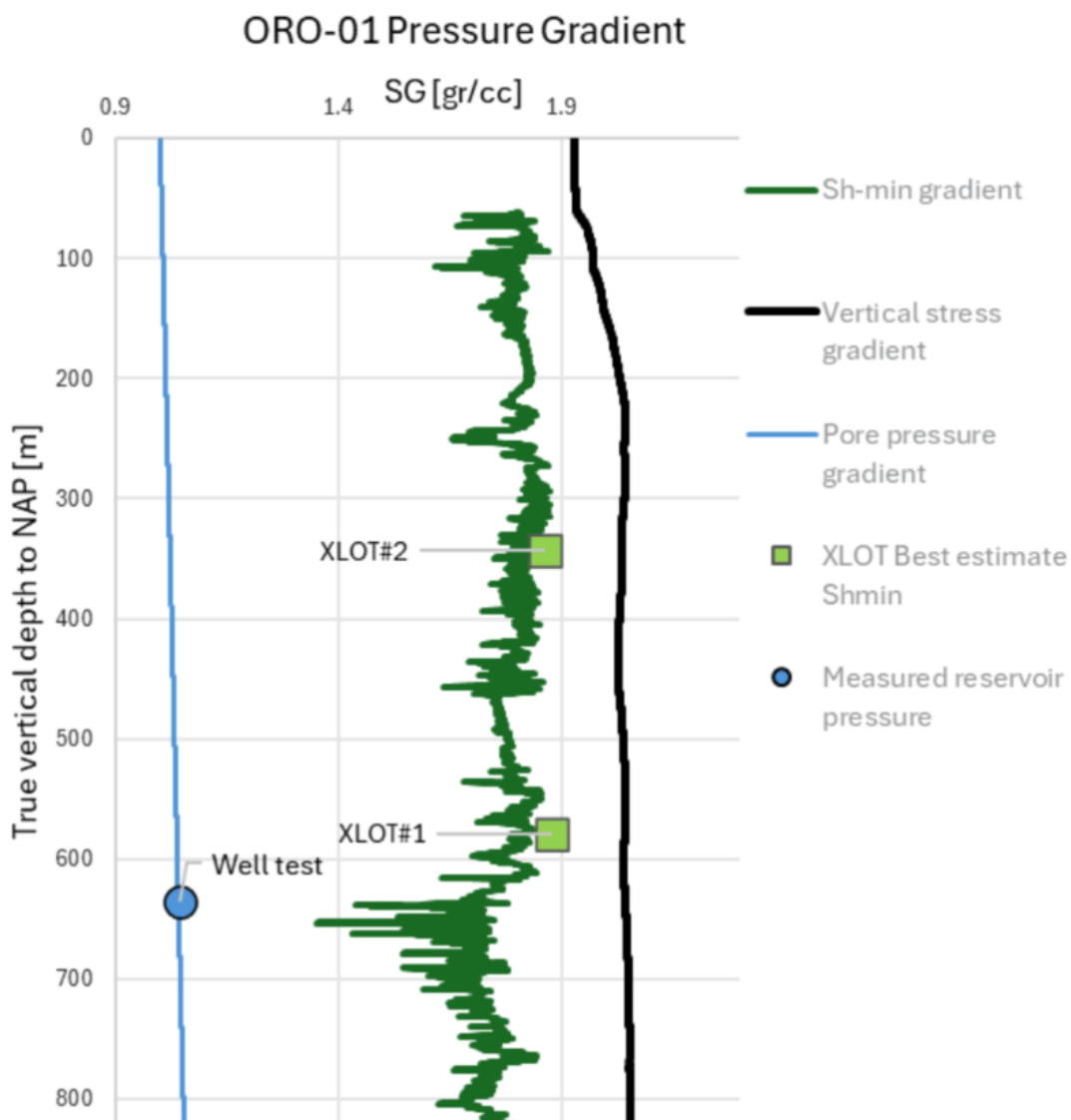


Figuur 8.13 Maximale injectiedruk in het onderzoeksgebied op basis van het SodM-injectiedrukprotocol.

8.3.4.1.2 Maximale injectiedruk

Voor het bepalen van de maximale injectiedruk is voorheen het SodM-injectiedrukprotocol (SodM, 2021) een veel gebruikte methode geweest. Al is deze methode inmiddels niet meer normstellend bij de aanvraag van een Startvergunning Aardwarmte, toch kan deze methode worden gebruikt om een conservatieve inschatting te genereren van de voor een project mogelijke injectiedruk. Figuur 8.13 toont de maximale injectiedruk voor een 9 5/8" *lower completion* met een putinclinatie van 70° in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog.

Voor veel projecten is het SodM-injectiedrukprotocol een zeer beperkende eis waardoor de winstgevendheid van het project significant wordt verminderd. Om projecten niet nodeloos te vertragen met dure geomechanische studies is de SRIMA-tool door TNO ontwikkeld (Fokker *et al.*, 2023) om op basis van een lijst aannames over de put en het reservoir simpele *seal integrity* analyses uit te voeren. De bruikbaarheid van deze tool neemt significant toe naarmate meer gedetailleerde informatie beschikbaar over de *state of stress* en de geomechanische eigenschappen van de ondergrond. Zeer sensitieve parameters voor *seal integrity* studies zoals de *Shmin*, de minimale horizontale stress in het reservoir, en geomechanische eigenschappen zoals de Young's Modulus waren tot voorheen beperkt bekend voor het Zand van Brussel Laagpakket.



Figuur 8.14 Bepaling van de *Shmin* gradiënt in de ondiepe ondergrond op basis van putgegevens van ORO-01, en twee XLOT's in de afsluitende lagen boven het Zand van Brussel Laagpakket (Hetteema *et al.*, 2025).

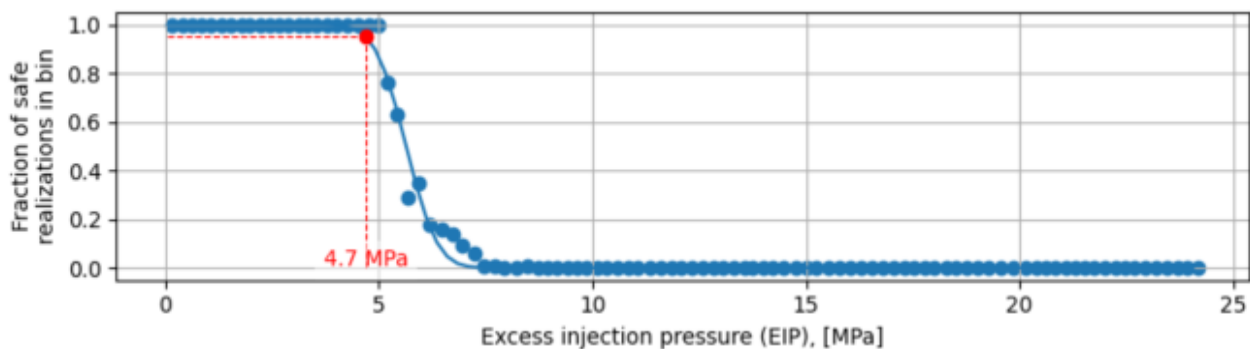
Het SCAN project rondom ORO-01 heeft echter geleid tot twee *Extended Leak-Off Tests* (XLOT) in twee afsluitende lagen boven het Zand van Brussel Laagpakket (Asse en Boom Members). Hierdoor kan de *Shmin* gradiënt in de Voorne Trog nu aanzienlijk beter worden begrensd (zie Figuur 8.14 – Hettema *et al.*, 2025). Daarnaast zijn middels tri-axial tests op core plugs uit ORO-01 de geomechanische eigenschappen van zowel het Zand van Brussel Laagpakket, als de afsluitende lagen gemeten (Figuur 8.15) en is ook van dit materiaal *de linear coefficient of thermal expansion* gemeten (Figuur 8.16) (Jahns, 2024). Met deze nieuwe data kan middels de SRIMA-tool een relatief nauwkeurige analyse worden gedaan van het *fracture potential* van de Asse Member bij verschillende injectiedrukken.

specimen data								parameter and results of triaxial tests					results of Mohr-Coulomb analysis					
interval	type	sample	depth [m]	length [mm]	diameter [mm]	mass [g]	density [g/cm ³]	strain rate [1/s]	confining pressure [MPa]	peak strength [MPa]	residual strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	cohesion S0 [MPa]	friction coefficient μ(i)	friction angle [°]	calc. UCS [MPa]	
Boom member	seal	2430_PS1_SS1	344.01	50.25	25.18	51.77	2.069	1.00E-06	1.00	2.97	nd	0.30	0.43	0.75	0.13	7.6	1.71	
		2430_PS1_SS2		50.25	25.43	52.81	2.069		2.90	5.57	nd	0.34	0.37					
		2430_PS1_SS3		50.44	25.35	52.72	2.071		6.00	9.51	nd	0.62	0.30					
		2430_PS8_SS1	348.71	49.95	25.29	51.30	2.045	1.00E-06	1.00	3.22	nd	0.14	0.33	1.07	0.08	4.4	2.31	
		2430_PS8_SS2		50.15	25.32	52.37	2.074		2.90	6.15	nd	0.19	0.05					
		2430_PS8_SS3		50.69	25.45	52.86	2.050		6.00	9.11	nd	0.17	0.20					
Berg member	reservoir (frozen)	2430_PS16_01	437.85	50.95	21.75	35.83	1.893	1.00E-05	1.00	4.87	nd	0.59	0.44	0.97	0.39	21.1	2.82	
		2430_PS16_03	437.70	51.00	21.80	34.79	1.828		2.50	8.59	nd	0.75	0.27					
		2430_PS16_04	437.85	50.97	21.70	34.64	1.838		3.80	10.27	nd	0.72	0.22					
		2430_PS16_06	437.70	50.92	21.65	35.01	1.868		8.00	19.85	nd	1.17	0.21					
		2430_PS32_05	493.85	50.95	25.43	49.64	1.918	1.00E-05	1.00	2.87		0.33	0.34	0.18	0.47	25.1	0.56	
							2.50		6.70									
					3.80	10.30												
Asse member	seal	2430_PS38_SS1	578.80	50.20	25.39	50.26	1.977	1.00E-06	2.00	4.45		0.32	0.44	1.24	-0.01	-0.6	2.46	
							4.90		7.19									
							9.00		11.30	11.01								
		2430_PS41_SS1	600.96	50.70	25.10	50.45	2.011	1.00E-06	2.00	6.05	5.48	0.69	0.33	1.81	0.04	2.5	3.79	
		2430_PS41_SS2	600.96	50.45	25.01	50.72	2.046		4.90	8.99	7.94	0.88	0.53					
		2430_PS41_SS3	600.95	50.35	24.80	50.43	2.073		9.00	13.66	12.23	0.97	0.51					
2430_PS47_SS1	604.96	50.85	25.10	52.16	2.073	1.00E-06	2.00	6.41	6.26	0.71	0.31	1.49	0.15	8.8	3.47			
2430_PS47_SS2	605.03	50.85	25.36	53.73	2.092		4.90	9.78	nd	0.49	0.32							
2430_PS47_SS3	605.03	50.70	25.42	54.12	2.103		9.00	15.85	nd	0.77	0.12							
Brussel sand member, sand	reservoir (frozen)	2430_PS56_05	673.48	77.23	38.11	163.16	1.852	1.00E-05	2.00	5.74	nd	0.68	0.28	0.54	0.48	25.7	1.73	
		2430_PS56_06	673.48	77.05	38.03	166.38	1.901		3.50	11.52	nd	1.12	0.19					
		2430_PS56_08	673.61	77.35	37.95	165.82	1.895		5.10	15.22	nd	1.56	0.23					
		2430_PS56_09	673.61	77.40	37.55	164.47	1.919		9.00	23.87	nd	1.94	0.20					
		2430_PS77_01	778.15	49.52	24.30	45.56	1.984	1.00E-05	2.00	10.09	nd	0.92	0.38	1.31	0.55	29.0	4.44	
		2430_PS77_02	778.00	50.88	24.60	48.79	2.018		5.10	19.40	nd	2.07	0.26					
2430_PS77_05	777.97	50.90	21.75	33.29	1.760	9.00	30.32		nd	2.33	0.26							
Brussel sand member, sand	reservoir	2430_PSRM_SS3	669.06	60.03	29.88	106.88	2.539	1.00E-05	9.00	74.58	63.45	25.84	0.22	-	-	-	-	
Brussel sand member, sand	reservoir	2430_PSRM_SS1	669.06	60.05	29.87	106.02	2.519	1.00E-05	2.00	54.85	23.83	15.42	0.11	9.10	1.00	46.0	44.97	
		2430_PSRM_SS2	669.06	60.04	29.87	107.84	2.563		5.10	85.15	46.50	25.08	0.16					
		2430_PSRM_SS4	669.14	60.01	29.91	108.89	2.582		9.00	93.27	73.74	26.96	0.18					

Figuur 8.15 Bepaling van geomechanische parameters van core-materiaal uit het Zand van Brussel Laagpakket en de bovenliggende afsluitende lagen (Jahns, 2024).

sample	2430_PS1	2430_PS8	2430_PS16	2430_PS38	2430_PS41	2430_PS47	2430_PS56	2430_PS77	2430_PSRM	
length [mm]	49.94	49.84	49.96	49.90	49.95	49.59	49.81	49.96	50.00	
α cycle 1 [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	preconditioning									
α cycle 2 [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	0.00	0.55	nd.	0.00	-0.12	0.19	nd.	nd.	9.19	
α cycle 3 [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	0.00	1.29	nd.	0.00	-1.10	0.93	nd.	nd.	9.01	
ave. 2./3. cycle [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	0.00	0.92	nd.	0.00	-6.71	0.56	nd.	nd.	9.10	
std. dev. 2./3. cycle [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	0.00	0.52	nd.	0.00	7.93	0.52	nd.	nd.	0.13	

Figuur 8.16 Bepaling van thermische expansiecoëfficiënt van core-materiaal uit het Zand van Brussel Laagpakket (Jahns, 2024).



Figuur 8.17 Bepaling van de maximale injectiedruk bij de ORO-01 locatie op basis van een SRIMA seal integrity berekening, gebruik makende van de nieuwe metingen van geomechanische parameters en Shmin (Appendix C).

Tabel 8.4 Gevoeligheidsanalyse voor de maximale injectiedruk op basis van de SRIMA berekening uit Figuur 8.17 voor verschillende reservoirdiktes en dieptes.

Bruto dikte Zand van Brussel Laagpakket (m)	Diepte top Zand van Brussel Laagpakket (m)	Maximale injectiedruk (MPa)
169	628	4.70
169	750	5.58
169	900	6.86
169	560	4.07
100	628	4.65
100	750	5.51
100	900	6.76
50	628	4.14
50	750	5.62
50	900	6.62

Figuur 8.17 toont het resultaat van de “Refine EIP” functie voor een SRIMA *seal integrity* analyse voor het Zand van Brussel Laagpakket ter hoogte van ORO-01. De maximale injectiedruk volgens SRIMA is 4.7 MPa, aanzienlijk hoger dan volgens het SodM injectiedrukprotocol berekende waarden (Figuur 8.13). Een hoog-over analyse is uitgevoerd om de implicatie van de XLOT’s en geomechanische metingen op de mogelijke injectiedrukken in het projectgebied te toetsen. Hierbij is eerst op basis van offset well tops geconcludeerd dat de volgende relatie min of meer geldt voor de Voorne Trog:

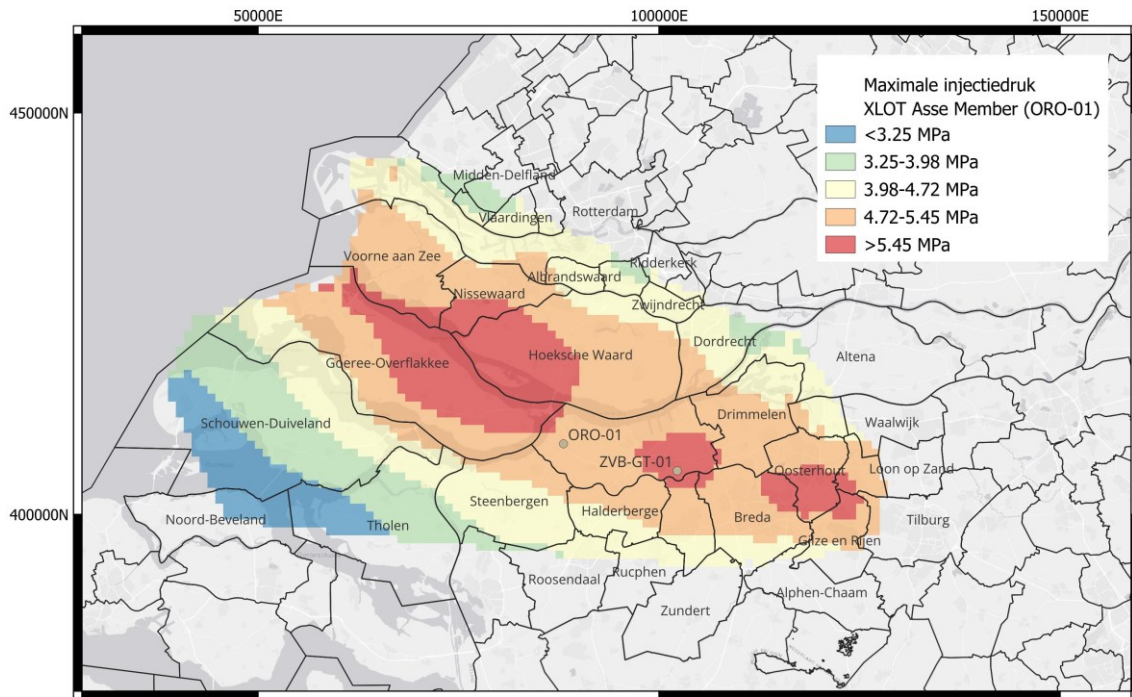
$$\frac{H_{Brussel}}{H_{Asse}} = 0.0045 \cdot Z_{reservoir} - 2.4132$$

Vervolgens is de *seal integrity* analyse in SRIMA meermaals uitgevoerd voor verschillende reservoirdiktes en dieptes (Tabel 8.4). Op basis van een lineaire regressie van de resultaten kon de volgende benadering (*R-squared: 0.985*) van de maximale injectiedruk in MPa worden achterhaald:

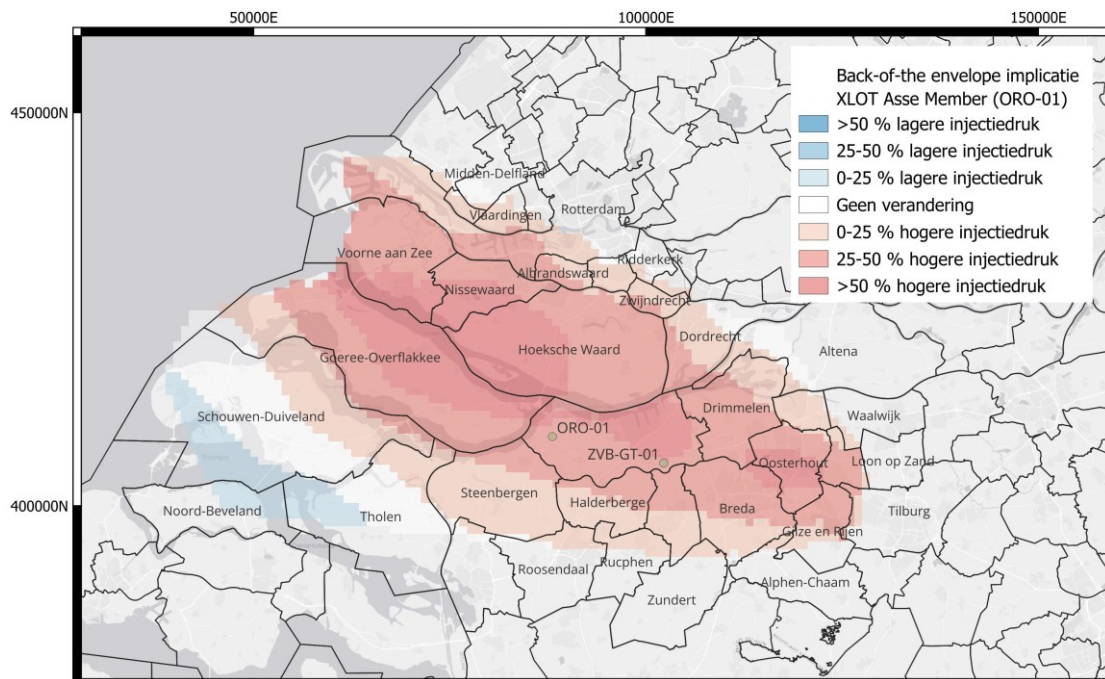
$$EIP = -0.897 + 0.0020 \cdot H_{Brussel} + 0.00828 \cdot Z_{reservoir}$$

Nieuwe kaarten van de maximale injectiedruk zijn op basis van deze methode berekend. Figuur 8.18 toont de op basis van de XLOT’s en geomechanische metingen afgeleiden maximale injectiedruk kaart voor het Zand van Brussel Laagpakket. Figuur 8.19 toont de implicatie van ORO-01 op de maximaal haalbare injectiedruk. Aan de hand van de nieuwe metingen kan een significant hogere injectiedruk worden onderbouwd dan met het SodM-injectiedrukprotocol, op sommige locaties tot wel 1.5x hoger. De reden hiervoor is dat de dikte en eigenschappen van de Asse Member in de SodM methodiek geen rol spelen. Deze member is dus dik genoeg om zwaardere injectiedrukken dan door het SodM injectiedrukprotocol worden voorgeschreven te absorberen.

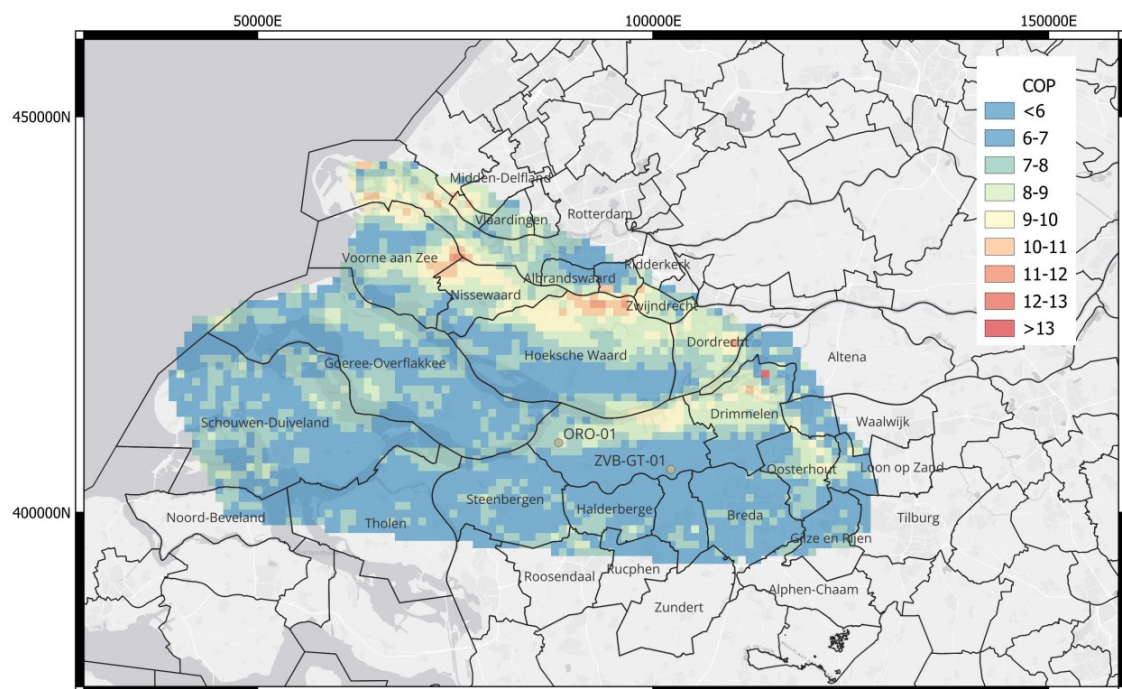
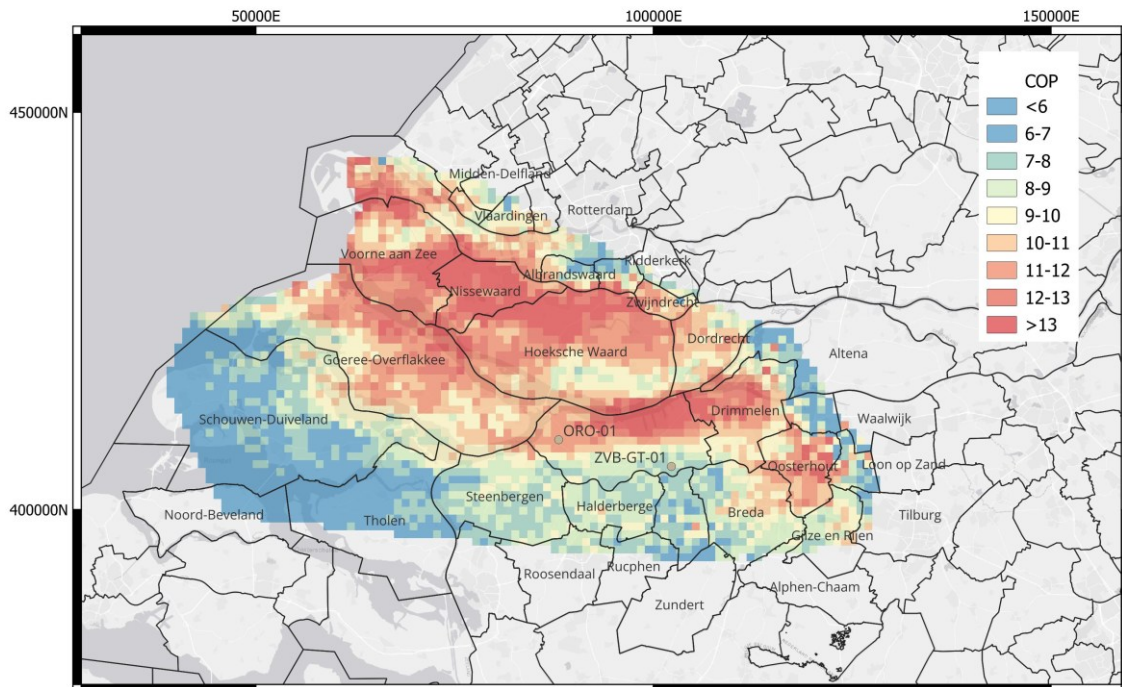
Figuur 8.20 brengt de impact van deze verhoogde injectiedrukken op de COP in het projectgebied in kaart. Figuur 8.21 toont de impact van de verhoogde injectiedrukken voor de flow rate. De COP voor de verhoogde injectiedruk verlaagt gemiddeld met circa 4 punten. De technisch haalbare debieten verhogen echter gemiddeld met ongeveer 100 m³/hr bij het gebruik van de verhoogde injectiedrukken. Deze hogere injectiedrukken welke op basis van de XLOT’s zijn onderbouwd worden dus gebruikt in het resterende deel van deze studie voor het bepalen van de potentiekaarten.



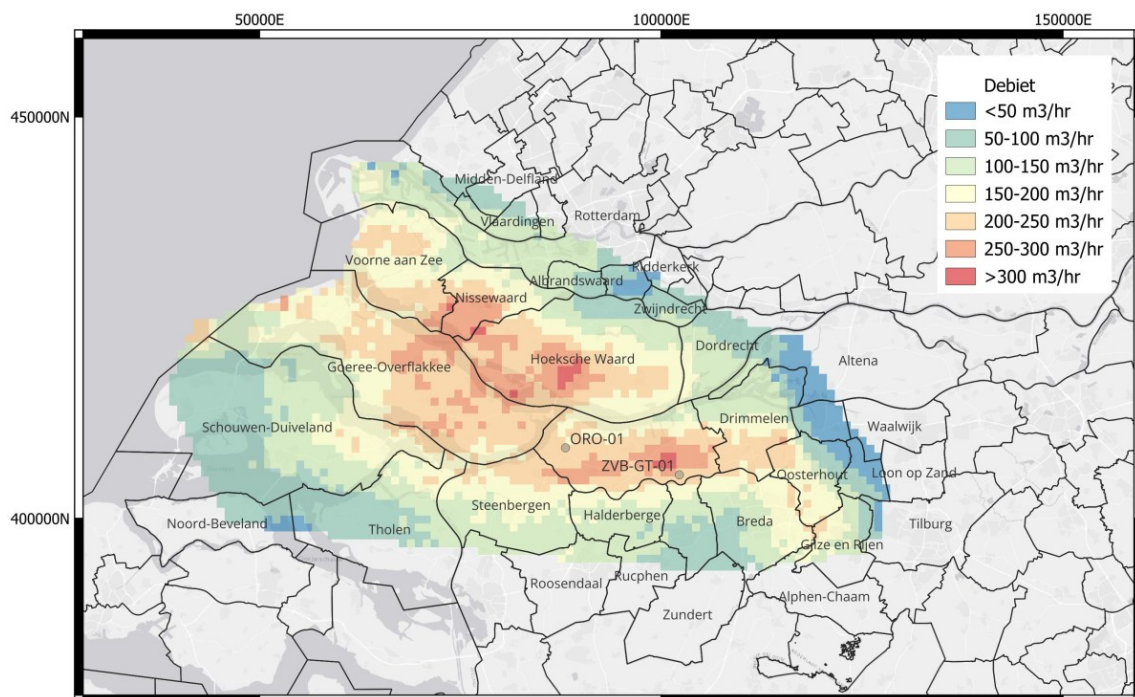
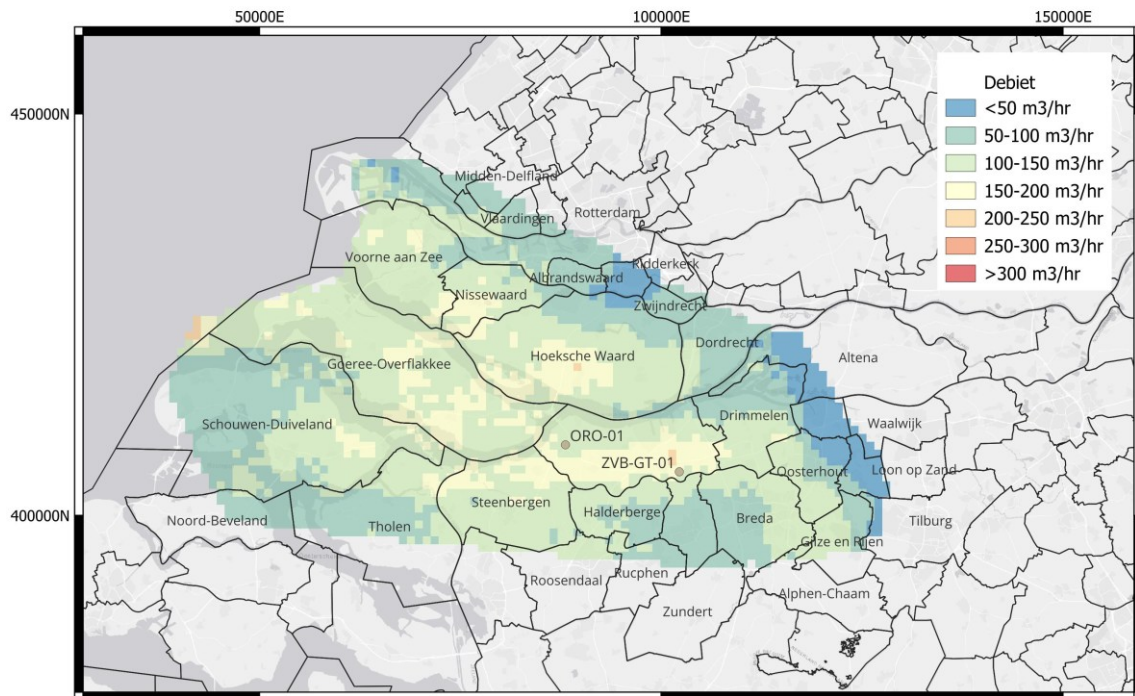
Figuur 8.18 Maximale injectiedruk in het onderzoeksgebied op basis van SRIMA seal integrity berekeningen gebruik makende van nieuw gemeten geomechanische parameters.



Figuur 8.19 Residual van de maximale injectiedruk op basis van de nieuwe geomechanische metingen en de maximale injectiedruk op basis van het SodM injectiedrukprotocol.



Figuur 8.20 P50 COP voor een put ($\theta=70^\circ$) op basis van de maximale injectiedruk uit het SodM injectiedrukprotocol (boven), en op basis van de maximale injectiedruk op basis van de nieuwe geomechanische metingen (beneden).



Figuur 8.21 P50 Debiet voor een put ($\theta=70^\circ$) op basis van de maximale injectiedruk uit het SodM injectiedrukprotocol (boven), en op basis van de maximale injectiedruk op basis van de nieuwe geomechanische metingen (beneden).

8.3.4.2 Geïnduceerde seismiciteit

De geomechanische data welke uit in de ORO-01 put is verzameld (Figuur 8.14, Figuur 8.15, en Figuur 8.16) bevat veel informatie om de risico's van geïnduceerde seismiciteit als gevolg van productie uit het Zand van Brussel Laagpakket te toetsen. Het risico van geïnduceerde seismiciteit is aanwezig bij het verspreiden van een koudebel in de buurt van een breuk welke door de temperatuurverandering kritisch gespannen kan raken. Zoals is te zien in Figuur 8.11 speelt dit risico vooral in een buffer rondom de Rijen breuk, aan de oostzijde van het projectgebied.

Figuur 8.22 geeft de TLS voor aardwarmte weer (KGG, 2025) waarin maatregelen worden gedefinieerd bij het optreden van geïnduceerde seismische events nabij een aardwarmtelocatie. Geïnduceerde events met een PGV van 33 mm/s worden hierbij als onacceptabel gezien en leiden tot een (tijdelijke) productiestop, en mogelijk een schadevergoeding van de geothermie Operator aan gebouw eigenaren. Events met een PGV van minder dan 0.3 mm/s worden als microseismisch geclassificeerd. Hierbij wordt geen actie voorgeschreven. Tussen 0.3–33 mm/s zijn volgens het TLS verschillende acties van verschillende ernst voorgeschreven.

TLS voor aardwarmte

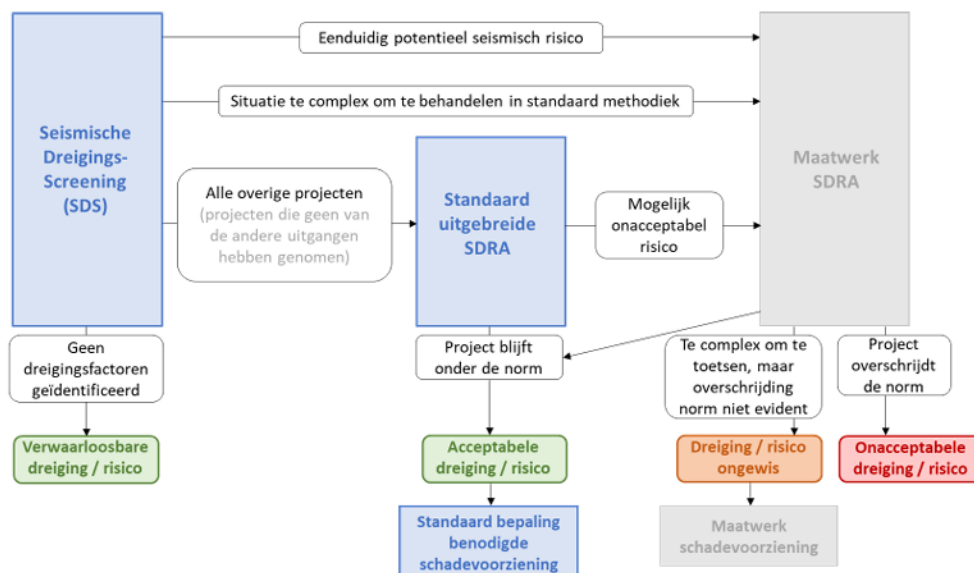
Voor aardwarmte geldt een Traffic Light System (TLS, stoplichtsysteem) dat aansluit bij de geldende wet- en regelgeving. De TLS voor matrix gedomineerde geothermiesystemen wordt hieronder weergegeven. Onderdelen zijn het effect aan het oppervlak/voor mensen, de PGV¹ drempels, acties en de kleurcode van de TLS.

Effect aan oppervlak / voor mensen	PGV-drempels	Acties	
Microseismiciteit	PGV < 0,3 mm/s	Publicatie trilling door KNMI, indien lokaal netwerk aanwezig is ²	
Niet voelbaar	0,3 mm/s ≤ PGV < 1 mm/s	Publicatie trilling door KNMI Onderzoek door vergunninghouder + Communicatie conform communicatieplan	
Voelbaar	1 mm/s ≤ PGV < 3 mm/s	Publicatie trilling door KNMI Onderzoek door vergunninghouder ³ + Communicatie conform communicatieplan	
Mogelijk schade veroorzakend	3 mm/s ≤ PGV < 33 mm/s	Publicatie trilling door KNMI Stoppen productie + Onderzoek door vergunninghouder. + Mogelijke herstart onder voorwaarden + Communicatie conform communicatieplan	
Mogelijke overschrijding norm voor veiligheidsrisico	PGV ≥ 33 mm/s	Publicatie trilling door KNMI Stoppen productie + Communicatie conform communicatieplan	

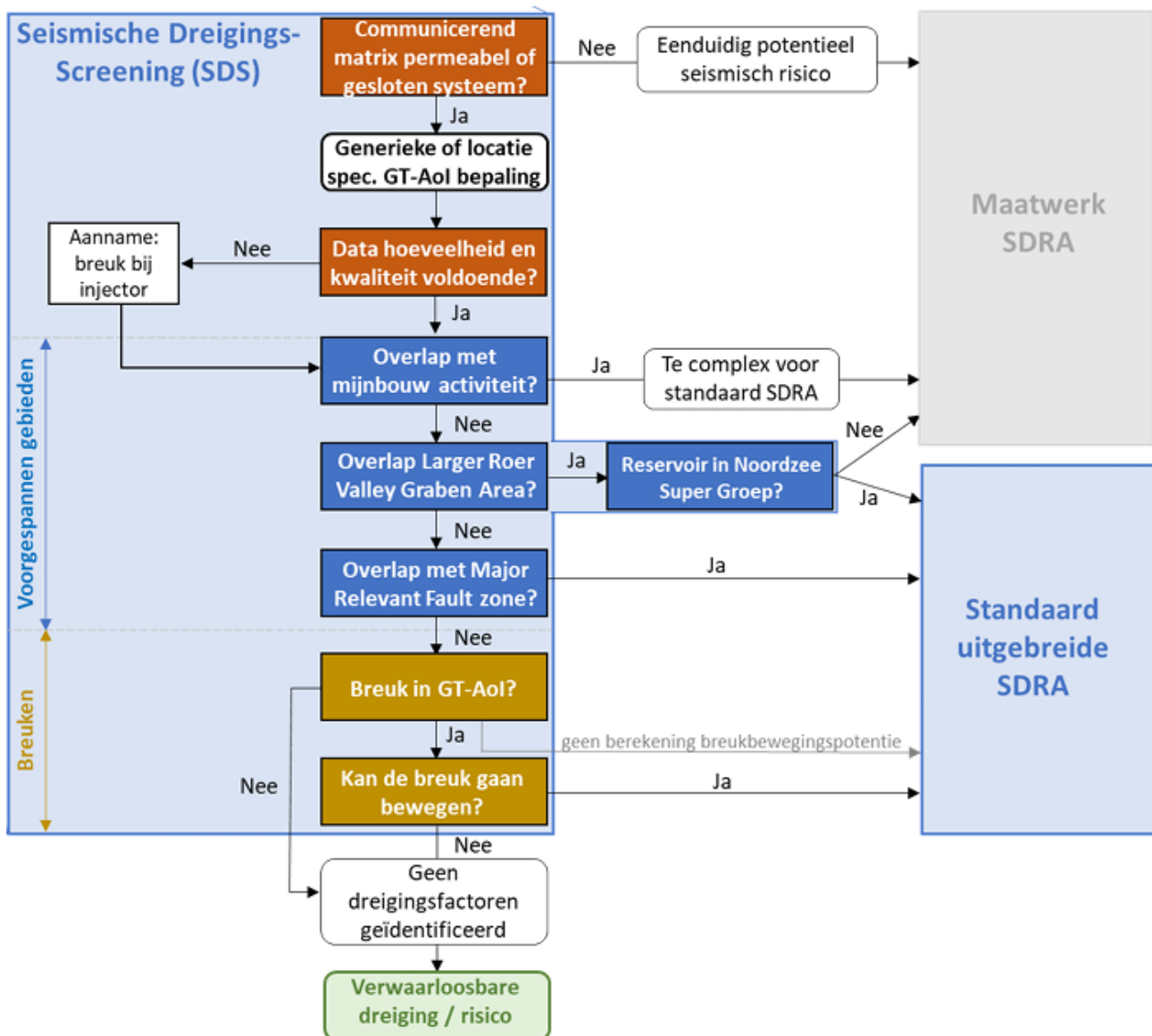
Figuur 8.22 Standaard Traffic Light System voor Nederlandse aardwarmteprojecten.

Indien er op enig moment tijdens operaties een schadeveroorzakende beving optreedt, dan is wettelijk geregeld dat de schade moet worden vergoed. Het aardwarmtebedrijf zorgt ervoor dat er voldoende financiële middelen zijn om deze eventuele schade te vergoeden. Bij de vergunningaanvraag en gedurende de winningsfase wordt dit getoetst door het bevoegd gezag. Daarnaast is in de Mijnbouwregelgeving opgenomen dat voor ieder aardwarmteproject bij het aanvragen van een startvergunning onder meer moet worden aangetoond dat het project voldoet aan de gestelde veiligheidsnorm (Mbw artikel 24o) en moet worden onderbouwd wat de effecten van een mogelijke beving zouden kunnen zijn. Hiervoor hebben TNO-AGE en EBN in opdracht van het ministerie van EZK een methodiek ontwikkeld met bijbehorende rekentool en het rapport onder de naam Seismische Dreiging en Risico Analyse (SDRA) voor aardwarmte (Mijnlieff *et al.*, 2023). Met de methodiek kan bepaald worden hoe sterk een beving - in een extreem negatief scenario - in theorie zou kunnen zijn. De uitkomst is de groundbeweging aan het maaiveld uitgedrukt in de snelheid (mm/s), ook wel *Peak Ground Velocity* (PGV). Als de PGV onder de 3 mm/s blijft is ruimschoots voldaan aan de veiligheidsnorm.

Figuur 8.23 toont de hoog-over structuur van deze methodiek. De SDRA kan afhankelijk van de grootte van het risico langs drie sporen worden uitgevoerd: de Seismische Dreiging Screening (SDS) voor projecten zonder dreigingsfactoren, de standaard uitgebreide SDRA voor niet complexe projecten met dreigingsfactoren, en de maatwerk SDRA voor complexe projecten met dreigingsfactoren. De eerdergenoemde SRIMA-tool, stelt de gebruiker in staat om op basis van reservoir eigenschappen een standaard uitgebreide SDRA uit te voeren. De geüpdatete geomechanische parameters - met name de Young's Modulus - van het Zand van Brussel Laagpakket aan de hand van de ORO-01 data acquisitie geeft deze analyses nu meer zekerheid.



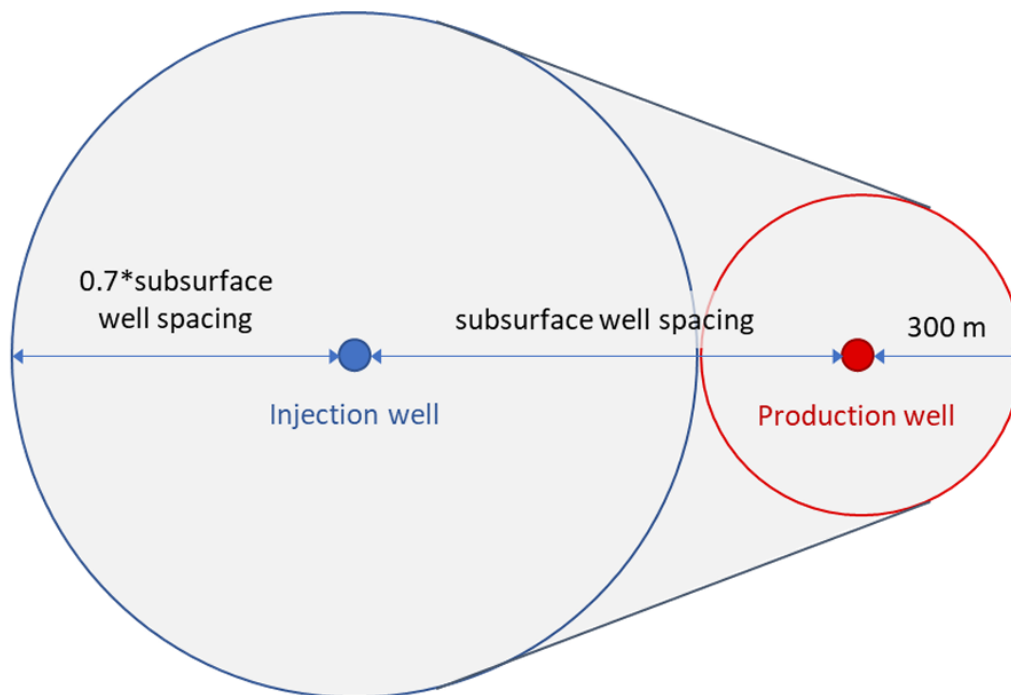
Figuur 8.23 Algemene flowchart voor het toetsen van de risico's voor geïnduceerde seismiciteit in Nederlandse aardwarmteprojecten.



Figuur 8.24 Flowchart voor het uitvoeren van een Seismische Dreiging Screening.

Figuur 8.24 geeft het stappenplan weer van de SDS weer. Voor het Zand van Brussel Laagpakket zijn hierbij twee zaken van belang: de grootte van het GT-Aol, en de aanwezigheid van een breuk in de nabijheid van het doublet. Bij gebrek aan dynamisch simulaties, welke locatie-specifiek moeten worden uitgevoerd en daardoor geen onderdeel van de scope van deze studie, kan het GT-Aol volgens de methode uit Figuur 8.25 worden bepaald. Gegeven een minimale putafstand van 1,340 m (sectie 8.3.2.1) is de SDS voldoende voor projecten in het Zand van Brussel Laagpakket in de volledige Voorne Trog, met uitzondering van een bufferzone van 938 m rondom de Rijen breuk. In dit gebied gelden dus ook geen risico's op geïnduceerde seismiteit.

Het gebied waar dit restrisico nog wel aanwezig is, is ruwweg weergegeven aan de hand van de bufferzone in Figuur 8.11. Voor dit gebied moet een standaard (en mogelijk maatwerk) SDRA worden uitgevoerd. De methode voor deze analyse is als stappenplan weergegeven in Figuur 8.26.

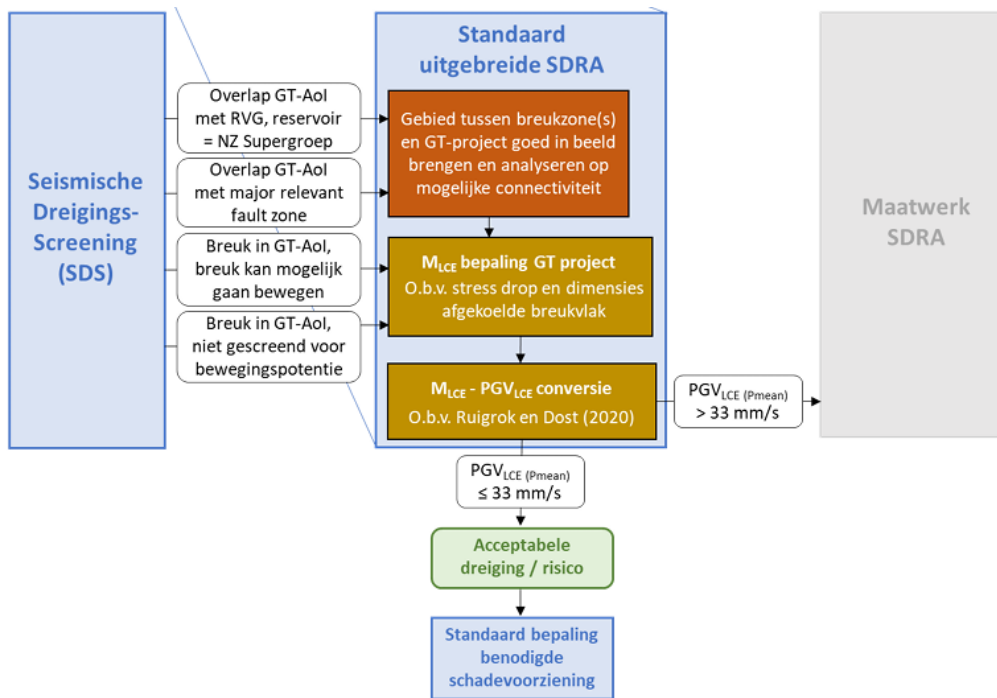


Figuur 8.25 Conservatieve methode voor de bepaling van de GT-Aol op basis van putafstand.

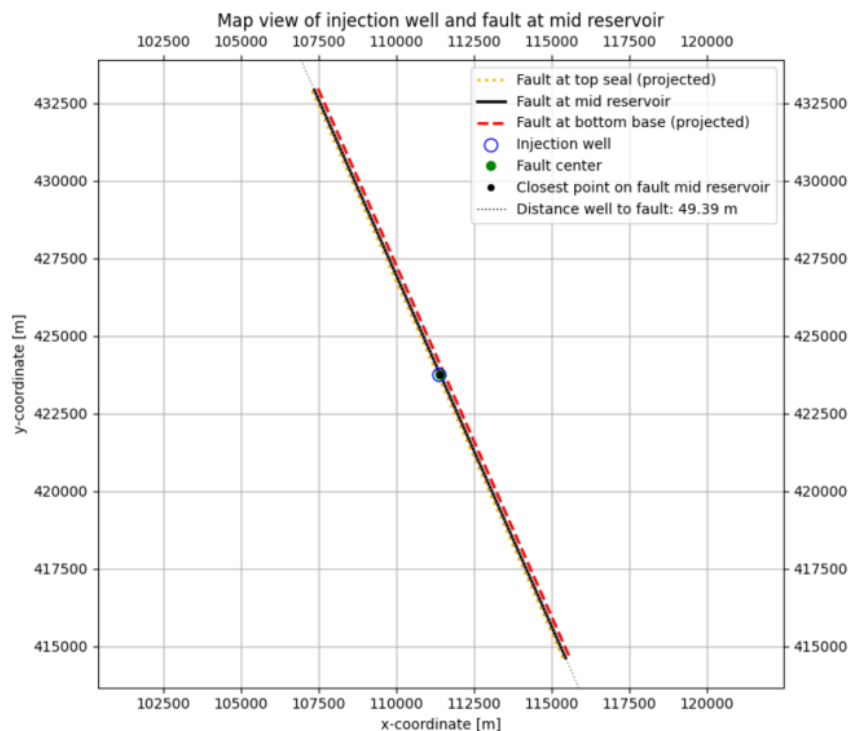
Voor dit onderzoek is een voorbeeldberekening uitgevoerd in SRIMA op basis van de geometrie van de Rijen breuk, de eigenschappen van het Zand van Brussel Laagpakket nabij deze breuk, en de geomechanische parameters uit Figuur 8.14, Figuur 8.15, en Figuur 8.16. De locatie van de injector is op 50 m afstand van de Rijen breuk genomen bij een reservoirdiepte van 628 m (Figuur 8.27) en er is gekozen voor een gemiddeld debiet van 400 m³/u. Dit debiet is extreem hoog vergeleken met wat er technisch haalbaar is, en illustreert daarmee een zeer conservatieve case.

Figuur 8.28 laat zien dat de P50 PGV na 30 jaar productie in een dergelijk scenario slechts 0.38 mm/s is (LCE van M1.28, Figuur 8.30). Volgens Figuur 8.26 is er dan een standaard bepaling benodigde schadevoorziening nodig, welke afhankelijk is van de straal rond het epicentrum waarin de PGV hoger is dan 3 mm/s, en welk percentage van de bebouwing binnen straal kans heeft op beschadigingen. Figuur 8.29 toont aan dat in het geval van productie in het Zand van Brussel Laagpakket, de reservering voor dit schadefonds minimaal is.

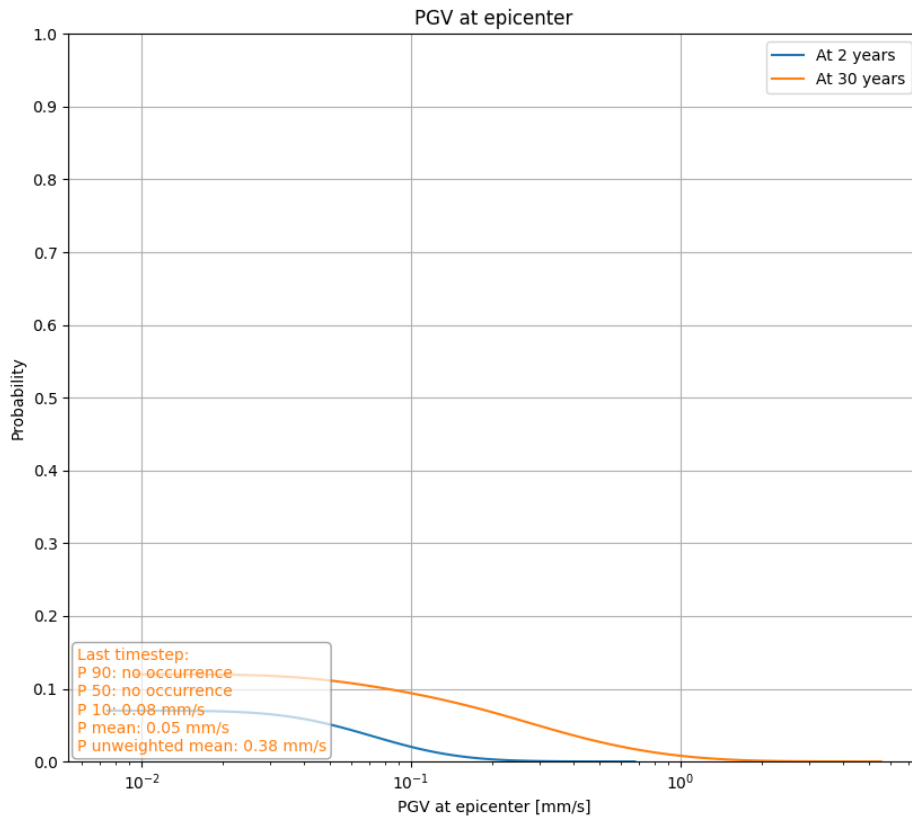
De reden risico's van geïnduceerde seismiciteit zijn dus vrijwel verwaarloosbaar voor aardwarmteproductie uit het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne. De belangrijkste reden hiervoor is de relatieve lage mate van consolidatie in het reservoir, welke zich uit in zeer lage Young's Moduli. Deze conclusie wordt tevens onderschreven in Aben *et al.* (2024). De Young's Modulus bepaalt de mate van stijfheid van gesteente, en daarmee de mate waarmee spanningsopbouw door de rots kan worden geacommodeerd. De impact van de Young's Modulus op de LCE voor een diep reservoir wordt aangetoond door de tornado plot in Figuur 8.31, welke voor een ander project is opgesteld.



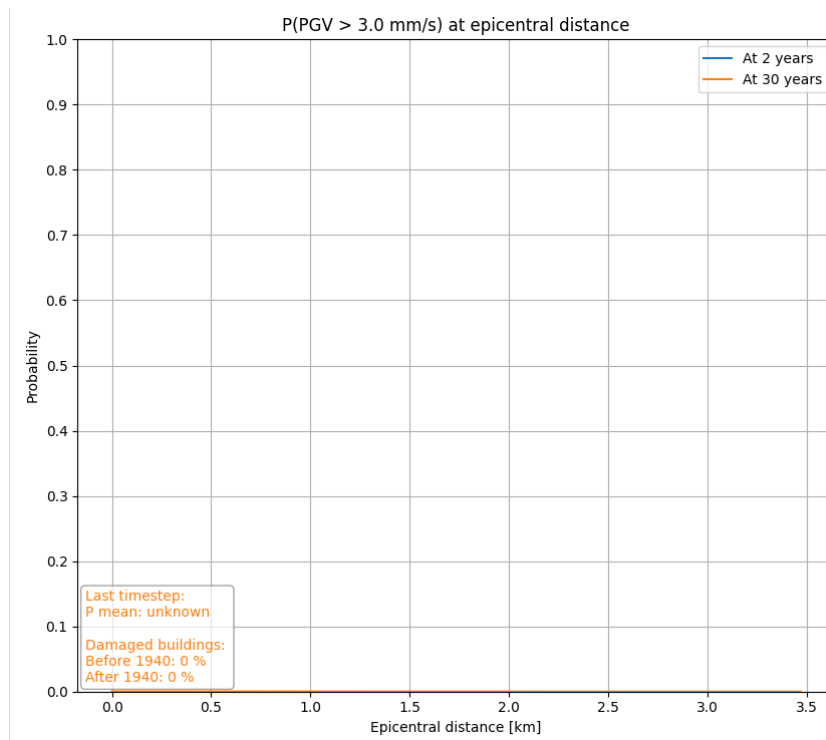
Figuur 8.26 Flowchart voor het uitvoeren van een uitgebreide SDRA.



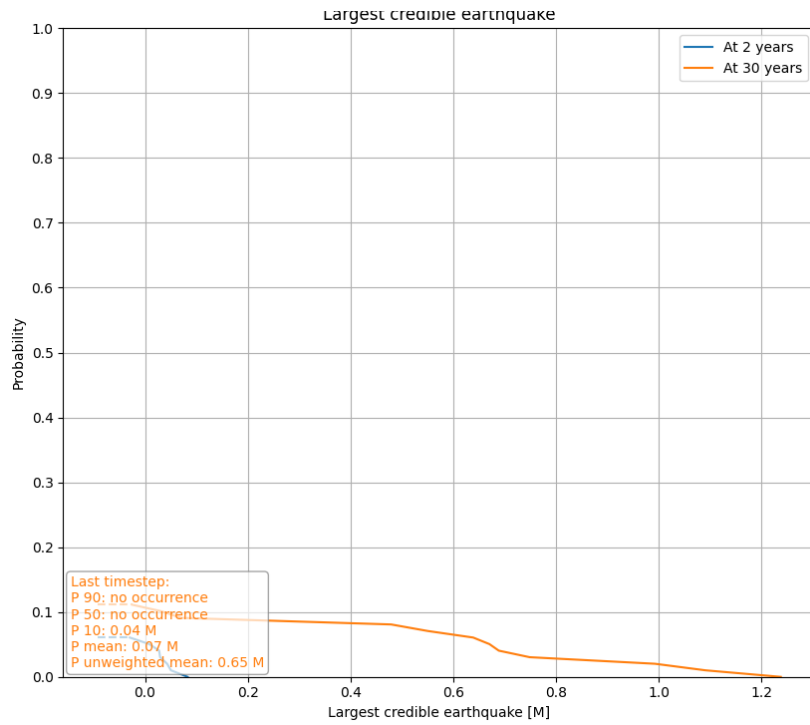
Figuur 8.27 Geometrie van de Rijen breuk in SRIMA, inclusief locatie van een hypothetische injector.



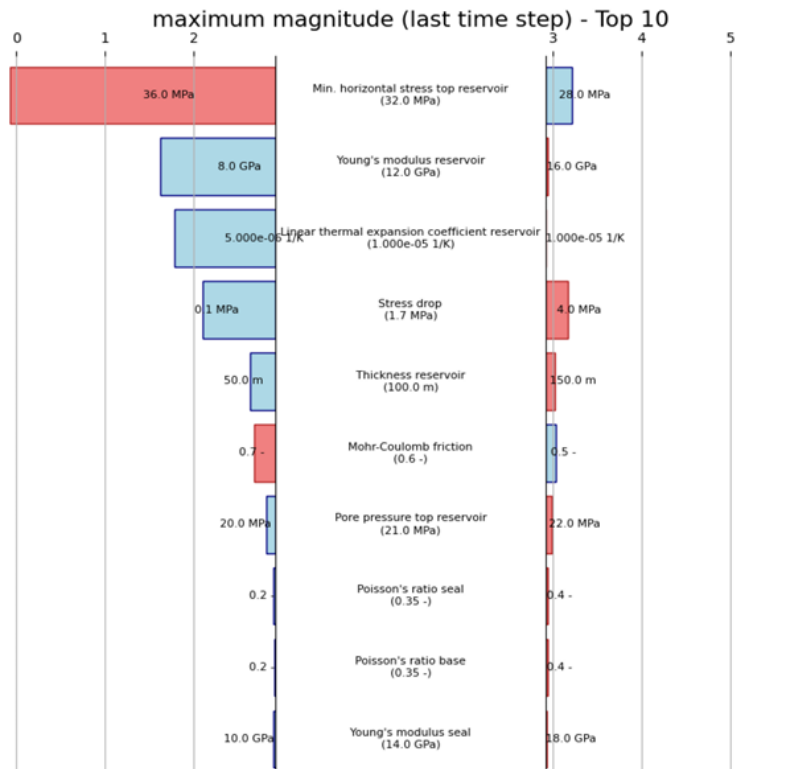
Figuur 8.28 Peak ground velocity (PGV) voor een voorbeeldproject nabij de Rijen breuk.



Figuur 8.29 Afstand tot epicentrum van 3 mm/s beving bij een voorbeeldproject bij de Rijen breuk.



Figuur 8.30 Largest credible earthquake (LCE) voor een voorbeeldproject nabij de Rijen breuk.



Figuur 8.31 Tornado plot van de sensitiviteit van diverse parameters voor de LCE bij een diep geothermieproject (TNO-AGE, 2023).

8.3.4.2.1 Maximaal gemiddeld jaardebiet

Zoals in de voorgaande sectie is aangetoond is er in het projectgebied dus geen begrenzing nodig van het gemiddelde debiet van het aardwarmtesysteem ter voorkoming van de geïnduceerde seismiciteit risico's. In de potentieberekeningen worden dus alleen de afwegingen uit sectie 8.1.4.1 aangehouden.

8.3.5 Abandonneringsfase

De abandonnering wordt relevant aan het einde van de levensduur van een aardwarmtesysteem. Hierbij is het van belang dat de minimaal de afsluitende laag van het reservoir; de Asse Member, en de wellhead aan het oppervlak met cementpluggen worden afgesloten. Het is voor nieuwe projecten van belang dat hiervoor budget in de ontwikkelkosten wordt opgenomen, maar heeft verder geen relevantie voor de potentieberekeningen.

8.4 Geothermische potentie

De resultaten van de potentieberekeningen zijn voor verschillende scenario's in de P50 cases weergegeven. Appendix E weergegeven de P10 en P90 cases. In overleg met EBN zijn de kaarten tweemaal berekend. De eerste keer zonder economische begrenzing, met het doel om de maximaal haalbare vermogens uit het Zand van Brussel Laagpakket te achterhalen. Daarnaast is een serie kaarten berekend met een minimale ondergrondse COP van 15. Deze grenswaarde zien wij als een minimale economische randvoorwaarde. De kaarten van dit economische minimum worden verder besproken in het Stap 2 rapport.

De kaarten in deze paragraaf weergegeven de potentie op basis van drie putontwerpen:

- Putten met een inclinatie van **45 graden**. Deze kaarten leveren slechts resultaten op voor een deel van het onderzoeksgebied, daar waar het reservoir een bepaalde minimale diepte heeft. De reden hiervoor wordt in Figuur 8.3 gevisualiseerd. Wanneer het reservoir ondiep is kunnen putten met een lage inclinatie niet voldoende *outstep* bereiken om tot de vereiste minimumafstand tussen de productie- en injectieput te komen. Pas vanaf een putinclinatie van rond de 60 graden is productie uit het Zand van Brussel Laagpakket overal in het onderzoeksgebied mogelijk. Dit is een belangrijke conclusie, want vanaf inclinaties van **60 graden** treden boor- en operationele uitdagingen (zoals beschreven in sectie 8.3.1) voor het eerst op.
- Putten met een inclinatie van **70 graden**. Deze kaarten leveren resultaten op voor het gehele onderzoeksgebied. Bij inclinaties van 70 graden is er nog net geen sprake van significante contributies van stromingsregimes naast *Darcy radial flow* zoals *linear flow* (zie sectie 8.1.2.9). De lastig te modelleren effecten van anisotropie worden bij dit putontwerp dus nog geminimaliseerd. Om deze redenen worden de resultaten voor de 70 graden inclinatie als *base case* gebruikt in het Stap 2 rapport, waarin de ondergrondse potentie aan de bovengrondse warmtevraag wordt gekoppeld.

- (Sub-) horizontale putten met een inclinatie van **85 graden**. De PI van deze putten wordt via een andere methodiek berekend (zie sectie 8.1.2.9). De aanwezigheid van anisotropie speelt hierbij een grote rol. Omdat in dit onderzoek geen *dynamische simulaties* zijn uitgevoerd, gaan er significante onzekerheden gepaard met de formulering van anisotropie die wij gebruiken (zie sectie 8.1.2.8). Daarnaast gaan horizontale putten in dit reservoir gepaard met boor-, en operationele risico's welke ook al in Zevenbergen zijn ondervonden (zie sectie 8.3.1). De significant hogere PI welke we associëren met horizontale putten wordt tegengewerkt door relatief snellere doorbraaktijden bij hoge debieten, in verband met de lagere effectieve netto reservoirdikte (zie sectie 8.1.4.1). Tenslotte is de Capex van een doublet met horizontale putten aanzienlijk hoger dan die voor (sterk) gedeveerde putten. Om die reden, ook al zorgen horizontale putten op sommige locaties voor verhoogde debieten, nemen we in de rest van het onderzoek de 70 graden case aan als *base case*, en wordt voor horizontale putten geen economische potentie berekend.

8.4.1 Debiet

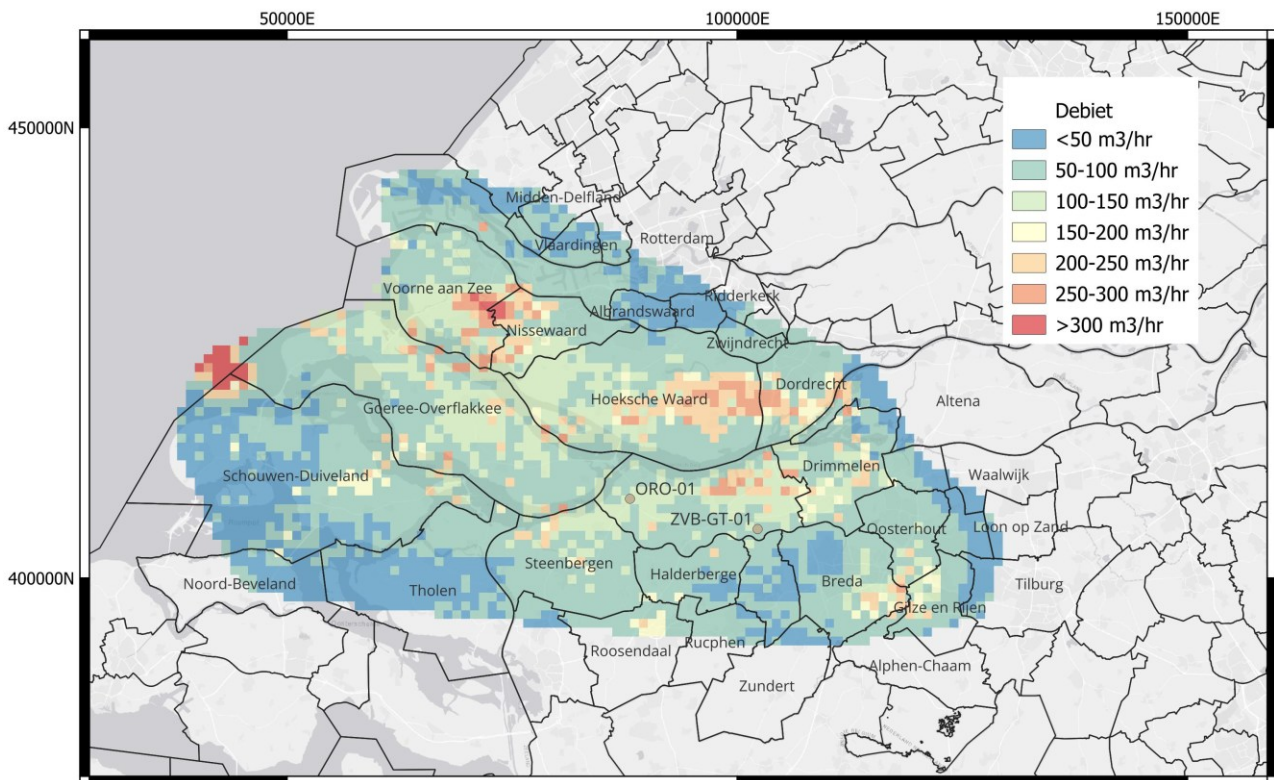
8.4.1.1 Technisch haalbaar

De kaarten in Figuur 8.32-Figuur 8.34 tonen de P50 technisch haalbare debieten voor doubletten met verschillende inclinaties. Omdat debiet direct afhankelijk is van transmissiviteit volgen de kaarten de trend in de eerder besproken transmissiviteitskaart (Figuur 8.5).

Voor licht gedeveerde putten met een inclinatie van 45° variëren de technisch haalbare debieten met 150-300 m³/u in het centrum van het onderzoeksgebied. Buiten de centrale as ligt het Zand van Brussel Laagpakket niet diep genoeg voor een putinclinatie van 45°.

De kaart voor een putinclinatie van 70° volgt min of meer hetzelfde patroon met iets verhoogde debieten en een dekking over het gehele onderzoeksgebied.

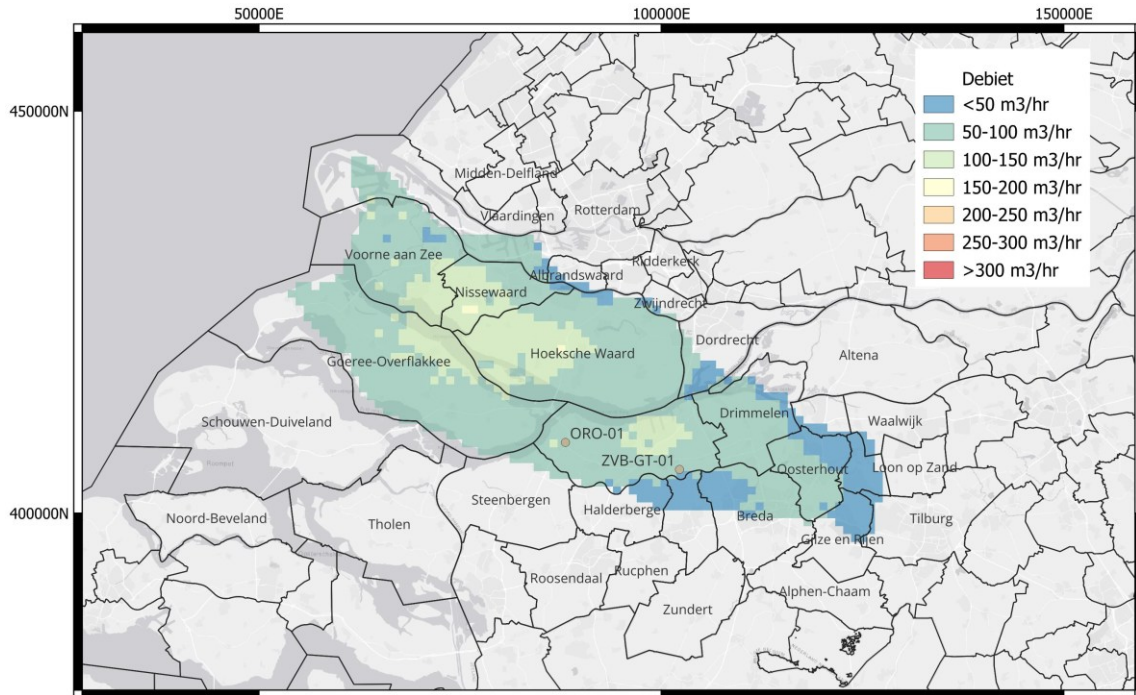
Voor sub horizontale putten ziet de kaart er significant anders uit. Debieten zijn in de centrale as van het onderzoeksgebied over het algemeen lager dan in de 70 graden kaart met waardes tussen 100-150 m³/u en lokaal, op locaties met een lage anisotropie, uitschieters die hoger zijn dan in de andere kaarten, bijvoorbeeld bij Schouwen Duiveland, Dordrecht, en de grens tussen Voorne aan Zee en Nissewaard.



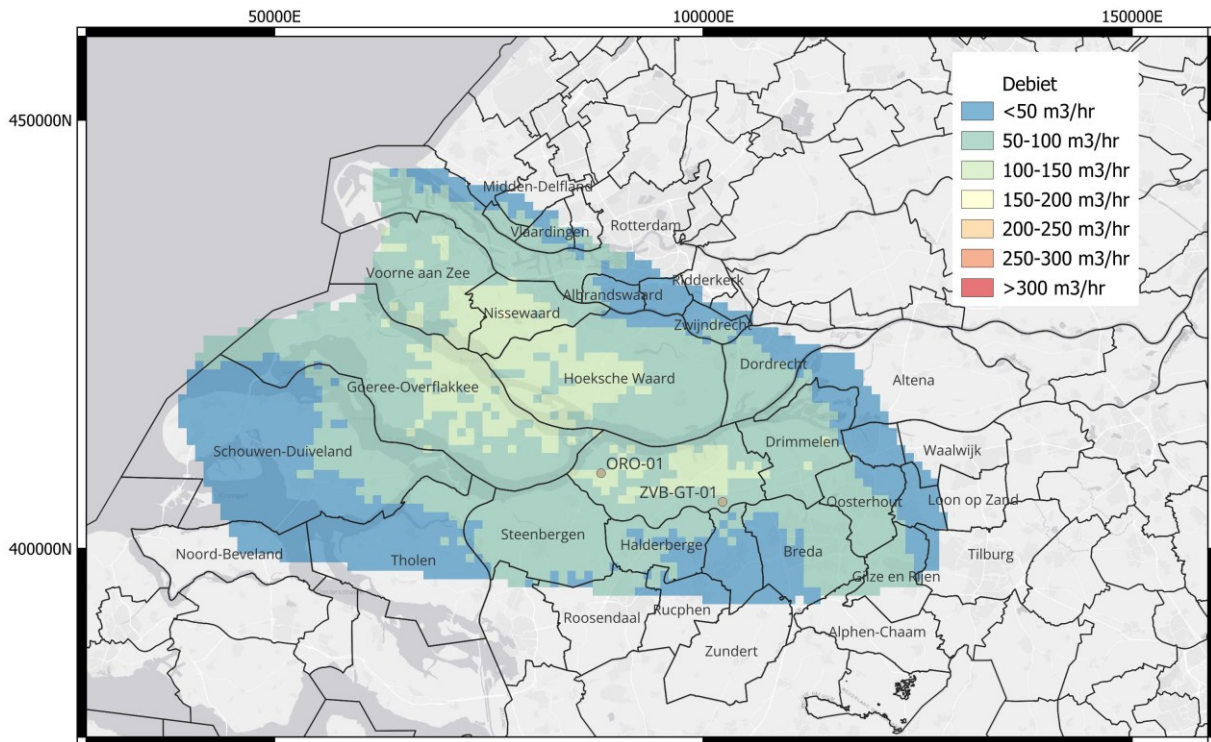
Figuur 8.34 Technisch haalbaar debiet $\theta=85^\circ$ – P50.

8.4.1.2 Economisch haalbaar

Uitgaande van een minimale ondergrondse COP van 15 zijn kaarten gemaakt van de economisch haalbare debieten (Figuur 8.35 en Figuur 8.36). De debieten zijn in deze kaarten aanzienlijk lager dan in technische maxima uit de voorgaande sectie met debieten in de centrale as van de Voorne Trog van rond de 100-150 m³/u en in enkele gevallen 150-200 m³/u. De hoogste debieten lijken haalbaar nabij Zevenbergen, en in het grensgebied van de gemeentes Hoeksche Waard, Nissewaard, en Goeree-Overflakkee. Opmerkelijk is dat de 45° kaart relatief iets hogere economische debieten oplevert dan de 70° kaart. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door extra wrijvingsverliezen in de meer gedeveierde putten.



Figuur 8.35 Economisch haalbaar debiet- $\theta=45^\circ$ - P50.



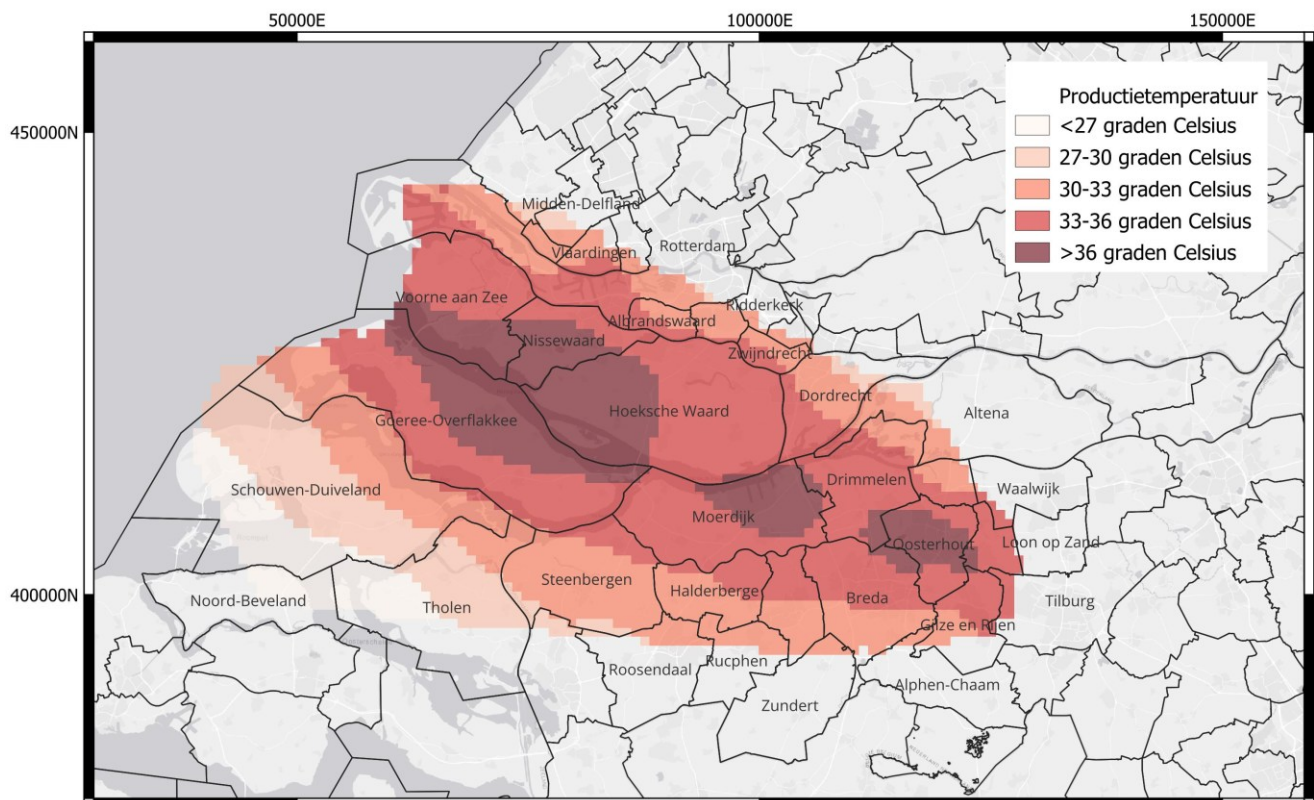
Figuur 8.36 Economisch haalbaar debiet- $\theta=70^\circ$ - P50.

8.4.2 Productietemperatuur

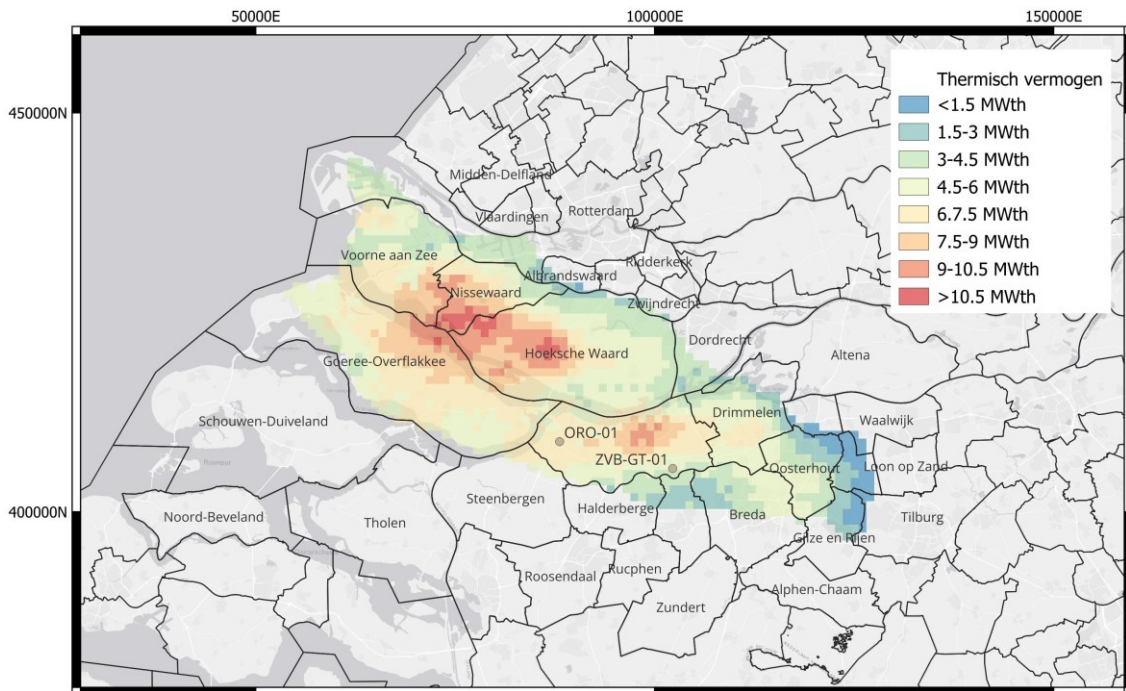
Door de zeer lage residuals van de seismische interpretatie, eerder besproken in Hoofdstuk 6, is er weinig variatie in de productietemperatuur. Daarnaast is de sensitiviteit van de productietemperatuur op variaties in het debiet vrijwel verwaarloosbaar. De kaart in Figuur 8.37 is om die reden representatief voor alle gemodelleerde cases.

Te zien is dat de productietemperatuur zeer nauw de dieptevariaties van het Zand van Brussel Laagpakket volgt, met waarden van <math><30^{\circ}\text{C}</math> aan de Zeeuwse kant van het onderzoeksgebied, en tot $>37^{\circ}\text{C}$ in de centrale as van de Voorne Trog. De productietemperatuur is bepalend voor de COP op systeemniveau. Dit betekent dat als de kaarten aangeven dat er sprake is van een relatief goed thermisch vermogen aan de Zeeuwse kant van het projectgebied, moet worden ingecalculeerd dat een aardwarmteproject in dit gebied extra efficiëntieverliezen zal incasseren wanneer een systeem op basis van centrale warmtepompen wordt overwogen. Het tegenovergestelde geldt voor de gebieden in het centrale deel van de Voorne Trog, met name het grensgebied tussen de gemeentes Nissewaard, Hoeksche Waard, en Goeree-Overflakkee.

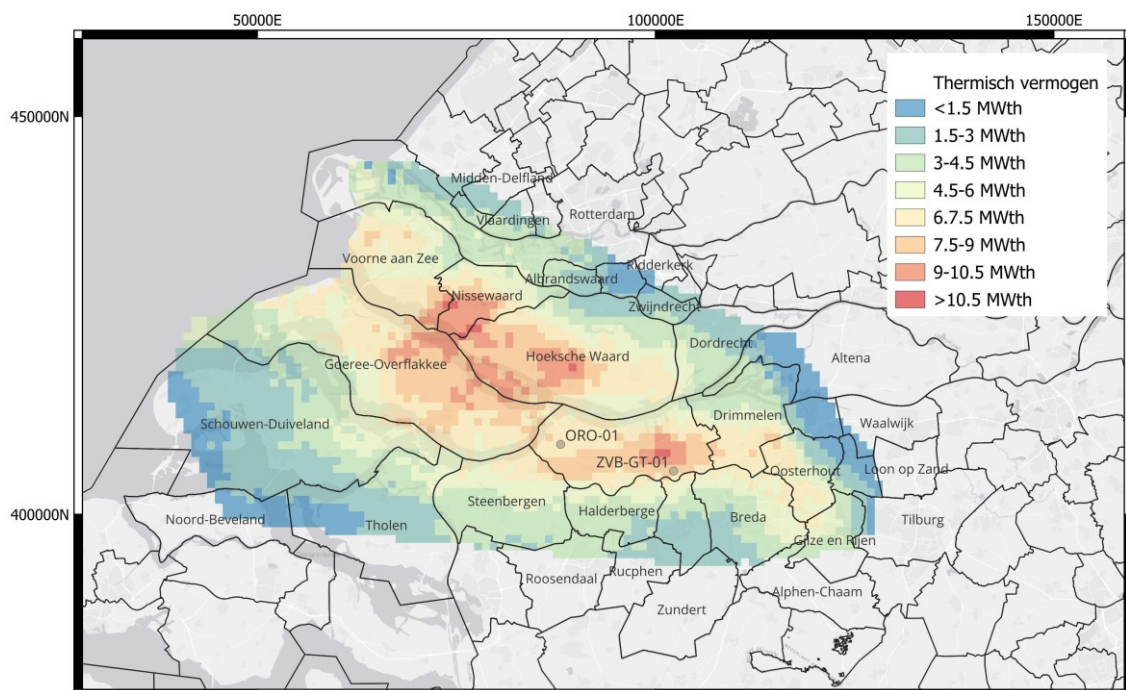
De implicaties van de aardwarmtepotentie op bovengronds systeemniveau worden besproken in het Stap 2 rapport.



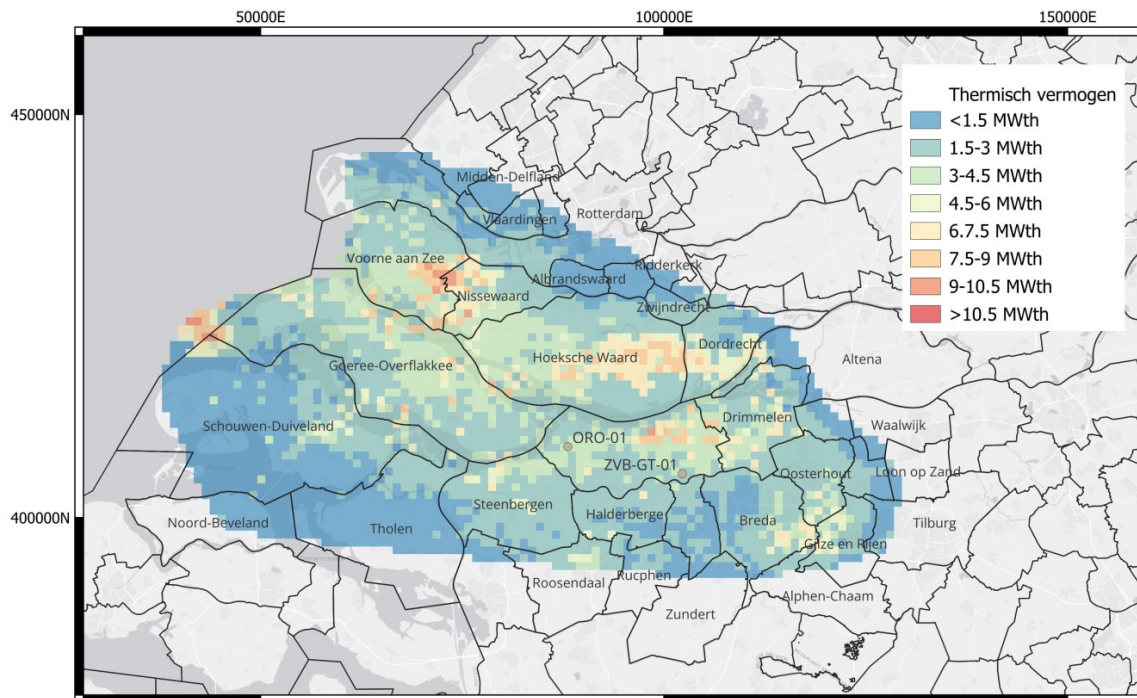
Figuur 8.37 Productietemperatuur.



Figuur 8.38 Technisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=45^\circ$ – P50.



Figuur 8.39 Technisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=70^\circ$ – P50.



Figuur 8.40 Technisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=85^\circ$ – P50.

8.4.3 Thermisch vermogen

8.4.3.1 Technisch haalbaar

Het technisch haalbare vermogen is een combinatie van de debietkaarten en de productietemperatuur welke is uitgewerkt in sectie 8.4.2. Omdat de productietemperaturen aan de zuidkant van het onderzoeksgebied laag zijn, is de geothermische potentie op basis van de technisch haalbare vermogenskaarten in Figuur 8.38-Figuur 8.40 daar relatief lager dan uit de debietkaarten in sectie 8.4.1 kan worden opgemaakt.

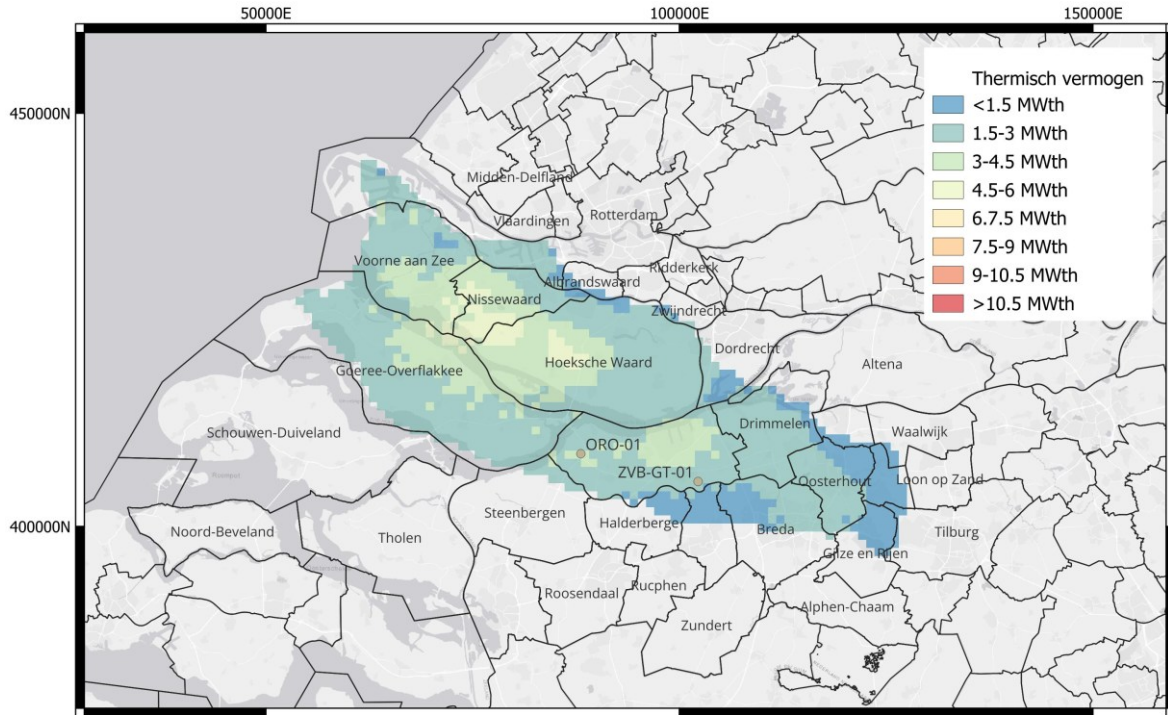
Voor putinclinaties van 45° zijn deze ongeveer 6-10 MW_{th} in de as van de Voorne Trog. Voor putinclinaties van 70° zijn de vermogens op sommige locaties hoger (zoals in nabij Zevenbergen en Goeree-Overflakkee) en op sommige locaties lager dan de 45° . Over het algemeen zijn de kaarten vergelijkbaar, waarbij putinclinaties van 70° in een groter deel van het onderzoeksgebied geometrisch haalbaar zijn. Voor sub-horizontale putten gelden de zelfde overwegingen als besproken in sectie 8.4.1.

We benadrukken dat deze vermogens op basis van een injectietemperatuur van 8°C zijn bepaald. Om een dergelijke uitkoeling te bereiken is bij de meeste warmtevragers een warmtepomp noodzakelijk, en dus zullen de COP's in sectie 8.4.4 lager uitvallen. Voor projecten zonder warmtepomp moet worden uitgegaan van een hogere injectietemperatuur. In deze gevallen zullen de vermogenskaarten in Figuur 8.38-Figuur 8.40 juist lager uitvallen. De impact op systeemniveau van de inzet van warmtepompen wordt verder besproken in het Stap 2 rapport.

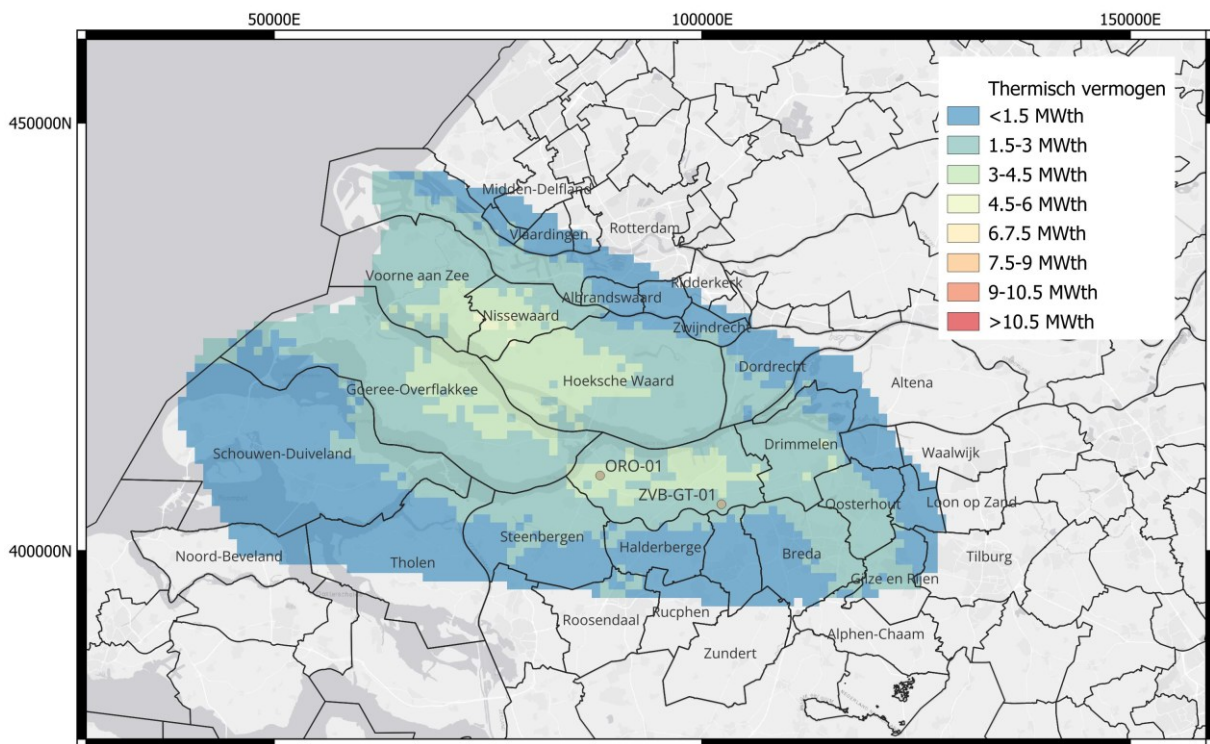
8.4.3.2 Economisch haalbaar

De economisch haalbare vermogens volgen de debietkaarten uit sectie 8.4.1.2 op dezelfde wijze als besproken in de voorgaande sectie zoals is te zien in Figuur 8.41 en Figuur 8.42. De maximale economisch haalbare vermogens voor bevinden zich opnieuw in de driehoek tussen Nissewaard, Hoeksche Waard, en Goeree-Overflakkee. Hier lijken thermische vermogens van 4-7.5 MW_{th} economisch haalbaar. In het resterende deel van de as van het onderzoeksgebied lijken vermogens van >3 MW_{th}. De randen van het onderzoeksgebied waaronder vrijwel de gehele gemeente Schouwen-Duiveland beschikken over een lage economische potentie van <1.5 MW_{th}.

Schuine putten met grote diameters lijken de enige manier te zijn waarmee aan de zuidrand van het projectgebied economische haalbare projecten kunnen worden ontwikkeld. Vooral als hier grote concentraties lage temperatuur warmtevraag aanwezig zijn kan hier aan geothermie worden gedacht. Dit wordt in het Stap 2 rapport verder uitgewerkt.



Figuur 8.41 Economisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=45^\circ$ – P50.



Figuur 8.42 Economisch haalbaar thermisch vermogen– $\theta=70^\circ$ – P50.

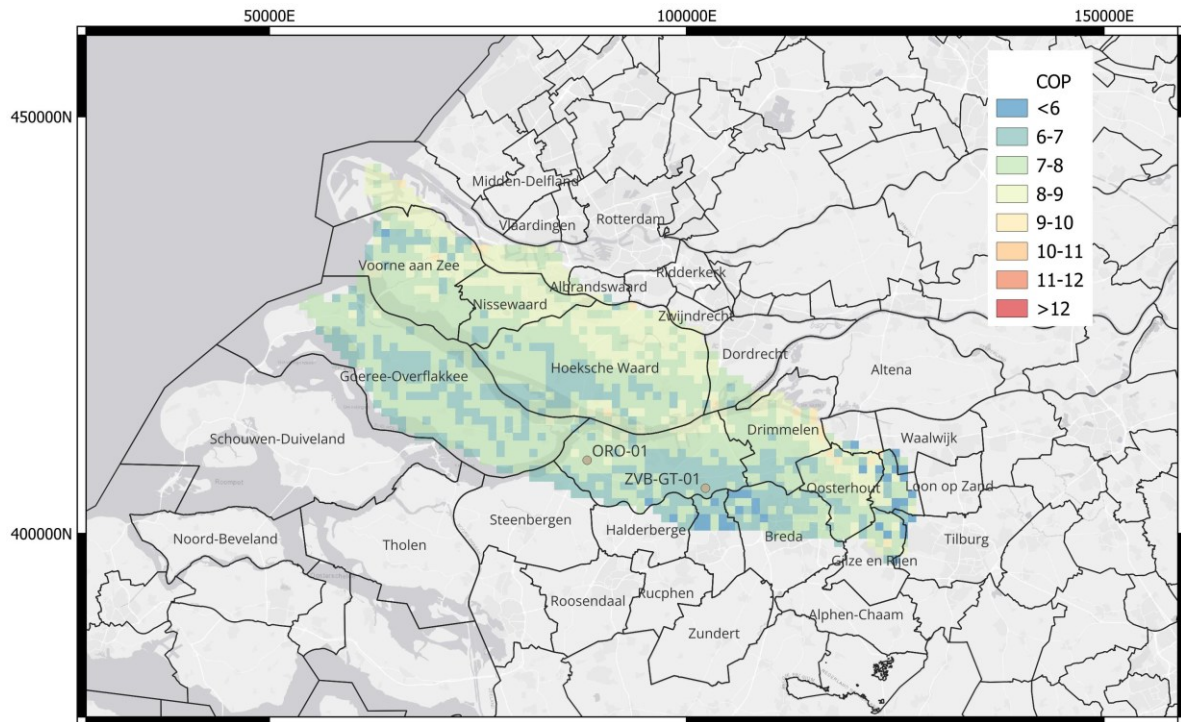
8.4.4 Coëfficiënt of performance

Voor de COP-kaarten voegen we alleen de technisch haalbare scenario's toe. De economisch haalbare scenario's zijn namelijk berekend met een ondergrondse COP van 15 als uitgangspunt. De resultaten van deze exercitie zijn in Figuur 8.43-Figuur 8.45 te zien. Er is te zien dat over het algemeen meer verticale putten resulteren in hogere COP's. De reden hiervoor is dat verticale putten korter zijn waardoor minder drukverliezen in de putten worden gerealiseerd. Deze regel geldt niet voor horizontale putten, waar het grote reservoircontact zorgt voor een relatief lage drukopbouw per meter productie- en injectie-interval.

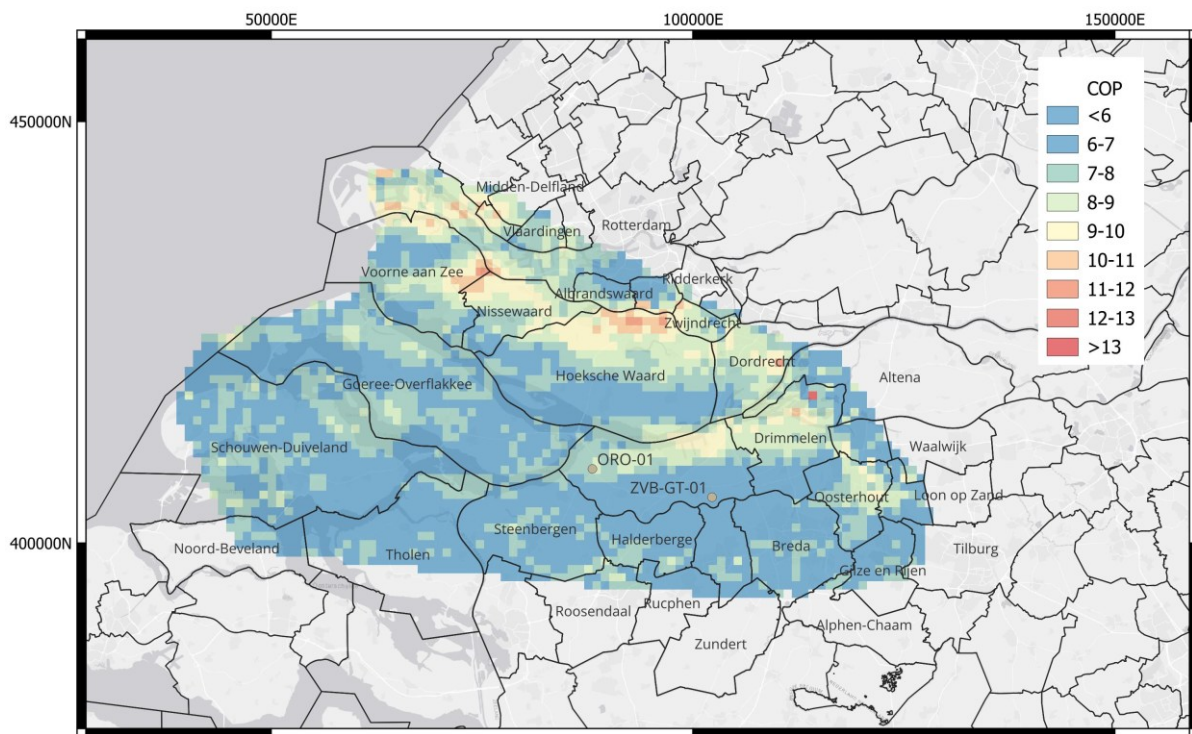
In vrijwel alle scenario's zijn de COP's lager dan de economische drempel van 15. De hoogst haalbare COP's voor het technische maximum zijn >10 in het scenario met een inclinatie van 45°, en in beperkte gebieden, COP's van >12 in het scenario met een inclinatie van 70°. De gebieden waar de hoogste COP's worden gehaald zijn in Nissewaard, de noordkant van Hoeksche Waard, Zevenbergen, Drimmelen, en Oosterhout. Het is een interessante conclusie dat deze gebieden niet volledig samenhangen met de gebieden waar economisch de hoogste vermogens te realiseren zijn 8.4.3.2, door een ander optimum op basis van reservoirtemperatuur, *well outstep*, injectiedruk en transmissiviteit voor de COP dan voor het thermische vermogen.

Voor (sub-)horizontale putten zijn de COP's overall minimaal 10. Dit betekent dat het economische scenario voor horizontale putten relatief meer aansluit bij het in dit rapport gepresenteerde technische scenario, dan voor de andere putontwerpen. Het is daarom aannemelijk dat in een groot deel van het onderzoeksgebied, horizontale putten een hoger economisch haalbaar vermogen met zich meebrengen dan (sterk) gedeveerde putten. Maar door de al besproken onzekerheden en risico's welke gepaard gaan met horizontale putten in dit reservoir, wordt deze economische haalbaarheid voor horizontale putten in dit rapport niet verder toegelicht.

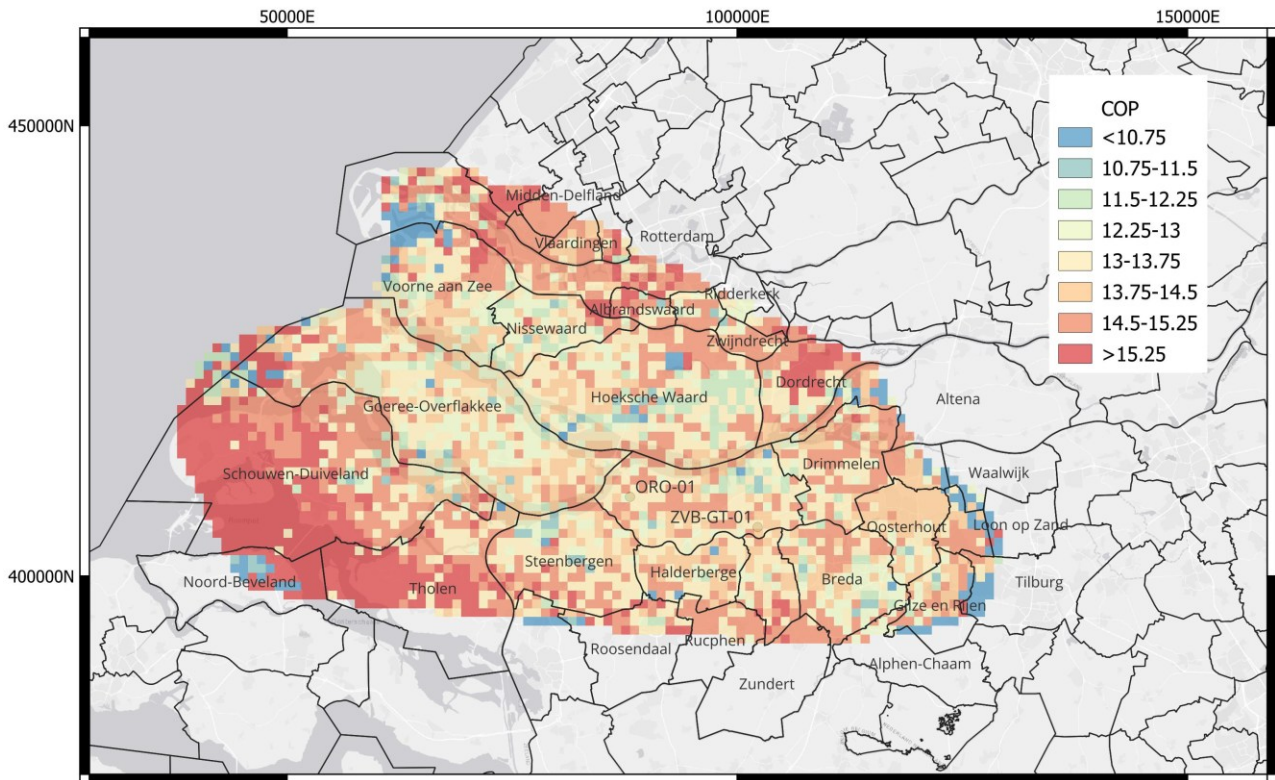
In het Stap 2 rapport wordt verder gewerkt met de economische haalbaarheidskaarten. Hierbij kan dus een ondergrondse COP van 15 worden aangenomen. Als een beleidsmaker of ontwikkelaar van hogere COP's uit wil gaan, dan kunnen de potentiekaarten uit deze studie alsnog kwalitatief worden gebruikt, maar dienen de debieten relatief tot elkaar naar beneden te worden geschaald.



Figuur 8.43 COP- $\theta=45^\circ$ - P50.



Figuur 8.44 COP- $\theta=70^\circ$ - P50.



Figuur 8.45 COP- $\theta=85^\circ$ - P50.

9. Conclusie

Context

Als onderdeel van de SCAN aardwarmtecampagne voert EBN seismisch onderzoek en onderzoeksboringen uit in de Brabantse ondergrond. Het doel is om inzicht te krijgen in de potentie voor aardwarmte als energiebron voor het verwarmen van woningen en utiliteiten, waaronder glastuinbouw. Het Zand van Brussel Laagpakket is een zandsteenlaag welke onder andere voorkomt aan de noordkant van Zeeland, de zuidkant van Zuid-Holland, en de westkant van Noord-Brabant; **het onderzoeksgebied**. Deze laag bevindt zich daar doorgaans op 600 tot 800 meter diepte onder het maaiveld, en heeft een temperatuur van tussen de 25 en de 40 °C. Dit maakt de productie van warm water uit deze laag mogelijke aantrekkelijk voor lage- of, wanneer opgewaardeerd met een warmtepomp, hoge-temperatuurtoepassingen.

Deze studie heeft als doel om aan de hand van deze nieuwe data van het Zand van Brussel Laagpakket de potentie van Lage Temperatuur Aardwarmte te bepalen in het onderzoeksgebied en deze te koppelen aan de bovengrondse warmtevraag. Daarnaast tracht deze studie de implicatie van de Oranjeoord-01 boring te kwantificeren: **“In hoeverre is de kennis over de potentie van Lage Temperatuur Aardwarmte verbeterd door de resultaten van de boring van Oranjeoord-01, ten opzichte van wat we daarvoor al wisten?”**

Methode

Het uitgevoerde ondergrond onderzoek bevat ruwweg vier stappen:

1. de loggegevens van de Oranjeoord-01 en elf andere putten in het onderzoeksgebied zijn opnieuw geïnterpreteerd (zie Afbeelding 1 voor de locaties van de putten). Met behulp van speciale software heeft het projectteam de porositeit bepaald langs het gehele reservoir interval. De samenhang tussen porositeit (*i.e.* hoeveel water kan het gesteente bevatten) en doorlaatbaarheid (*i.e.* permeabiliteit: hoe makkelijk stroomt water door het gesteente) is op basis van analyses van gesteentemonsters bepaald. Met behulp van deze samenhang hebben we de porositeitslog vervolgens omgezet naar permeableitslogs;
2. als onderdeel van ons onderzoek zijn bestaande seismische interpretaties aan het Zand van Brussel Laagpakket op kwaliteit gecontroleerd, en is een nieuwe conversie naar diepte uitgevoerd.
3. de gesteente-eigenschappen uit de loginterpretaties, en de diktes en dieptes uit de seismische interpretaties zijn vervolgens met speciale software gecombineerd voor het maken van een 3D-model; en
4. ten slotte zijn met behulp van analytische vergelijkingen voor het stroomgedrag van water door een gesteentelaag, en door een aardwarmteput, kaarten berekend van het economisch haalbare debiet en vermogen van een aardwarmtesysteem op een gegeven locatie. Hierbij zijn verschillende putaannames getest.

Resultaten

De belangrijkste resultaten van het onderzoek zijn als volgt:

- de temperatuur van het geproduceerde water varieert van 35–40 °C door de centrale as van het onderzoeksgebied tot <30 °C aan de noord en zuidranden van het onderzoeksgebied. De hoogste productietemperaturen lijken haalbaar in het grensgebied van de gemeentes Nissewaard, Hoeksche Waard, Goeree-Overflakkee, Moerdijk, en het gebied ten noorden van Breda; en
- het haalbare thermisch vermogen varieert van 3.8–5 MWth in de hierboven genoemde warme zones tot <0.7 MWth aan de randen van het onderzoeksgebied. Opmerkelijk is dat in een strook aan de noordkant van Zeeland, in de gemeente Goeree-Overflakkee, een relatief hoog vermogen is berekend van meer dan 2.6 MWth. Voorheen werden de kansen voor Lage Temperatuur Aardwarmte in Zeeland als zeer laag ingeschat. Wel moet worden genuanceerd dat productietemperaturen in dit gebied laag zijn, en waarschijnlijk dus veel elektriciteit nodig is om dit water tot werkbare temperaturen op te waarderen.

De implicaties van de Oranjeoord-01 put voor de potentie van Lage Temperatuur Aardwarmte in het onderzoeksgebied kunnen aan de hand van vier conclusies worden samengevat.

Conclusie 1: verbeterd begrip van doorlaatbaarheid van het Zand van Brussel Laagpakket

De SCAN-onderzoeks boring in Heijningen heeft een grote hoeveelheid nieuw kernmateriaal opgeleverd. Op basis van het nieuwe kernmateriaal is duidelijk een dubbele trend te herkennen in de samenhang tussen porositeit en permeabiliteit. De hoge trend is geldig voor zandige eenheden, en de lage trend is geldig voor kleiige eenheden in het Zand van Brussel Laagpakket. De nieuwe trend wijkt significant af van de eerder bepaalde trends. De Oranjeoord-01 put levert dus inzichten op die ons beter in staat stellen om de doorlaatbaarheid van het Zand van Brussel Laagpakket op diepte in te schatten.

Conclusie 2: verbeterde geologische aannames in het model

In voorgaand onderzoek is de doorlaatbaarheid van het Zand van Brussel Laagpakket grotendeels op basis van interpolatietechnieken tussen putten bepaald. In dit onderzoek hebben we een model gemaakt van de variaties in doorlaatbaarheid op basis van geologische aannames. Op basis van inzichten over het afzettingmilieu ten tijde van de depositie van het Zand van Brussel Laagpakket konden twee aannames worden gedaan:

- zandige en siltige sedimenten zijn vanaf het binnenland naar de kustlijn vervoerd, en zijn vervolgens parallel aan de kustlijn op het ondiep marien platform afgezet;
- kleiige afzettingen zijn voornamelijk tijdens zeespiegelstijgingen afgezet. Deze afzettingen vinden we dus parallel aan de zeespiegelbeweging terug.

Door deze twee aannames met de ondergrond gegevens te combineren hebben we de verdeling van zandige en kleiige delen van het Zand van Brussel Laagpakket gesimuleerd. Dit levert potentiekaarten

op die niet alleen consistent zijn met de informatie uit de putten, maar ook geologisch goed te onderbouwen zijn.

Conclusie 3: de geologische eigenschappen van het reservoir zijn minder gunstig dan verwacht

De impact van 1) de nieuwe methode om doorlaatbaarheid te relateren aan diepte, en 2) de geologisch onderbouwde methode voor het modelleren van zandige en kleiige eenheden, wordt ingeschat door middel van een vergelijking met ThermoGIS. Als wordt gekeken naar de potentie op basis van de kwaliteit van de geologie, lijkt er in het hele onderzoeksgebied sprake van een verminderde potentie van Lage Temperatuur Aardwarmte vergeleken met wat voorheen werd aangenomen. De grootste verminderingen bevinden zich rondom enkele van de bestaande putten waar de doorlaatbaarheid voorheen met een te optimistische trend is berekend.

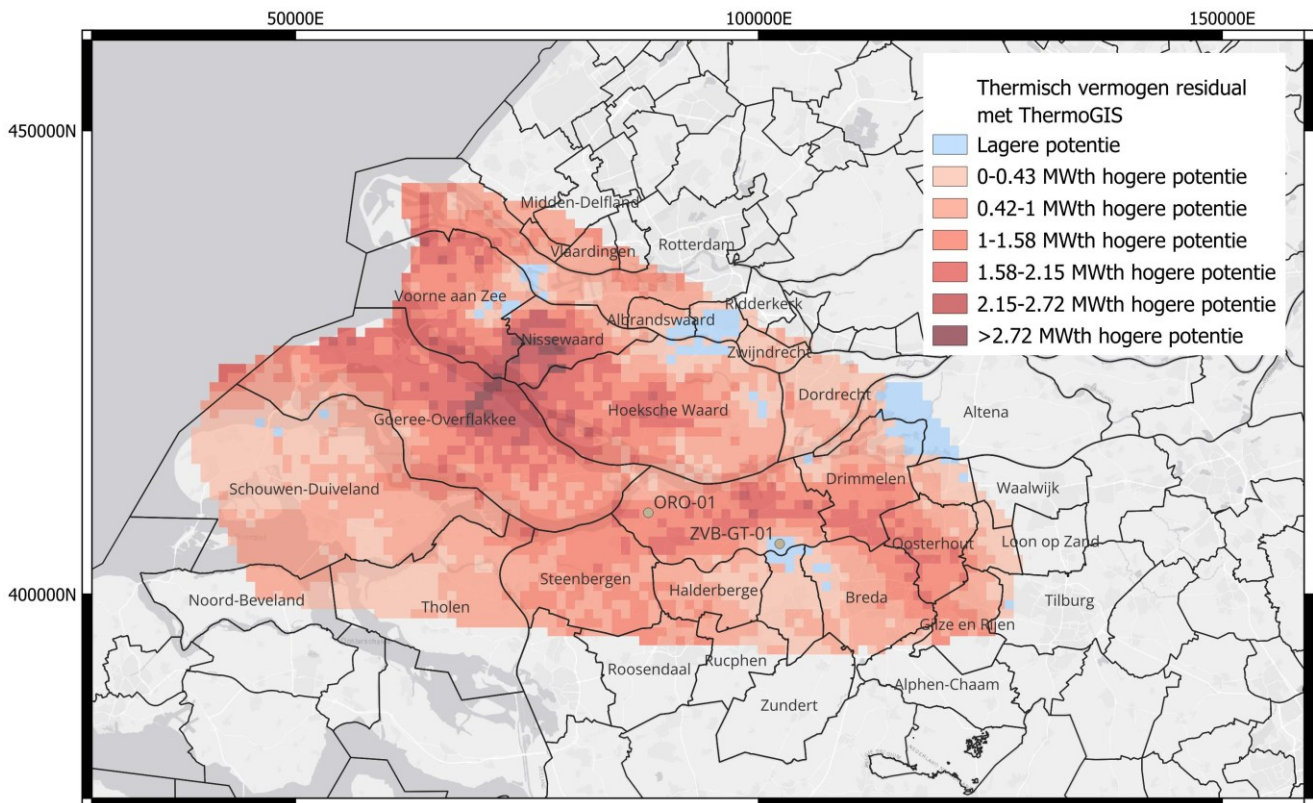
Een belangrijke oorzaak hiervoor is de gekozen methodologie. In bestaande kaarten is de gemiddelde doorlaatbaarheid met een *rekenkundig gemiddelde* berekend. Uit dit onderzoek blijkt dat deze methode niet zorgt voor een goede match met de put test data van ORO-01. Dunne streaks met een hoge doorlaatbaarheid aan de onderkant van het Zand van Brussel Laagpakket zorgen wanneer een *rekenkundig gemiddelde* wordt gebruikt voor een overschatting van de gemiddelde doorlaatbaarheid in dit deel van het reservoir. Een *meetkundig gemiddelde*, zoals gebruikt in deze studie, zorgt voor een goede match met put test van ORO-01, maar resulteert dus ook in kaarten met een soms aanzienlijk lagere geologische potentie.

Conclusie 4: de economisch te behalen vermogens van het reservoir lijken hoger dan verwacht

Dit betekent echter niet dat er geen sprake is van haalbare projecten in het onderzoeksgebied. In dit onderzoek zijn nieuwe inzichten gebruikt om de economische vermogens te berekenen, met als gevolg dat de resultaten overal gunstiger zijn dan in ThermoGIS (Figuur 9.1). Dit om drie redenen:

1. het Zand van Brussel Laagpakket is relatief ondiep. Om die reden zijn schuine boringen noodzakelijk om voldoende afstand te genereren tussen de productie- en injectieput. Schuine boringen zorgen ook voor een groter contactoppervlak met het reservoir, waardoor relatief iets hogere debieten mogelijk zijn;
2. in ThermoGIS worden relatief conservatieve aannames gedaan over de diepte waarop de ESP pomp in de productieput kan worden gehangen. In deze studie zijn meer realistische aannames hiervoor gedaan waardoor relatief grotere pompdrukken haalbaar zijn; en
3. in ThermoGIS worden relatief conservatieve aannames gedaan over de maximale injectiedruk. Geomechanisch onderzoek op basis van gesteentemonsters uit Oranjeoord-01 toon aan dat er veilig hogere injectiedrukken kunnen worden toegepast

Zoals in de potentiekaarten wordt aangetoond zijn er hierdoor nog steeds zones in het projectgebied waarin aantrekkelijke vermogens uit een enkel Lage Temperatuur Aardwarmtesysteem haalbaar zijn.



Figuur 9.1 Implicatie van deze studie voor de geothermische potentie in het Zand van Brussel Laagpakket in de Voorne Trog rond de ORO-01 put ten opzichte van ThermoGIS, welke op de resultaten uit WarmingUp is gebaseerd.

Referenties

- Aben, F., Buijze, L., Fokker, P., Veldkamp, H., & Koning, M. (2024). Seismicity potential for geothermal developments in the Roer Valley Graben (RVG) (Report No. TNO 2024 R12041). Commissioned by EBN.
- Baaren, E.J. van. (1978). Permeabiliteit en korrelgrootedistributie van zandformaties [Permeability and grain size distribution of sand formations]. *Geologie en Mijnbouw*, 57(3), 217–228.
- Babu, D. K., & Odeh, A. S. (1989). Productivity of a horizontal well. *SPE Reservoir Engineering*, 4(4), 417–421.
- Batzle, M., & Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57(11), 1396–1408.
- Bear, J., & Bachmat, y. (1984). *Introduction to modeling of transport phenomena in porous media* (Vol. 1). Springer.
- Békési, E., Struijk, M., Bonté, D., Veldkamp, H., Limberger, J., Fokker, P. A., Vrijlandt, M., & van Wees, J.-D. (2020). An updated geothermal model of the Dutch subsurface based on inversion of temperature data. *Geothermics*, 88, 101880.
- Białas, W. (1966). Some aspects of porosity and permeability of unconsolidated sediments. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences*, 14(2), 45–56.
- Brussée (2025). Data overview Oranjeoord. Internal slide-deck.
- Cinco-Ley, H., & Miller, F. G. Jr. (1975). Unsteady-state pressure distribution created by a directionally drilled well. *Journal of Petroleum Technology*, 27(11), 1392–1400.
- Dake, L. P. (1978). *Fundamentals of reservoir engineering* (Developments in Petroleum Science, Vol. 8). Elsevier.
- Dalfsen, W. van, Doornenbal, J. C., Gunnink, J. L., Stafleu, J., & Schokker, J. (2006). VELMOD-4: Velocity model of the Netherlands (TNO report). TNO.
- EBN (2025). Welltesting Data Acquisition Report ORO-01_Draft. Internal document.
- Economides, M. J., Delmbacher, F. X., Brand, C. W., & Heinemann, Z. E. (1994). Optimization of horizontal-well matrix treatments (SPE Paper SPE 22334). Society of Petroleum Engineers.
- Garcia-Gutierrez, A., Espinosa-Paredes, G., & Hernández-Ramírez, I. (2001). Study on the flow production characteristics of deep geothermal wells (Netherlands Journal of Geosciences – *Geologie en Mijnbouw*, 91(4), 651–665). Cambridge University Press.
- Geel, C. R., de Haan, H. B., & Peters, E. (2022). Characterisation of the Zwijndrecht-Zuid geothermal site (Final report, 25 May 2022). TNO / WarmingUp.

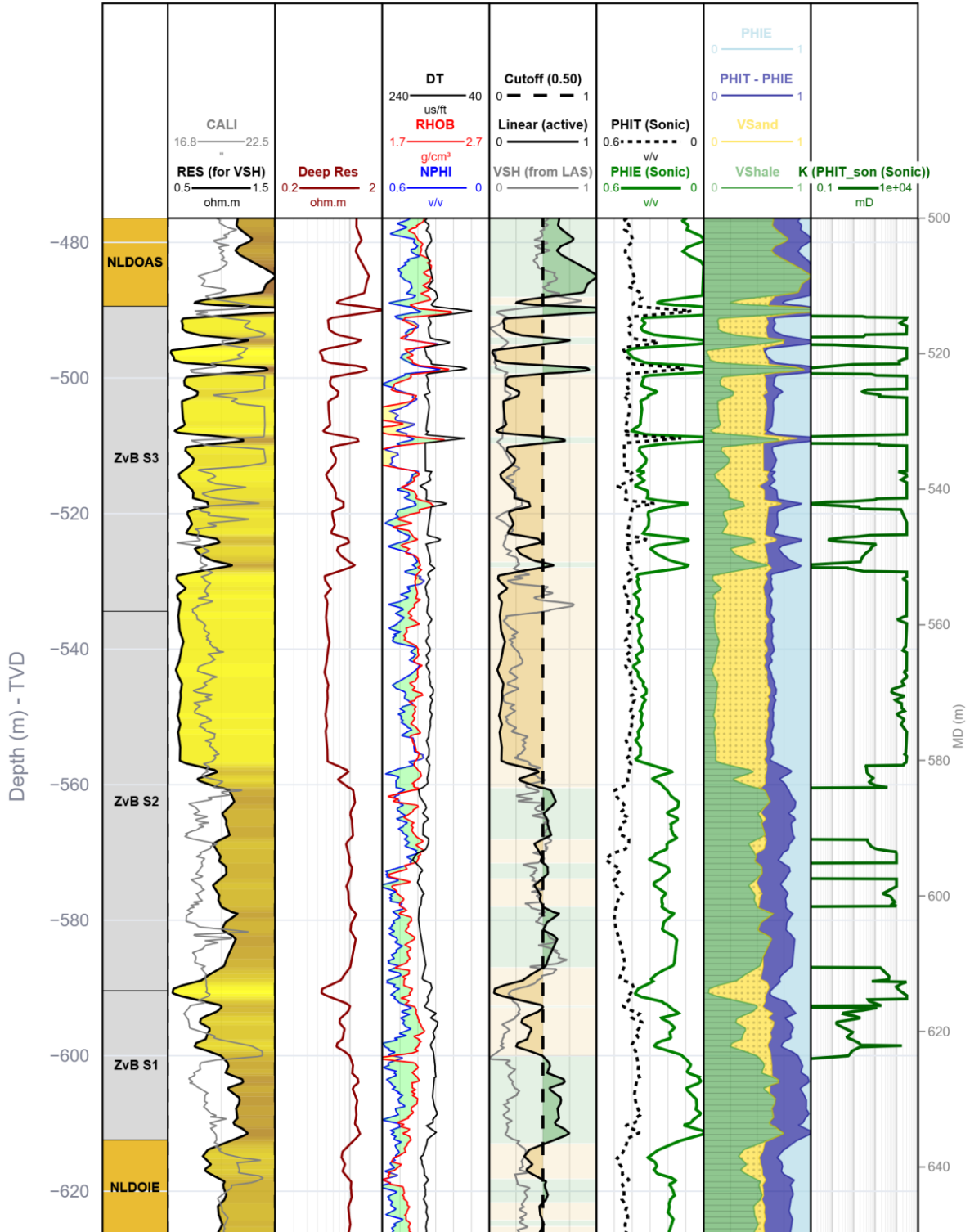
- Geel, K. & Foeken, J. (2021): Formation Evaluation of the Brussels Sand Member in the Netherlands. WarmingUp Report, Project number 060.43190/01.01.01, <https://www.WarmingUp.info/documenten/final-report-formation-evaluation-brussels-sand-2021-12-01.pdf>.
- Grunberg, L. (1970). Thermodynamic and transport properties of liquids. In H. E. Stanley (Ed.), *Advances in chemical physics* (Vol. 18, pp. 53–87). Wiley.
- Haan, H. de, ten Veen, J., Houben, S., & Kruisselbrink, A. (2020). Mapping of the Brussels Sand Member in the Netherlands (Final report, 21 December 2020). TNO / WarmingUp.
- Hettema, M., Janszen, A., & Brussee, M. (2025, November 18–20). Determination of seal stresses for geothermal applications in the Netherlands: Methodology and model. Paper presented at the International Geomechanics Conference, Al Khobar, Saudi Arabia.
- Jahns, E. ORO-01 EBN 2200158-04: Final report (Project No. 2430). Germany.
- Joshi, S. D. (1991). *Horizontal well technology*. PennWell.
- Manning, F. S., & Thompson, R. E. (2006). *Oilfield processing of petroleum* (Vol. 1). PennWell Books.
- McCarthy, S., & Funk, E. (2025). Sedimentology and petrography of Middle and Lower North Sea Group (Palaeogene) deposits from Well ORO-01. PanTerra Geoconsultants B.V., The Netherlands.
- Mijnlieff, H. F., Obdam, A. N. M., van Wees, J. D. A. M., Pluymaekers, M. P. D., & Veldkamp, J. G. (2014). *DoubletCalc 1.4 manual: English version for DoubletCalc 1.4.3* (TNO Report R11396). TNO.
- Mijnlieff, H., de Vries, S., Jaarsma, B., & Vogelaar, B. (2023). *Seismische Dreigings- en Risicoanalyse voor aardwarmteprojecten in Nederland – Seismic Hazard and Risk Assessment for Geothermal Projects in the Netherlands* (Report version 16 November 2023).
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2021). *Ontwerp-instemmingsbesluit aardwarmte winningsplan Zevenbergen*. Visser en Smit Hanab B.V.
- Panterra, 2014. *Formation water oil-and gas in the Brussels Sand Formation in West-Brabant (Zevenbergen)*.
- Pirlea, L., & P. Thien van (2024). *Geothermal Water Analysis Final Report Well ORO-01*. PanTerra. Commissioned by EBN.
- Pluymaekers, M. P. D., Kramers, L., van Wees, J.-D., Kronimus, A., Nelskamp, S., Boxem, T., & Bonté, D. (2012). Reservoir characterisation of aquifers for direct heat production: Methodology and screening of the potential reservoirs for the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw*, 91(4), 621–636.

- Staatstoezicht op de Mijnen. (2019, April). Bijlage 1 – Protocol injectiedrukken: Protocol ter bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning (versie 3). SodM.
- Talebian, M., & Harst, C. van der (2019). Analysis of Welltest ZVB-GT-01. PanTerra Geoconsultants B.V., The Netherlands.
- Talebian, M., & Harst, C. van der (2019). Analysis of Welltest ZVB-GT-02. PanTerra Geoconsultants B.V., The Netherlands.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.. (2025). Beleidskader geothermie (v1.306_0) [PDF]. Nederlands Ondergrondse Dataportaal (NLOG).
- TNO-AGE & EBN. (2023). Appendix A1 – Handleiding Seismische Dreigings- en Risicoanalyse (SDRA). NLOG – Nederlands Ondergrondportaal.
- TNO-AGE. (2023). Bepaling integriteit afdichtende gesteentepakketten voor geothermieprojecten in Nederland (Report TNO-2023-R11773). NLOG – Nederlands Ondergrondportaal.
- Veldkamp, J. G., Geel, C. R., & Peters, E. (2022). Characterization of aquifer properties of the Brussels Sand Member from cuttings (Final report, 7 September 2022). TNO / WarmingUp.
- Veldkamp, J. G., Geel, C. R., & Peters, E. (2022). Sand production in shallow geothermal applications (WarmingUp Theme 4A report). TNO / WarmingUp.
- Vrijlandt, M. A. W., Struijk, E. L. M., Brunner, L. G., Veldkamp, J. G., Witmans, N., Maljers, D., & van Wees, J. D. (2019). ThermoGIS update: A renewed view on geothermal potential in the Netherlands. Paper presented at the European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands. (ThermoGIS porosity and reservoir property mapping methodology using kriging with depth as a covariate).
- Vrijlandt, M. A. W., Struijk, E. L. M., Brunner, L. G., Veldkamp, J. G., Witmans, N., Maljers, D., & van Wees, J. D. (2020). ThermoGIS: From a static to a dynamic approach for national geothermal resource information and development. World Geothermal Congress 2020.
- Worum, G., & Michon, L. (2005). Implications of continuous structural inversion in the West Netherlands Basin for understanding controls on Palaeogene deformation in NW Europe. *Journal of the Geological Society (London)*, 162(1), 73–85.

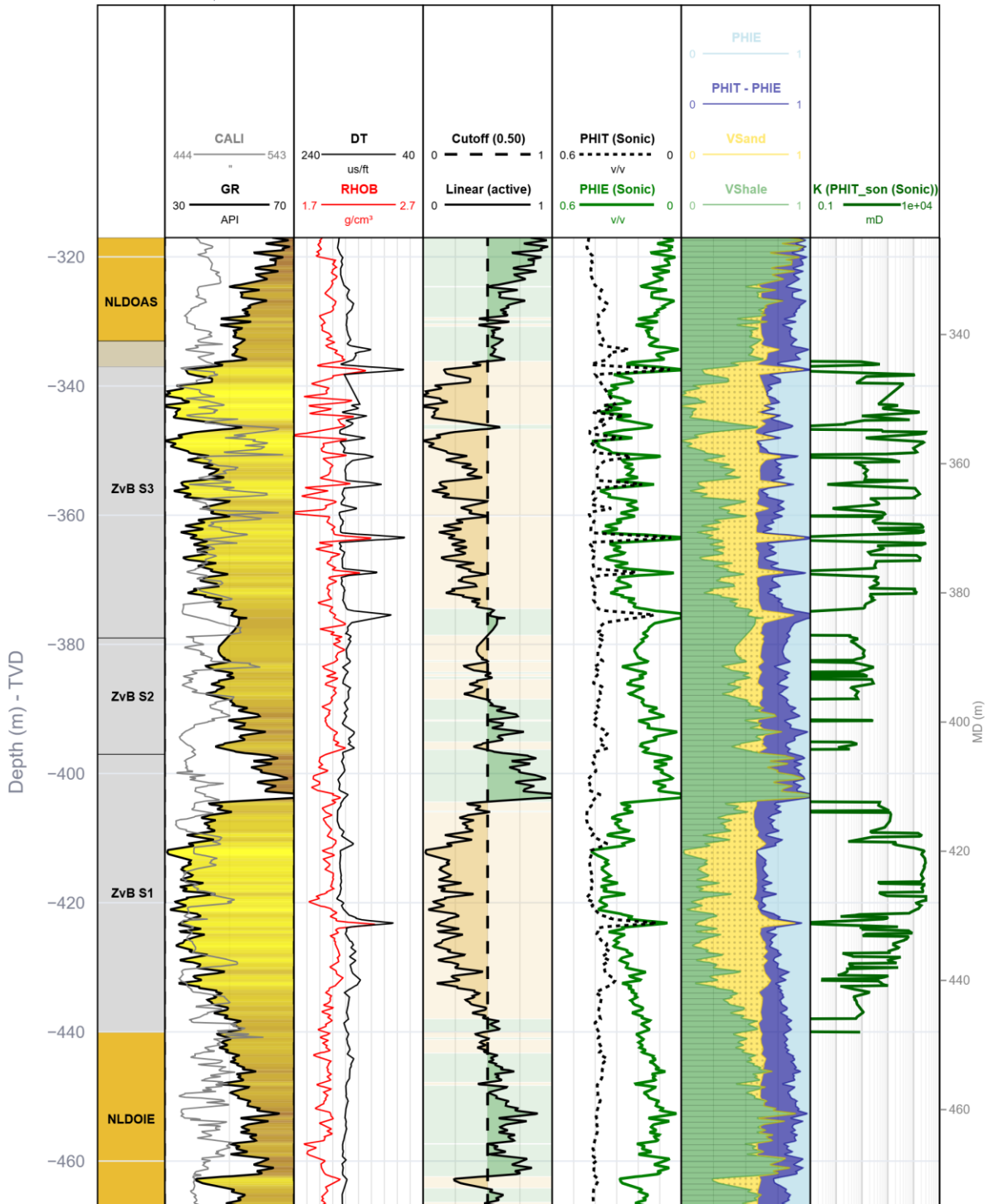
Appendices

Appendix A: Gesimplificeerde CPI's offset putten

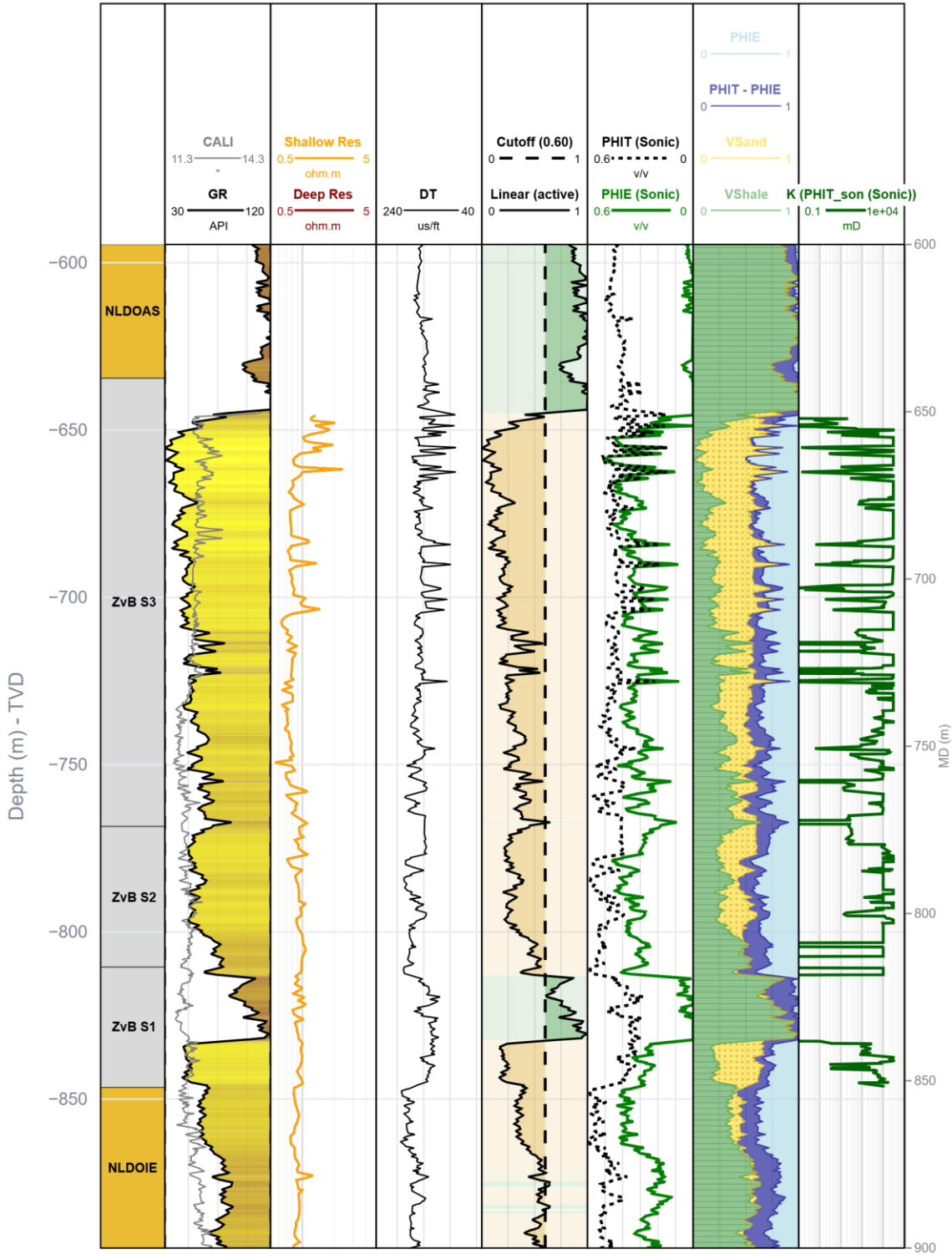
BHG-01 - CPI Sproule 2026
-626.41 to -476.42 m | VSH method: linear



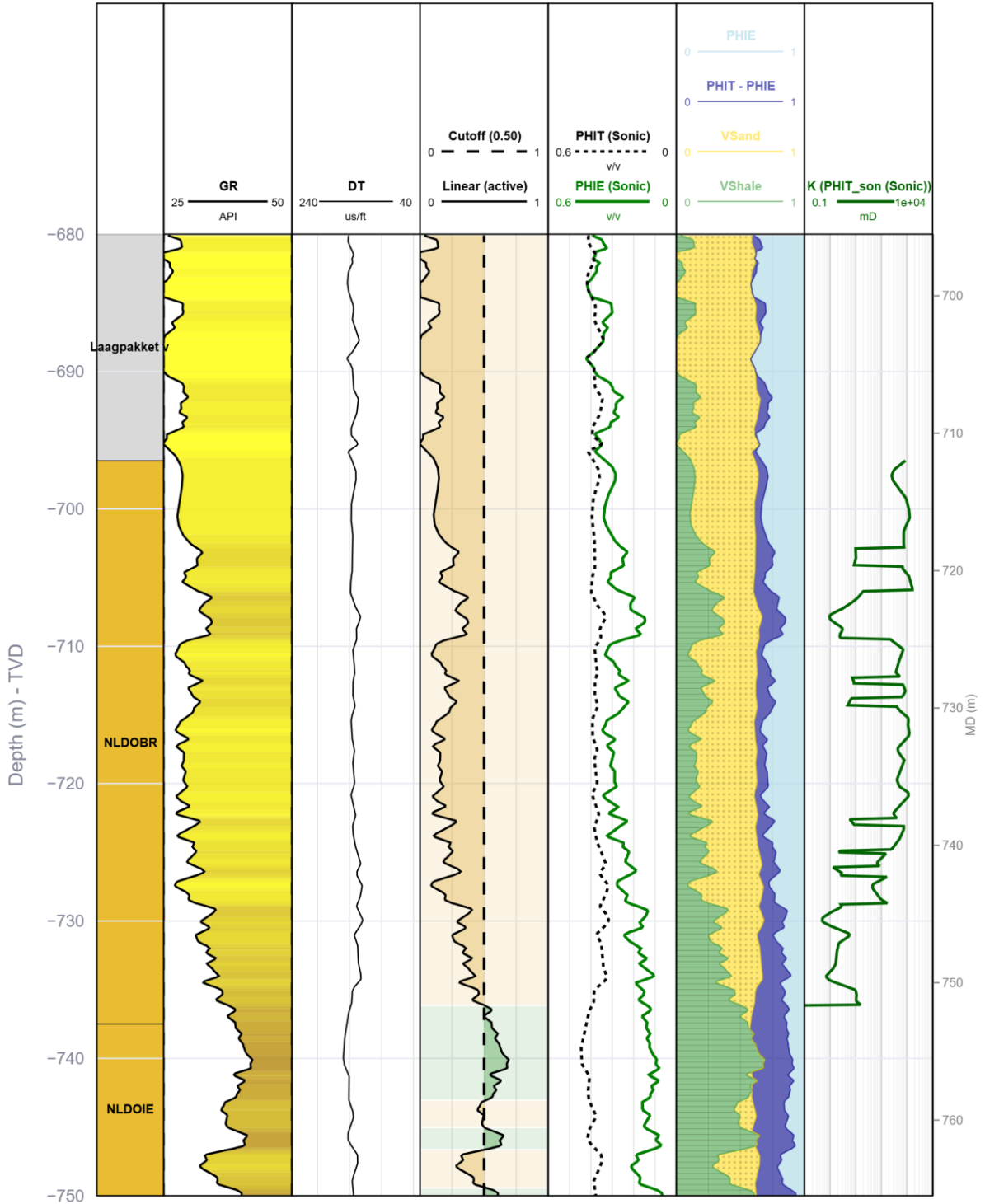
KTG-01 - CPI Sproule 2026
-467.03 to -317.03 m | VSH method: linear



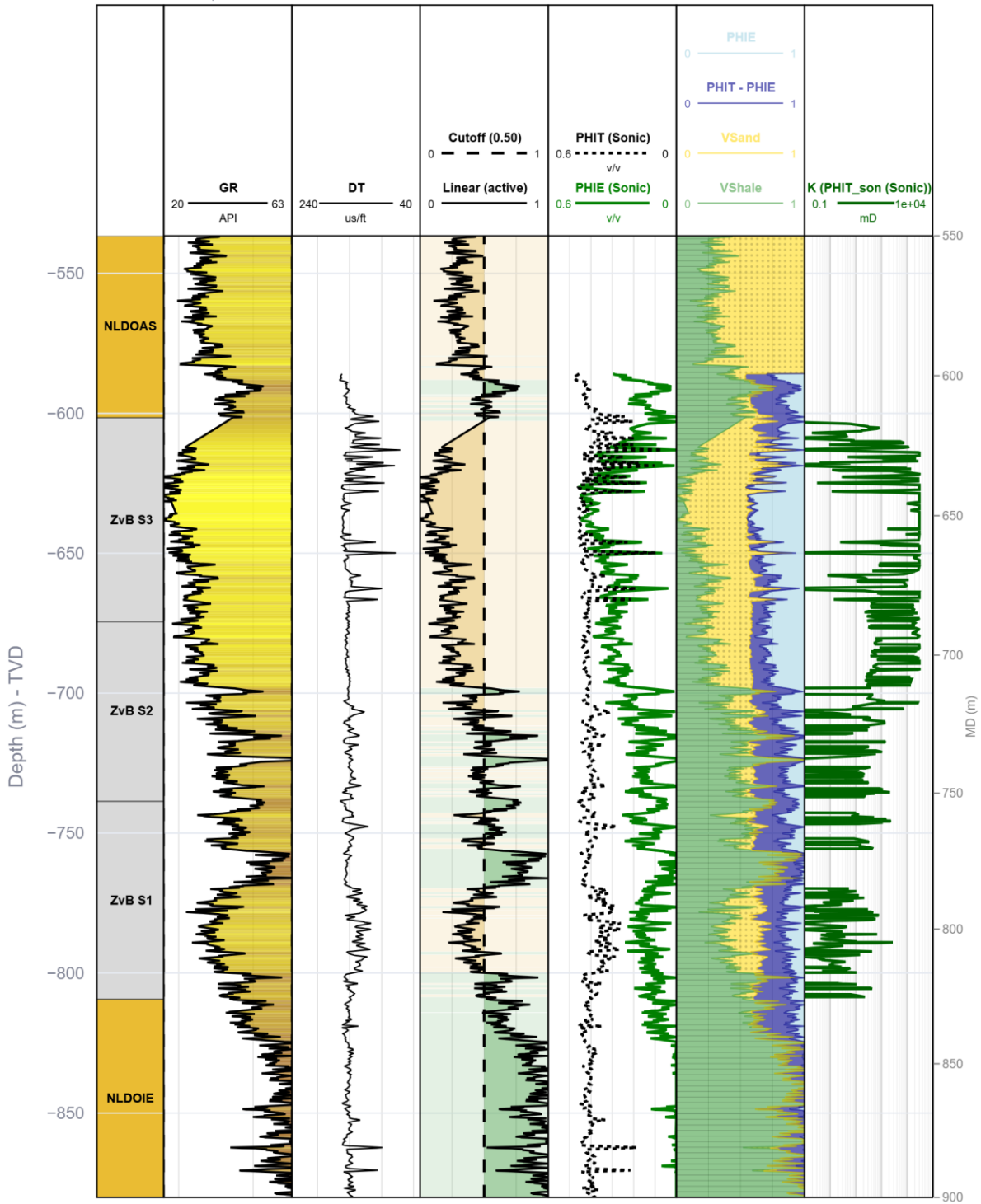
HVS-01 - CPI Sproule 2026
-894.52 to -594.52 m | VSH method: linear



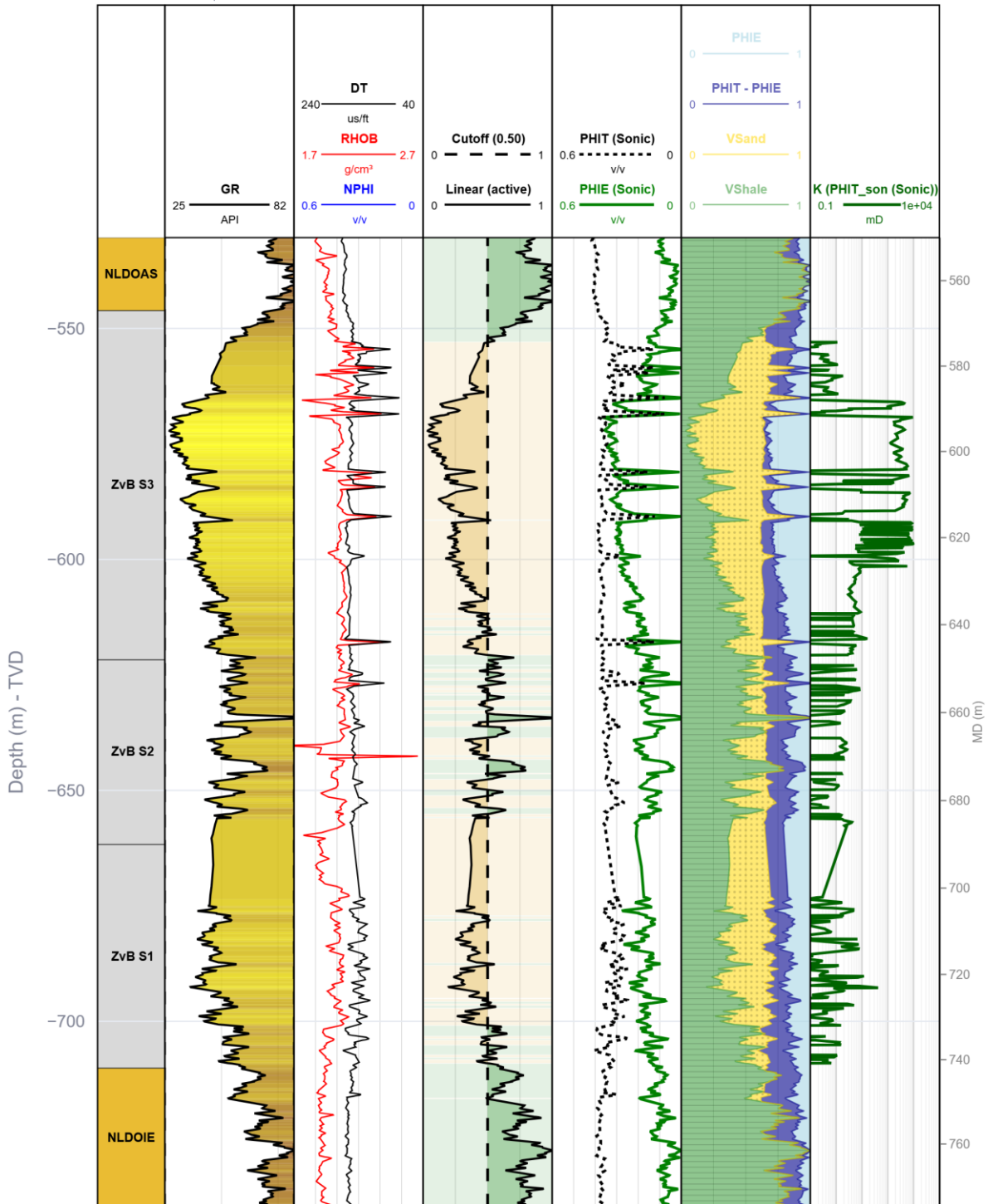
HBV-01 - CPI Sproule 2026
-750.00 to -680.00 m | VSH method: linear



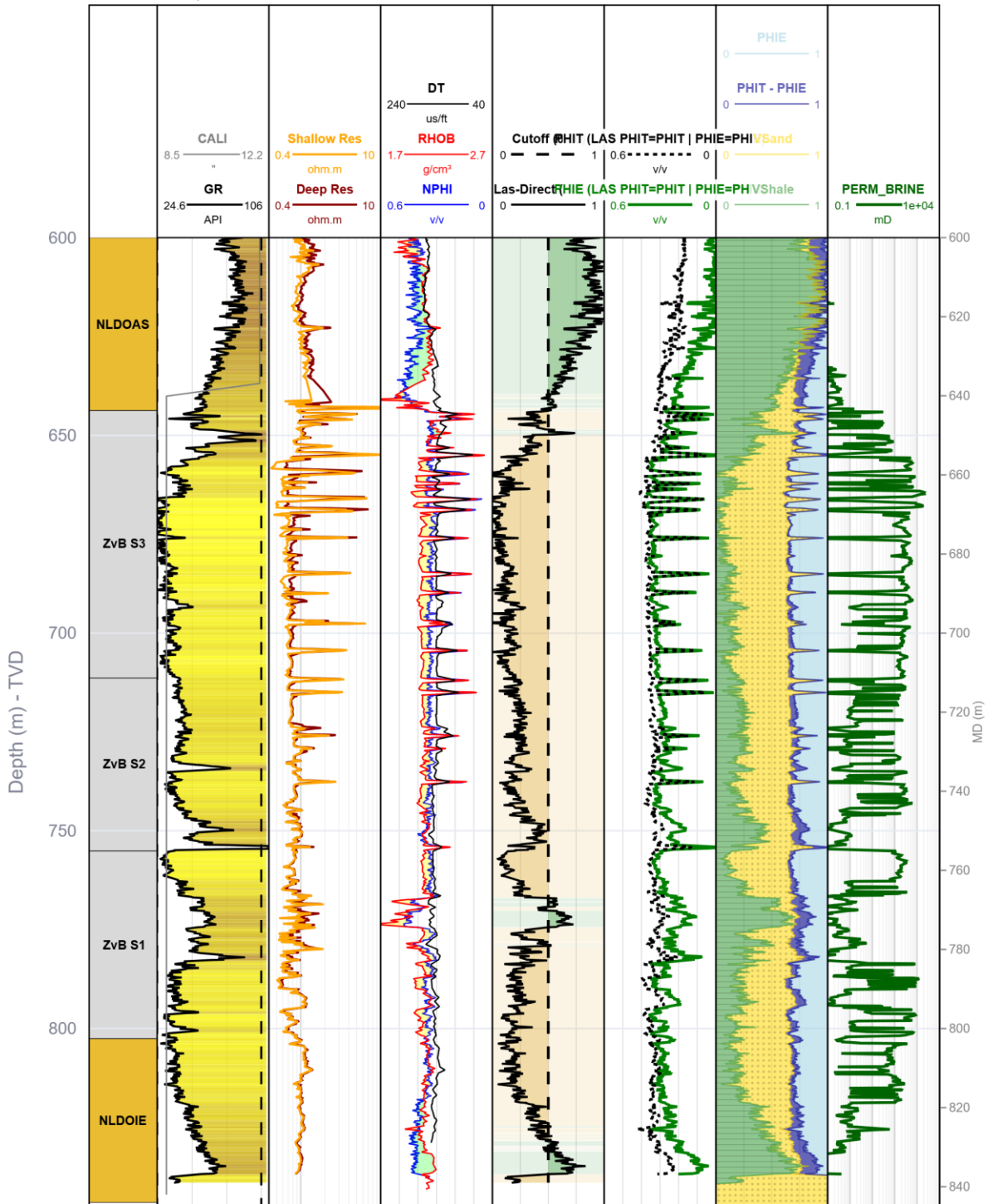
BTL-01 - CPI Sproule 2026
-880.14 to -536.59 m | VSH method: linear



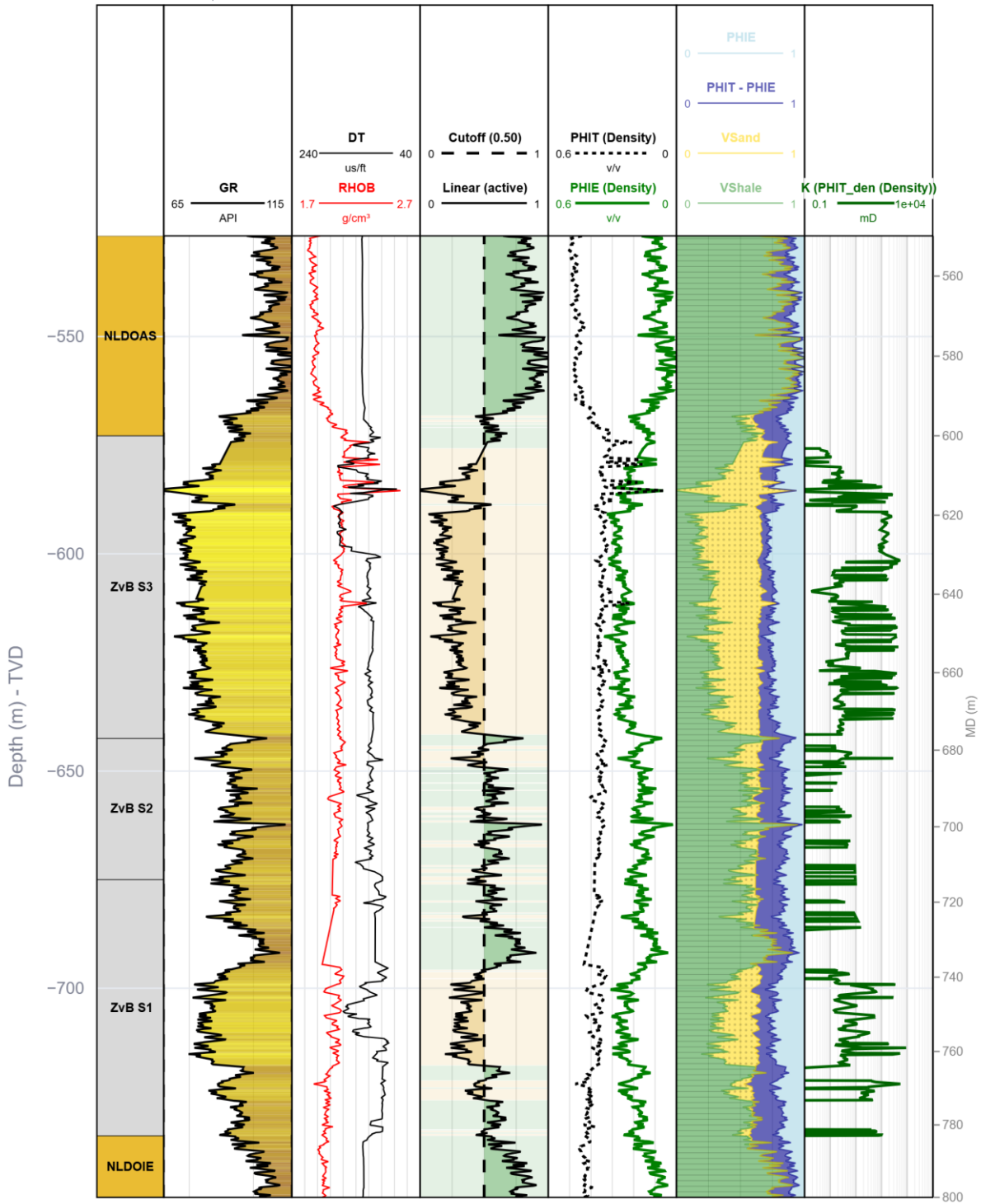
BRT-01 - CPI Sproule 2026
-740.08 to -530.35 m | VSH method: linear



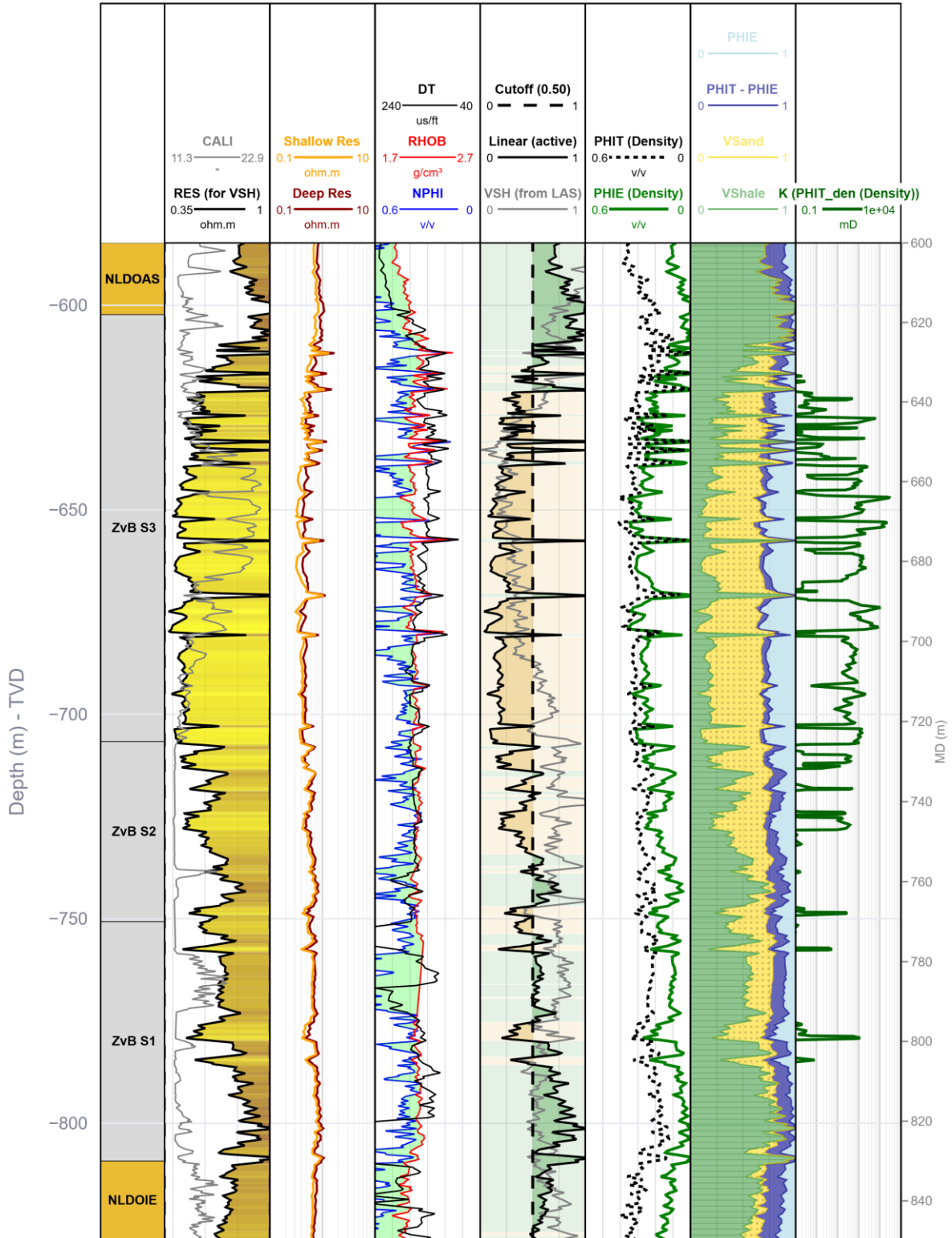
ORO-01 - CPI Sproule 2026
600.00 to 845.00 m | VSH method: las-direct



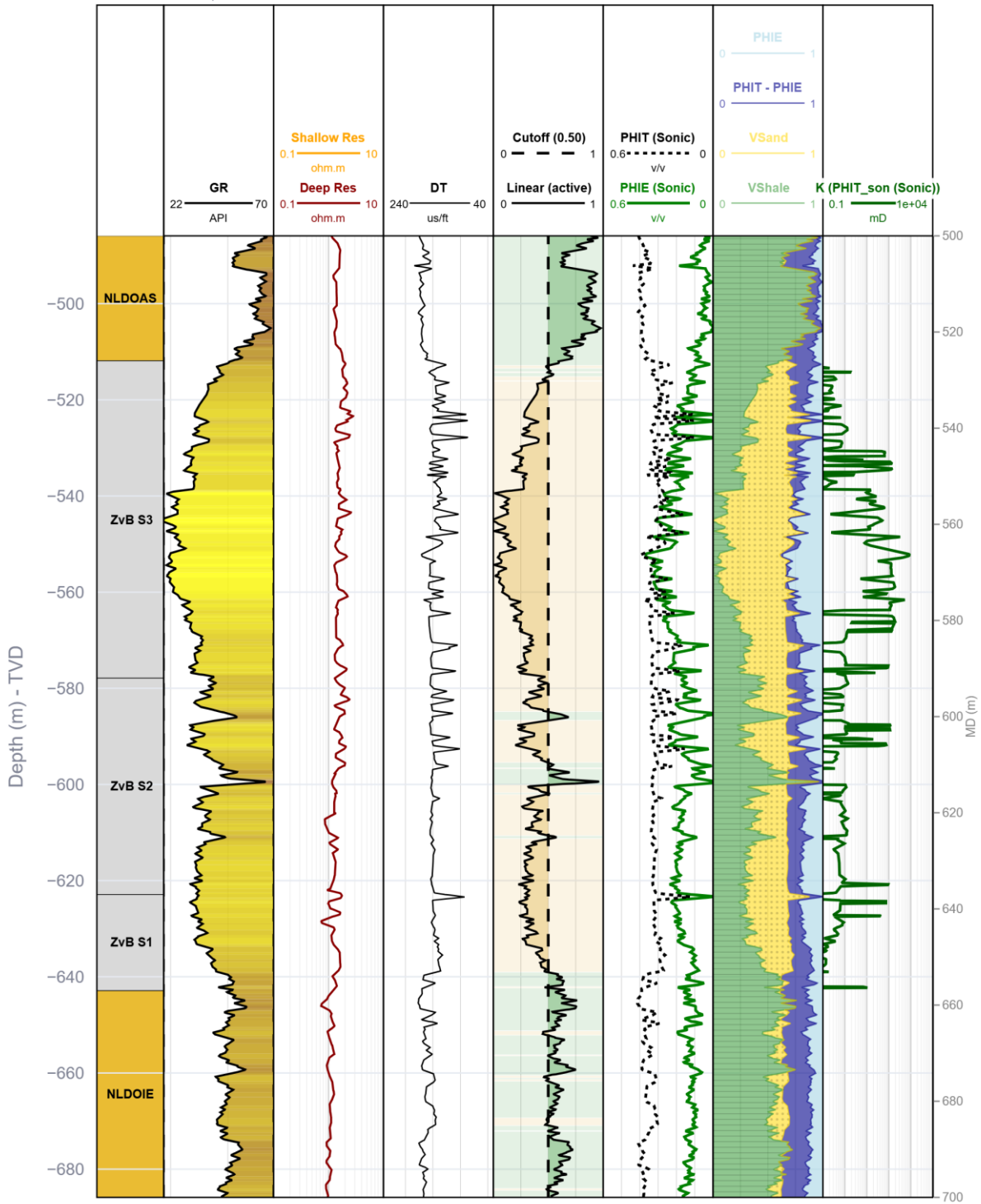
PRW-01 - CPI Sproule 2026
-748.12 to -526.83 m | VSH method: linear



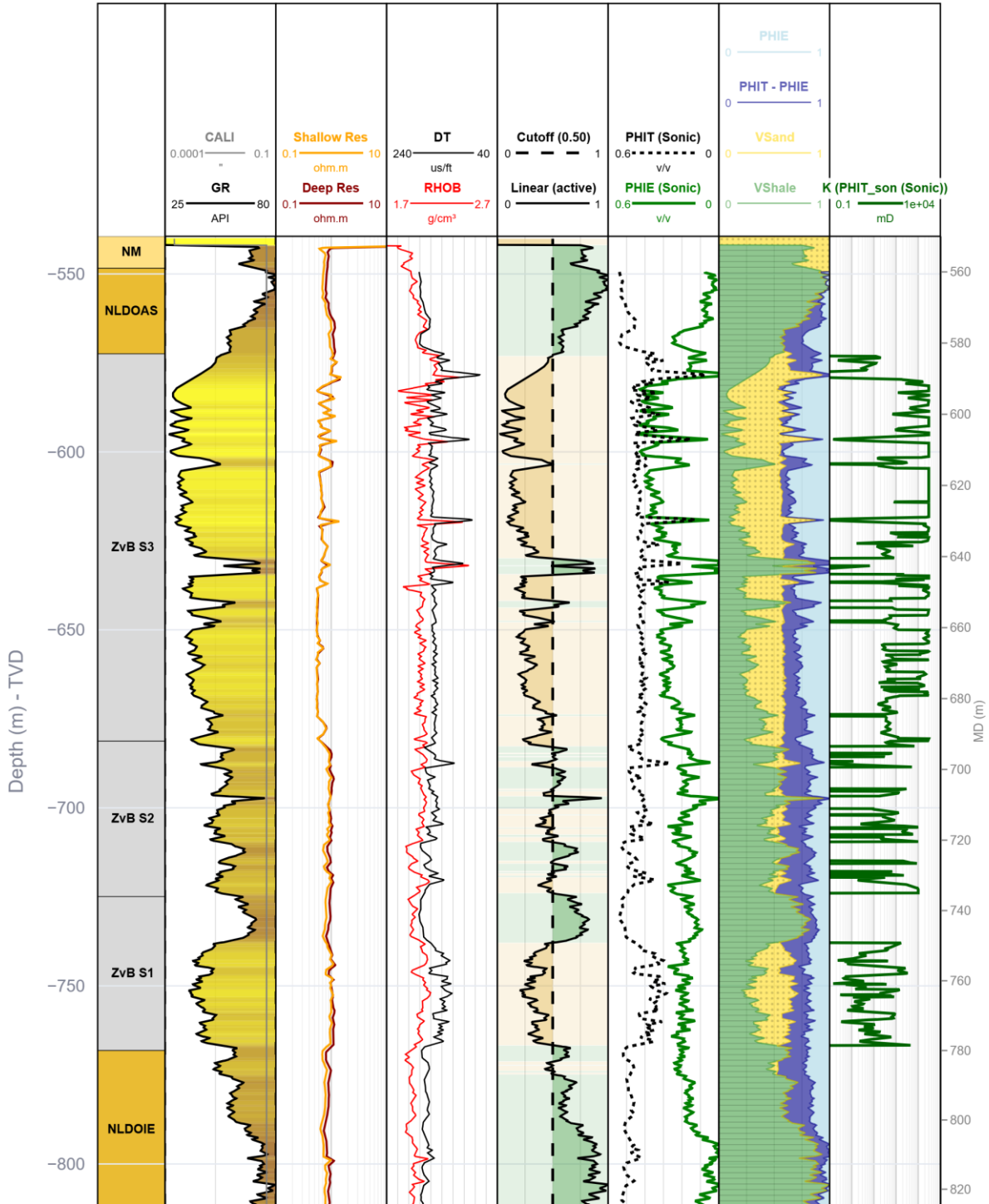
RDK-01 - CPI Sproule 2026
-828.71 to -584.77 m | VSH method: linear



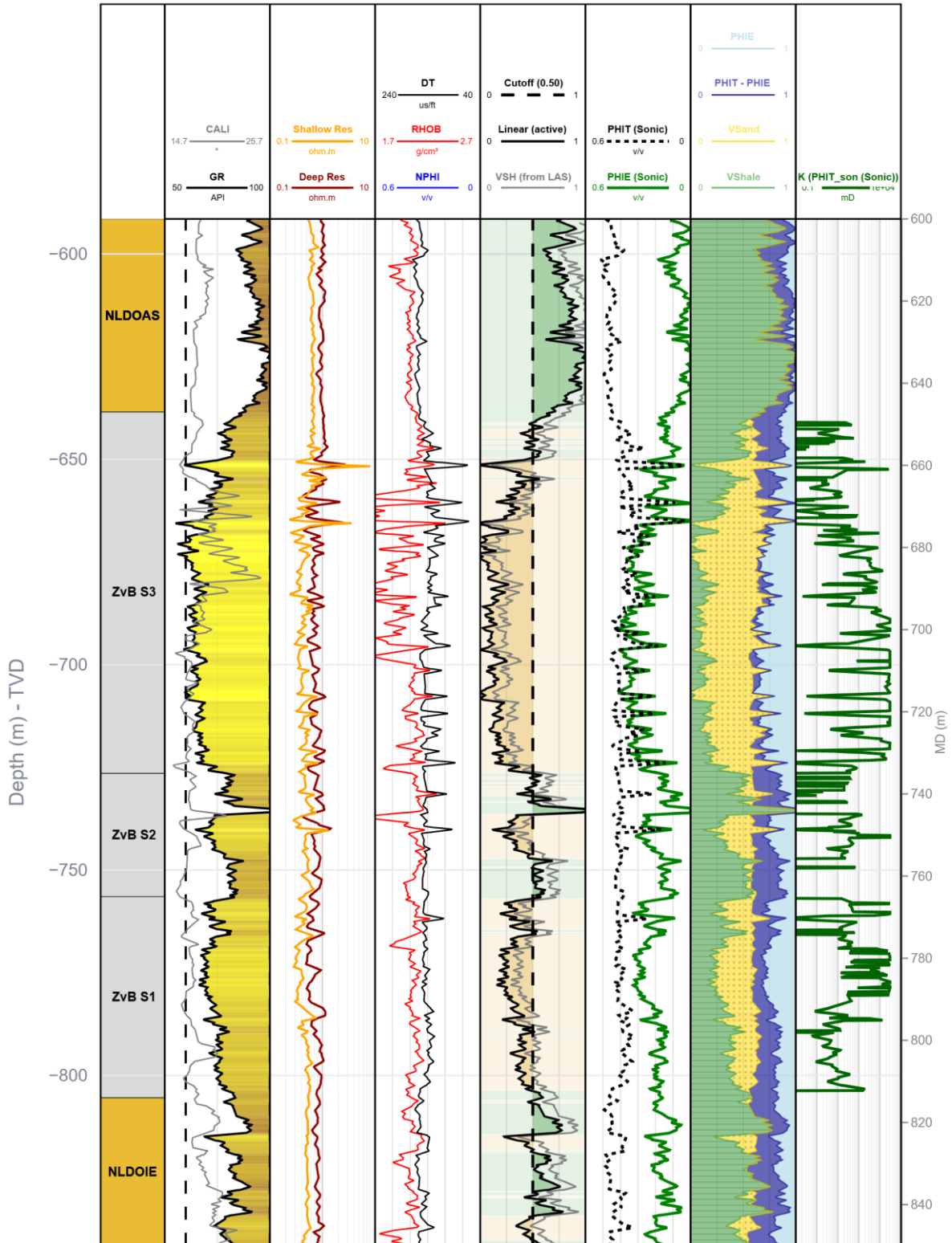
RSB-01 - CPI Sproule 2026
-685.88 to -485.90 m | VSH method: linear



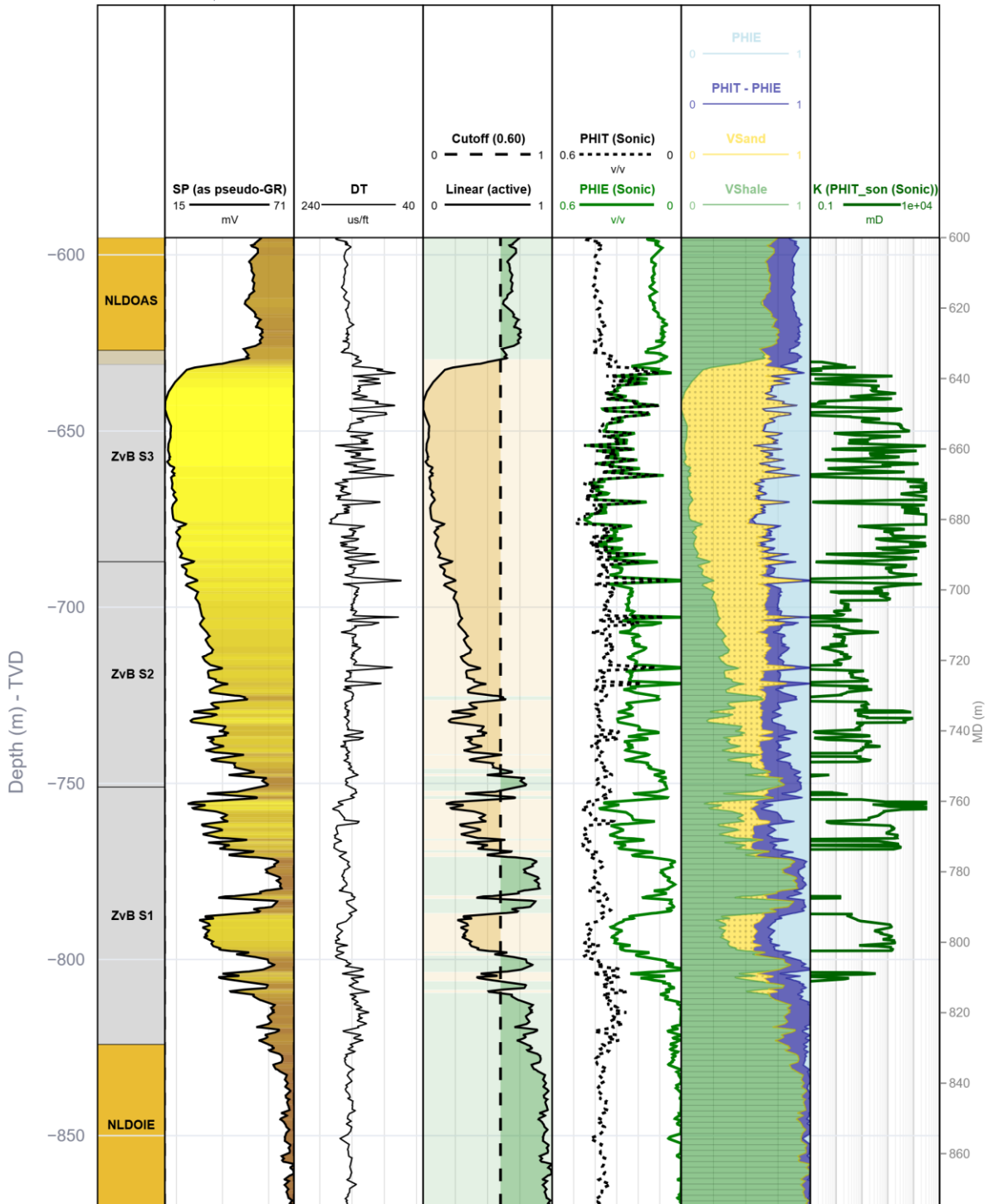
RZB-01 - CPI Sproule 2026
-811.96 to -539.45 m | VSH method: linear



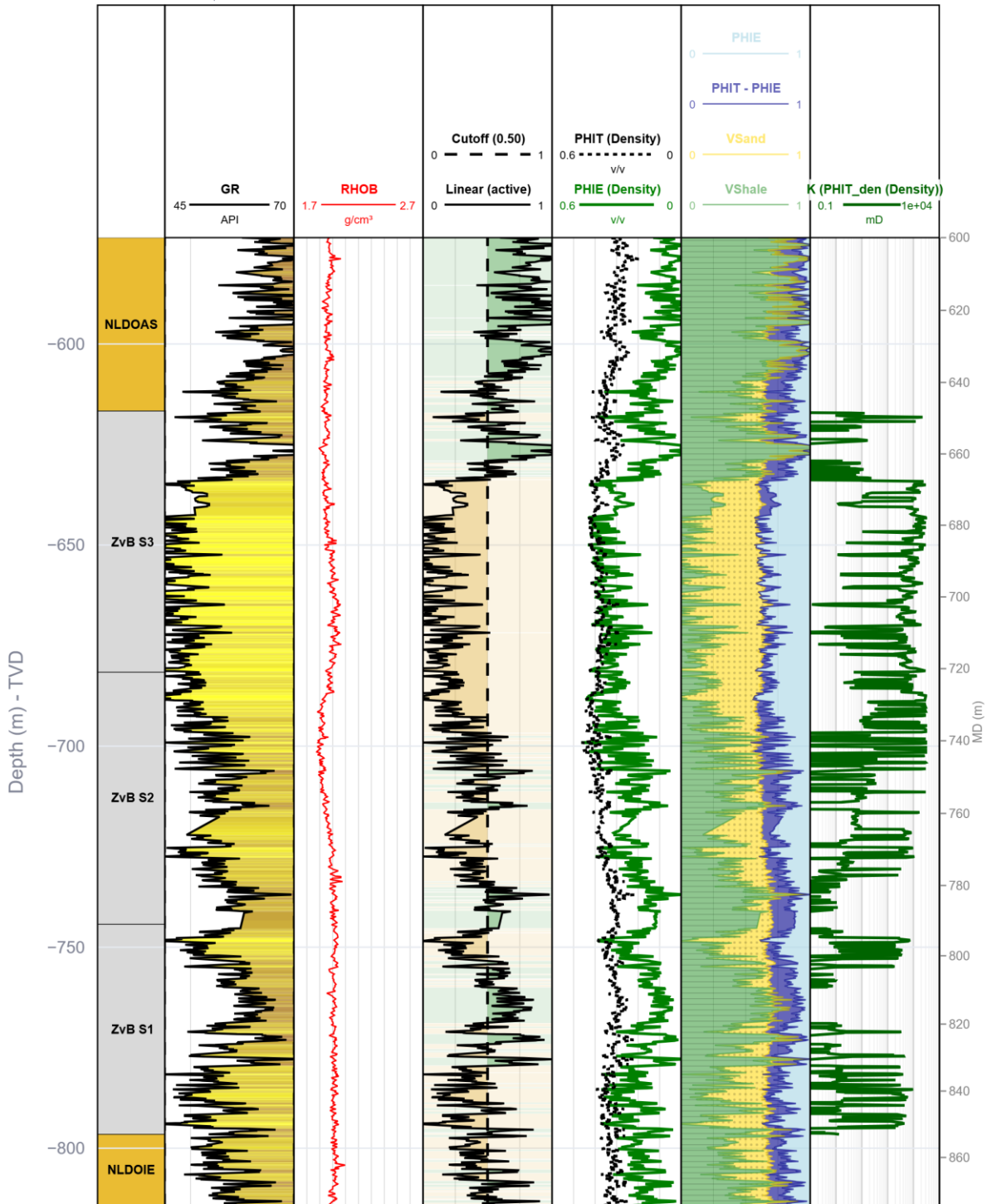
STH-01 - CPI Sproule 2026
-841.45 to -591.45 m | VSH method: linear



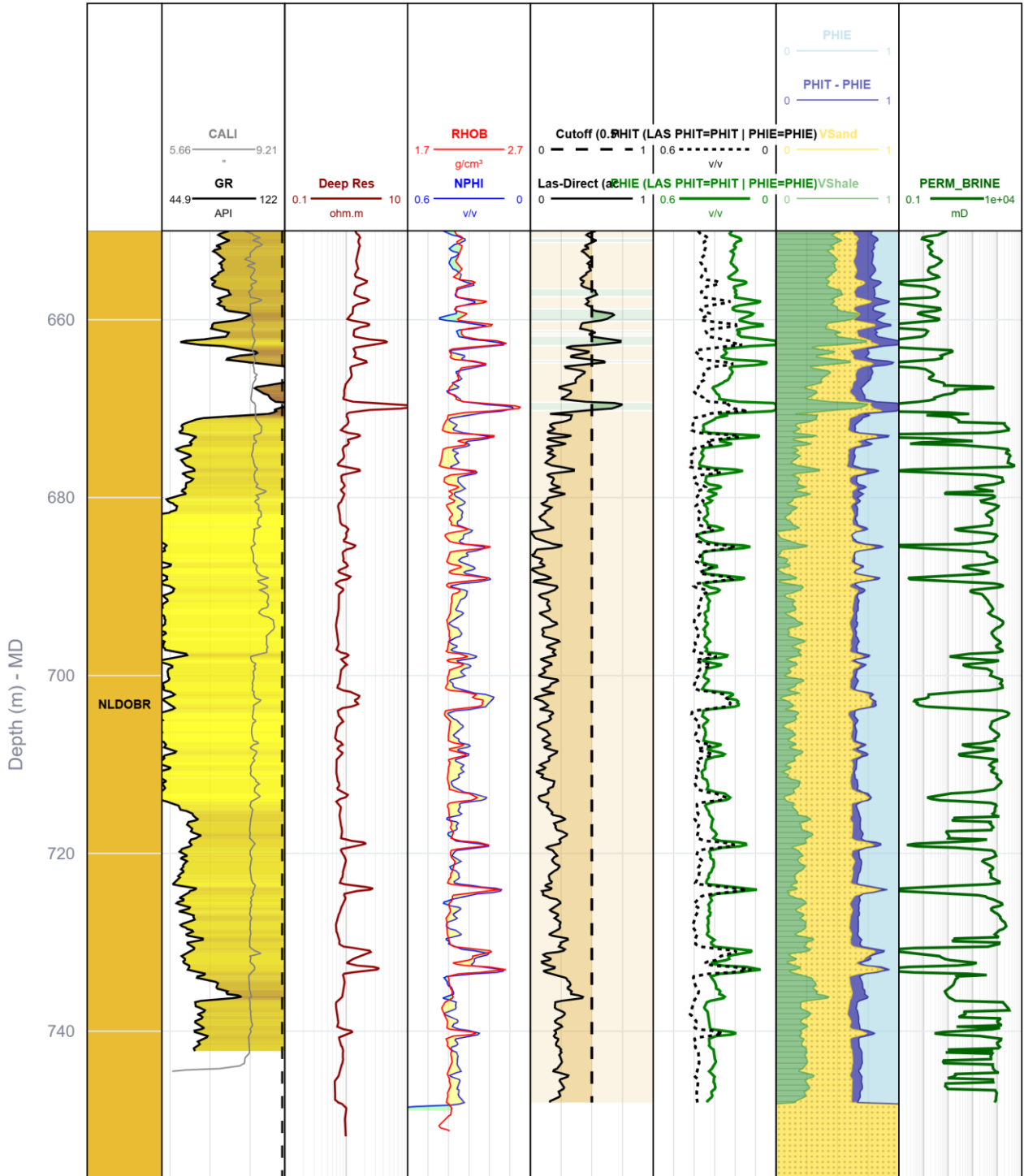
STR-01 - CPI Sproule 2026
-870.10 to -595.10 m | VSH method: linear



STW-01 - CPI Sproule 2026
-814.50 to -573.54 m | VSH method: linear



ZVB-GT-01 - CPI Sproule 2026
650.00 to 756.54 m | VSH method: las-direct



Appendix B: Petrofysische gemiddelden

Petrofysische gemiddelden per put en per zone van het Zand van Brussel Laagpakket

Well	Int	VSh src	Poro src	Perm src	Top (TVD) (m)	Bottom (TVD) (m)	Gross Thickness (m)	Net Thickness (m)	Net-to-Gross	Vsh (Gross Ava)	Vsh (Net Ava)	PHIT (Gross)	PHIT (Net Ava)	PHIE (Gross)	PHIE (Net Ava)	K (Gross Avg, mD)	K (Net Avg, mD)	PHIT*H Gross (m)	PHIT*H Net (m)	PHIE*H Gross (m)	PHIE*H Net (m)
BHG-01	ZvB S3	linear (RES D)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-489	-534	45	37	0.81	0.27	0.18	0.40	0.43	0.28	0.33	1902	2350	18.12	15.50	12.70	12.12
BHG-01	ZvB S2	linear (RES D)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-534	-590	56	36	0.64	0.34	0.22	0.44	0.43	0.27	0.32	1119	1742	24.83	15.45	15.15	11.49
BHG-01	ZvB S1	linear (RES D)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-590	-612	22	5	0.21	0.50	0.26	0.38	0.41	0.13	0.27	167	801	8.48	1.83	2.84	1.23
RDK-01	ZvB S3	linear (RES D)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-602	-707	104	71	0.68	0.33	0.19	0.29	0.33	0.21	0.27	95	140	30.31	23.50	22.03	19.12
RDK-01	ZvB S2	linear (RES D)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-707	-751	44	11	0.25	0.43	0.23	0.27	0.31	0.16	0.24	5	20	11.84	3.41	7.00	2.65
RDK-01	ZvB S1	linear (RES D)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-751	-809	59	3	0.06	0.61	0.26	0.22	0.31	0.09	0.23	1	20	13.04	0.99	5.52	0.73
STH-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-638	-726	88	63	0.71	0.21	0.14	0.36	0.38	0.25	0.31	775	1089	31.55	23.47	22.42	19.08
STH-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-726	-756	30	8	0.27	0.48	0.31	0.40	0.41	0.16	0.25	74	264	11.96	3.28	4.88	2.03

Petrofysische gemiddelden per put en per zone van het Zand van Brussel Laagpakket

Well	Int	VSh src	Poro src	Perm src	Top (TVD) (m)	Bottom (TVD) (m)	Gross Thickness (m)	Net Thickness (m)	Net-to-Gross	Vsh (Gross Ava)	Vsh (Net Ava)	PHIT (Gross)	PHIT (Net Ava)	PHIE (Gross)	PHIE (Net Ava)	K (Gross Avg, mD)	K (Net Avg, mD)	PHIT*H Gross (m)	PHIT*H Net (m)	PHIE*H Gross (m)	PHIE*H Net (m)
STH-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-756	-805	49	29	0.59	0.34	0.29	0.39	0.40	0.22	0.26	440	741	19.30	11.73	10.95	7.61
STR-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-546	-622	76	45	0.59	0.33	0.23	0.34	0.37	0.22	0.28	123	209	25.79	16.29	16.27	12.35
STR-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-622	-662	40	7	0.16	0.50	0.37	0.34	0.35	0.15	0.21	1	2	13.53	2.30	5.90	1.37
STR-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-662	-710	48	6	0.13	0.40	0.33	0.32	0.35	0.17	0.22	1	4	15.60	2.13	8.19	1.37
HVS-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-635	-769	134	109	0.81	0.30	0.23	0.43	0.45	0.28	0.33	1352	1667	57.16	48.45	37.71	35.60
HVS-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-769	-811	42	37	0.88	0.33	0.31	0.49	0.49	0.32	0.33	1005	1143	20.62	18.00	13.58	12.29
HVS-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-811	-847	36	16	0.43	0.56	0.25	0.39	0.41	0.14	0.28	312	721	14.20	6.39	4.96	4.40
RSB-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-512	-578	66	33	0.50	0.24	0.15	0.30	0.32	0.20	0.26	50	100	19.74	10.65	13.35	8.69
RSB-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-578	-623	45	4	0.08	0.39	0.26	0.31	0.33	0.16	0.23	4	43	14.16	1.23	7.02	0.84
RSB-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-623	-643	20	1	0.04	0.40	0.24	0.31	0.32	0.15	0.22	3	64	6.20	0.22	2.94	0.15

Petrofysische gemiddelden per put en per zone van het Zand van Brussel Laagpakket

Well	Int	VSh src	Poro src	Perm src	Top (TVD) (m)	Bottom (TVD) (m)	Gross Thickness (m)	Net Thickness (m)	Net-to-Gross	Vsh (Gross Ava)	Vsh (Net Ava)	PHIT (Gross)	PHIT (Net Ava)	PHIE (Gross)	PHIE (Net Ava)	K (Gross Avg, mD)	K (Net Avg, mD)	PHIT*H Gross (m)	PHIT*H Net (m)	PHIE*H Gross (m)	PHIE*H Net (m)
RZB-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-572	-681	109	89	0.82	0.27	0.23	0.41	0.42	0.27	0.31	1264	1551	44.30	37.31	29.34	27.10
RZB-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-681	-725	44	11	0.26	0.52	0.43	0.44	0.45	0.18	0.24	99	358	19.41	5.11	7.83	2.66
RZB-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-725	-768	43	12	0.29	0.47	0.35	0.42	0.40	0.18	0.22	27	79	18.21	5.01	7.83	2.75
KTG-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-333	-379	46	32	0.70	0.31	0.25	0.36	0.39	0.23	0.29	322	458	16.58	12.55	10.76	9.25
KTG-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-379	-397	18	5	0.28	0.50	0.39	0.38	0.39	0.17	0.23	6	14	6.90	1.98	3.14	1.15
KTG-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-397	-440	43	30	0.70	0.36	0.24	0.39	0.39	0.24	0.29	552	787	16.78	11.81	10.35	8.85
HBV-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_son)	-696	-737	41	31	0.75	0.23	0.18	0.37	0.37	0.25	0.28	393	523	15.22	11.53	10.30	8.66
STW-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-617	-682	65	50	0.78	0.26	0.14	0.37	0.39	0.28	0.33	616	796	24.18	19.40	18.33	16.72
STW-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-682	-744	63	40	0.64	0.37	0.26	0.37	0.39	0.24	0.29	474	743	23.16	15.74	14.98	11.73
STW-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-744	-797	52	18	0.35	0.46	0.24	0.32	0.35	0.18	0.27	57	165	16.72	6.38	9.35	4.90

Petrofysische gemiddelden per put en per zone van het Zand van Brussel Laagpakket

Well	Int	VSh src	Poro src	Perm src	Top (TVD) (m)	Bottom (TVD) (m)	Gross Thickness (m)	Net Thickness (m)	Net-to-Gross	Vsh (Gross Ava)	Vsh (Net Ava)	PHIT (Gross)	PHIT (Net Ava)	PHIE (Gross)	PHIE (Net Ava)	K (Gross Avg, mD)	K (Net Avg, mD)	PHIT*H Gross (m)	PHIT*H Net (m)	PHIE*H Gross (m)	PHIE*H Net (m)
BTL-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_sonic)	-602	-674	73	59	0.81	0.19	0.16	0.39	0.41	0.29	0.33	1429	1775	28.32	24.26	21.21	19.37
BTL-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_sonic)	-674	-739	64	32	0.49	0.43	0.28	0.41	0.42	0.19	0.27	454	916	26.27	13.27	12.36	8.67
BTL-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_sonic	K (PHIT_sonic)	-739	-809	71	5	0.07	0.54	0.34	0.38	0.39	0.11	0.22	6	43	27.12	1.85	7.79	1.03
PRW-01	ZvB S3	linear (GR)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-573	-643	70	55	0.79	0.29	0.26	0.34	0.35	0.24	0.26	67	85	23.61	19.19	16.67	14.18
PRW-01	ZvB S2	linear (GR)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-643	-675	32	5	0.14	0.55	0.41	0.36	0.37	0.16	0.22	2	11	11.75	1.68	5.33	1.00
PRW-01	ZvB S1	linear (GR)	PHIE_den	K (PHIT_den)	-675	-734	59	26	0.44	0.50	0.37	0.39	0.38	0.19	0.24	16	37	22.97	9.92	11.41	6.27
ORO-01	ZvB S3	las-direct (VSH)	LAS	LAS	643.73	-711.37	67.64	58.2	0.86	0.159	0.142	0.323	0.349	0.289	0.316	243.078	282.331	21.858	20.309	19.524	18.408
ORO-01	ZvB S2	las-direct (VSH)	LAS	LAS	711.37	-755.11	43.74	37.2	0.85	0.248	0.24	0.327	0.33	0.258	0.28	59.584	70.139	14.001	12.522	11.32	10.405
ORO-01	ZvB S1	las-direct (VSH)	LAS	LAS	755.11	-802.58	47.47	39.3	0.82	0.281	0.234	0.331	0.341	0.261	0.28	98.281	118.506	15.683	13.395	12.364	11.026
ZVB-GT-01	ZvB S3	las-direct (VSH)	LAS	LAS	-644	-757	112.543	83.972	0.746	0.256	0.211	0.355	0.372	0.275	0.306	513.369	636.082	36.998	31.264	28.667	25.722

Petrofysische gemiddelden zone van het Zand van Brussel Laagpakket

Interval	ZvB S3	ZvB S2	ZvB S1	ZvB Total
n_wells	13	12	13	14
Gross_p10	50	30	25	109
Gross_p50	73	44	47	163
Gross_p90	112	62	59	208
Gross_min	45	18	20	41
Gross_max	134	64	71	212
Net_p10	34	5	3	44
Net_p50	58	11	16	86
Net_p90	88	37	31	128
Net_min	32	4	1	31
Net_max	109.00	40.00	39.30	162.00
NTG_p10	0.61	0.14	0.06	0.37
NTG_p50	0.78	0.28	0.35	0.60
NTG_p90	0.82	0.83	0.74	0.76
NTG_min	0.50	0.08	0.04	0.29
NTG_max	0.86	0.88	0.83	0.85
VshG_p10	0.19	0.33	0.29	0.24
VshG_p50	0.27	0.43	0.46	0.35
VshG_p90	0.33	0.52	0.56	0.41
VshG_min	0.16	0.25	0.23	0.22
VshG_max	0.33	0.55	0.61	0.43
VshN_p10	0.14	0.23	0.24	0.18
VshN_p50	0.19	0.30	0.26	0.21
VshN_p90	0.25	0.41	0.35	0.26
VshN_min	0.14	0.22	0.18	0.16
VshN_max	0.26	0.43	0.37	0.30
PHITG_p10	0.30	0.31	0.31	0.31
PHITG_p50	0.36	0.38	0.38	0.37
PHITG_p90	0.41	0.44	0.39	0.42
PHITG_min	0.29	0.27	0.22	0.27
PHITG_max	0.43	0.49	0.42	0.44
PHITN_p10	0.33	0.33	0.32	0.33
PHITN_p50	0.38	0.39	0.38	0.38
PHITN_p90	0.43	0.45	0.41	0.43
PHITN_min	0.32	0.31	0.31	0.32
PHITN_max	0.45	0.49	0.41	0.46
PHIEG_p10	0.21	0.16	0.11	0.18
PHIEG_p50	0.27	0.18	0.18	0.23
PHIEG_p90	0.29	0.27	0.25	0.27
PHIEG_min	0.20	0.15	0.09	0.17
PHIEG_max	0.29	0.32	0.26	0.28
PHIEN_p10	0.26	0.22	0.22	0.26
PHIEN_p50	0.31	0.25	0.26	0.29
PHIEN_p90	0.33	0.32	0.28	0.32
PHIEN_min	0.26	0.21	0.22	0.25
PHIEN_max	0	0	0	0
KG_p10	73	2	1	14

KG_p50	513	67	57	244
KG_p90	1414	952	431	831
KG_min	50	1	1	9
KG_max	1902	1119	552	994
KN_p10	108	11	23	83
KN_p50	636	167	119	560
KN_p90	1753	1120	778	1337
KN_min	85	2	4	59
KN_max	2350.00	1742.00	801.00	1910.27
KHNet_p10	5621	57	61	4730
KHNet_p50	39800	2361	2970	41778
KHNet_p90	131376	41034	20434	138082
KHNet_min	3300	14	24	3436
KHNet_max	181703	62712	23610	228070

Appendix C: SRIMA input file SDRA

This file was generated by SRIMA version 1.0.3 at 01/04/2026, 15:08:30

```

name,unit,units,value,min,max,is_stochastic
calculation_mode,-,-,Uncertainty (stochastic),,,
ensemble_size,-,-,100,,,
use_random_seed,-,-,True,,,
seed,-,-,1,,,
location,-,-,Plane on fault (seismic risk/hazard),,,
well_x,m,m,111419.84,,,
well_y,m,m,423769.51,,,
thickness_seal,m,m km,85.0,80.0,120.0,False
thickness_reservoir,m,m km,169.0,50.0,150.0,False
thickness_base,m,m km,40.0,80.0,120.0,False
net_to_gross_reservoir,-,-,0.53,0.6,0.8,False
top_depth_reservoir,m,m,628.0,,,
well_diameter,in,cm m in,9.625,,,
reservoir_radius,m,m,1340.0,,,
fault_dip,deg,deg,53.0,50.0,70.0,False
fault_dip_direction,deg,deg,66.15,30.0,50.0,False
fault_location_x,m,m,111419.84,-50.0,50.0,False
fault_location_y,m,m,423769.51,-50.0,50.0,False
fault_length_strike,m,m,20000.0,1500.0,2500.0,False
fault_cell_size_along_strike,m,m,20.0,,,
fault_cell_size_along_dip,m,m,5.0,,,
mid_reservoir_temperature,C,C K,33.5,60.0,80.0,False
compressibility,1/Pa,1/Pa,5e-10,4e-10,6e-10,True
pore_pressure_top_reservoir,MPa,MPa,6.44,20.0,22.0,False
pressure_contrast_seal_reservoir,MPa,MPa,0.0,-1.0,1.0,False
pressure_contrast_reservoir_base,MPa,MPa,0.0,-1.0,1.0,False
use_empirical_fluid_props,-,-,True,,,
fluid_salinity,ppm,ppm,42000.0,150000.0,250000.0,False

```

reservoir_viscosity,Pa.s,Pa.s,0.0005,0.0005,0.001,False
 fluid_heat_capacity,J/kg/K,J/kg/K,4200.0,3700.0,4200.0,False
 injection_viscosity,Pa.s,Pa.s,0.001,,,
 injection_density,kg/m3,kg/m3,1000.0,,,
 pore_pressure_gradient_seal,kPa/m,kPa/m,10.253,,,
 pore_pressure_gradient_reservoir,kPa/m,kPa/m,10.253,,,
 pore_pressure_gradient_base,kPa/m,kPa/m,10.253,,,
 pore_pressure_gradient_stochastic,kPa/m,kPa/m,10.4,10.0,11.0,False
 permeability_seal,mD,mD,0.001,2e-06,0.01,False
 permeability_reservoir,mD,mD,508.0,200.0,1300.0,False
 permeability_base,mD,mD,0.001,2e-06,0.01,False
 total_porosity_seal,-,-,0.05,0.02,0.1,False
 total_porosity_reservoir,-,-,0.29,0.15,0.2,False
 total_porosity_base,-,-,0.05,0.05,0.1,False
 bulk_density_seal,kg/m3,kg/m3,2180.0,2100.0,2400.0,True
 bulk_density_reservoir,kg/m3,kg/m3,2180.0,2100.0,2400.0,False
 bulk_density_base,kg/m3,kg/m3,2180.0,2100.0,2400.0,True
 specific_heat_capacity_seal,J/kg/K,J/kg/K,800.0,750.0,850.0,True
 specific_heat_capacity_reservoir,J/kg/K,J/kg/K,800.0,750.0,850.0,True
 specific_heat_capacity_base,J/kg/K,J/kg/K,800.0,750.0,850.0,True
 thermal_conductivity_seal,W/m/K,W/m/K,3.0,1.0,5.0,False
 thermal_conductivity_reservoir,W/m/K,W/m/K,3.0,1.0,5.0,False
 thermal_conductivity_base,W/m/K,W/m/K,3.0,1.0,5.0,False
 mohr_coulomb_friction,-,-,0.55,0.48,1.0,True
 residual_friction,-,-,0.0,0.0,0.0,True
 mohr_coulomb_cohesion,MPa,MPa,1.31,0.54,9.1,True
 hydraulic_fracture_overpressure,MPa,MPa,0.0,,,
 min_stress_horizontal_top_reservoir,MPa,MPa,11.618,28.0,36.0,False
 stress_vertical_top_reservoir,MPa,MPa,12.62,42.0,46.0,False
 max_horizontal_min_horizontal_stress_ratio,-,-,1.1,1.0,1.2,True

stress_contrast_seal_reservoir,MPa,MPa,-2.0,-3.0,0.0,True
 stress_contrast_reservoir_base,MPa,MPa,2.0,0.0,3.0,True
 stress_drop,MPa,MPa,1.7,0.1,4.0,True
 magnitude_cutoff_mode,-,-,"Based on shear capacity, SCU > threshold",,,
 stress_drop_mode,-,-,Calculate from stresses,,,
 vertical_stress_gradient_seal,kPa/m,kPa/m,20.11,,,
 vertical_stress_gradient_reservoir,kPa/m,kPa/m,20.11,,,
 vertical_stress_gradient_base,kPa/m,kPa/m,20.11,,,
 vertical_stress_gradient_stochastic,kPa/m,kPa/m,20.11,21.0,23.0,False
 min_horizontal_stress_gradient_seal,kPa/m,kPa/m,18.5,,,
 min_horizontal_stress_gradient_reservoir,kPa/m,kPa/m,18.5,,,
 min_horizontal_stress_gradient_base,kPa/m,kPa/m,18.5,,,
 min_horizontal_stress_gradient_stochastic,kPa/m,kPa/m,10.0,14.0,18.0,False
 max_horizontal_stress_azimuth_seal,deg,deg rad,135.0,,,
 max_horizontal_stress_azimuth_reservoir,deg,deg rad,135.0,,,
 max_horizontal_stress_azimuth_base,deg,deg rad,135.0,,,
 max_horizontal_stress_azimuth_stochastic,deg,deg rad,135.0,110.0,160.0,True
 youngs_modulus_seal,GPa,GPa,0.66,0.32,0.85,True
 youngs_modulus_reservoir,GPa,GPa,1.77,1.325,22.48,True
 youngs_modulus_base,GPa,GPa,14.0,10.0,18.0,True
 poissons_ratio_seal,-,-,0.44,0.25,0.46,True
 poissons_ratio_reservoir,-,-,0.25,0.05,0.35,True
 poissons_ratio_base,-,-,0.35,0.2,0.4,True
 biot_seal,-,-,0.9,0.5,1.0,True
 biot_reservoir,-,-,0.87,0.5,1.0,True
 biot_base,-,-,0.9,0.5,1.0,True
 thermal_expansion_coeff_seal,1/K,1/K,1e-05,5e-06,1e-05,True
 thermal_expansion_coeff_reservoir,1/K,1/K,1e-05,5e-06,1e-05,True
 thermal_expansion_coeff_base,1/K,1/K,1e-05,5e-06,1e-05,True
 average_volumetric_injection_rate,m3/hr,m3/hr,400.0,,,

max_volumetric_injection_rate,m3/hr,m3/hr,400.0,,,

injection_temperature,C,C,7.0,,,

skin_factor,-,-,0.0,,,

time_steps,yr,yr,"2, 30",,,

threshold_shear_capacity_cutoff,-,-,1.0,,,

threshold_pgv,mm/s,mm/s,3.0,,,

minimum_intact_layer_thickness,m,m,30.0,,,

minimum_intact_layer_share,%,%,50.0,,,

safe_intact_realizations_share,%,%,95.0,,,

Appendix D: SRIMA input file Seal integrity

This file was generated by SRIMA version 1.0.3 at 19/03/2026, 19:45:51

```

name,unit,units,value,min,max,is_stochastic
calculation_mode,-,-,Sensitivity (tornado diagram),,,
ensemble_size,-,-,1000,,,
use_random_seed,-,-,True,,,
seed,-,-,1,,,
location,-,-,Vertical line at injection well (seal integrity),,,
well_x,m,m,111419.84,,,
well_y,m,m,423769.51,,,
thickness_seal,m,m km,30.0,80.0,120.0,False
thickness_reservoir,m,m km,169.0,50.0,150.0,False
thickness_base,m,m km,85.0,80.0,120.0,False
net_to_gross_reservoir,-,-,0.53,0.6,0.8,False
top_depth_reservoir,m,m,628.0,,,
well_diameter,in,cm m in,9.625,,,
reservoir_radius,m,m,1340.0,,,
fault_dip,deg,deg,53.0,50.0,70.0,False
fault_dip_direction,deg,deg,66.15,30.0,50.0,False
fault_location_x,m,m,111419.84,-50.0,50.0,False
fault_location_y,m,m,423769.51,-50.0,50.0,False
fault_length_strike,m,m,20000.0,1500.0,2500.0,False
fault_cell_size_along_strike,m,m,20.0,,,
fault_cell_size_along_dip,m,m,5.0,,,
mid_reservoir_temperature,C,C K,34.7,60.0,80.0,False
compressibility,1/Pa,1/Pa,5e-10,4e-10,6e-10,True
pore_pressure_top_reservoir,MPa,MPa,6.4,20.0,22.0,False
pressure_contrast_seal_reservoir,MPa,MPa,0.0,-1.0,1.0,False
pressure_contrast_reservoir_base,MPa,MPa,0.0,-1.0,1.0,False
use_empirical_fluid_props,-,-,True,,,

```

fluid_salinity,ppm,ppm,42000.0,150000.0,250000.0,False
 reservoir_viscosity,Pa.s,Pa.s,0.0005,0.0005,0.001,False
 fluid_heat_capacity,J/kg/K,J/kg/K,4200.0,3700.0,4200.0,False
 injection_viscosity,Pa.s,Pa.s,0.001,,,
 injection_density,kg/m3,kg/m3,1000.0,,,
 pore_pressure_gradient_seal,kPa/m,kPa/m,10.253,,,
 pore_pressure_gradient_reservoir,kPa/m,kPa/m,10.253,,,
 pore_pressure_gradient_base,kPa/m,kPa/m,10.253,,,
 pore_pressure_gradient_stochastic,kPa/m,kPa/m,10.4,10.0,11.0,False
 permeability_seal,mD,mD,0.001,2e-06,0.01,False
 permeability_reservoir,mD,mD,508.0,200.0,1300.0,False
 permeability_base,mD,mD,0.001,2e-06,0.01,False
 total_porosity_seal,-,-,0.05,0.02,0.1,False
 total_porosity_reservoir,-,-,0.29,0.15,0.2,False
 total_porosity_base,-,-,0.05,0.05,0.1,False
 bulk_density_seal,kg/m3,kg/m3,2180.0,2100.0,2400.0,True
 bulk_density_reservoir,kg/m3,kg/m3,2180.0,2100.0,2400.0,False
 bulk_density_base,kg/m3,kg/m3,2180.0,2100.0,2400.0,True
 specific_heat_capacity_seal,J/kg/K,J/kg/K,800.0,750.0,850.0,True
 specific_heat_capacity_reservoir,J/kg/K,J/kg/K,800.0,750.0,850.0,True
 specific_heat_capacity_base,J/kg/K,J/kg/K,800.0,750.0,850.0,True
 thermal_conductivity_seal,W/m/K,W/m/K,3.0,1.0,5.0,False
 thermal_conductivity_reservoir,W/m/K,W/m/K,3.0,1.0,5.0,False
 thermal_conductivity_base,W/m/K,W/m/K,3.0,1.0,5.0,False
 mohr_coulomb_friction,-,-,0.55,0.48,1.0,True
 residual_friction,-,-,0.0,0.0,0.0,True
 mohr_coulomb_cohesion,MPa,MPa,1.31,0.54,9.1,True
 hydraulic_fracture_overpressure,MPa,MPa,0.0,,,

min_stress_horizontal_top_reservoir,MPa,MPa,11.6,28.0,36.0,False
 stress_vertical_top_reservoir,MPa,MPa,12.6,42.0,46.0,False
 max_horizontal_min_horizontal_stress_ratio,-,1.1,1.0,1.2,True
 stress_contrast_seal_reservoir,MPa,MPa,0.0,-3.0,0.0,False
 stress_contrast_reservoir_base,MPa,MPa,0.0,0.0,3.0,False
 stress_drop,MPa,MPa,1.7,0.1,4.0,True
 magnitude_cutoff_mode,-,,"Based on shear capacity, SCU > threshold",,
 stress_drop_mode,-,,"Calculate from stresses",,
 vertical_stress_gradient_seal,kPa/m,kPa/m,20.11,,,
 vertical_stress_gradient_reservoir,kPa/m,kPa/m,20.11,,,
 vertical_stress_gradient_base,kPa/m,kPa/m,20.11,,,
 vertical_stress_gradient_stochastic,kPa/m,kPa/m,20.11,21.0,23.0,False
 min_horizontal_stress_gradient_seal,kPa/m,kPa/m,18.5,,,
 min_horizontal_stress_gradient_reservoir,kPa/m,kPa/m,18.5,,,
 min_horizontal_stress_gradient_base,kPa/m,kPa/m,18.5,,,
 min_horizontal_stress_gradient_stochastic,kPa/m,kPa/m,10.0,14.0,18.0,False
 max_horizontal_stress_azimuth_seal,deg,deg rad,135.0,,,
 max_horizontal_stress_azimuth_reservoir,deg,deg rad,135.0,,,
 max_horizontal_stress_azimuth_base,deg,deg rad,135.0,,,
 max_horizontal_stress_azimuth_stochastic,deg,deg rad,135.0,110.0,160.0,True
 youngs_modulus_seal,GPa,GPa,0.66,0.32,0.85,True
 youngs_modulus_reservoir,GPa,GPa,1.77,1.325,22.48,True
 youngs_modulus_base,GPa,GPa,14.0,10.0,18.0,True
 poissons_ratio_seal,-,0.44,0.25,0.46,True
 poissons_ratio_reservoir,-,0.225,0.15,0.3,True
 poissons_ratio_base,-,0.35,0.2,0.4,True
 biot_seal,-,0.9,0.5,1.0,True
 biot_reservoir,-,0.87,0.5,1.0,True
 biot_base,-,0.9,0.5,1.0,True

thermal_expansion_coeff_seal,1/K,1/K,9e-06,5e-06,1e-05,False
 thermal_expansion_coeff_reservoir,1/K,1/K,9e-06,5e-06,1e-05,False
 thermal_expansion_coeff_base,1/K,1/K,9e-06,5e-06,1e-05,False
 average_volumetric_injection_rate,m3/hr,m3/hr,400.0,,,
 max_volumetric_injection_rate,m3/hr,m3/hr,400.0,,,
 injection_temperature,C,C,7.0,,,
 skin_factor,-,-,0.0,,,
 time_steps,yr,yr,"2, 30",,,
 threshold_shear_capacity_cutoff,-,-,1.0,,,
 threshold_pgv,mm/s,mm/s,3.0,,,
 minimum_intact_layer_thickness,m,m,30.0,,,
 minimum_intact_layer_share,%,%,50.0,,,
 safe_intact_realizations_share,%,%,95.0,,

Appendix E: Geothermische potentiekaarten

