

Rotliegend onder Lelystad

Seismische acquisitie en interpretatie

Warming^{UP}GOO
Geothermie & Opslag Opschaling

colofon

Document naam	Rotleigend onder Lelystad; Seismische acquisitie en interpretatie
Versie	01
Auteur	Cees Willems
Datum	03-02-2026

1 Samenvatting

Deze rapportage beschrijft de acquisitie en interpretatie van acht 2D-seismische lijnen in en rond Lelystad, uitgevoerd tussen februari en augustus 2024 als onderdeel van het WarmingUP Geothermie en Opslag Opschaling (Warming^{UP}GOO) project. De campagne had als doel om binnen stedelijk gebied op kostenefficiënte wijze de geologische structuur en geothermische potentie van het Rotliegend in kaart te brengen. De survey is uitgevoerd met innovatieve apparatuur (Storm eVibe en Stryde Nodal System) en bestond uit twee fasen waarin 9 lijnen zijn geschoten in totaal 61,1 km lengte. De resultaten tonen aan dat deze aanpak effectief is voor geothermie-exploratie in stedelijke gebieden.

Belangrijkste resultaten:

- Verbeterd inzicht in structurele setting en dieptekaart, met scherpere definitie van randbreuken.
- Goede interpretatie mogelijk tot en met de Zechstein; data met name ook geschikt voor analyse van de Noordzee Groep.
- Effectieve, kostenefficiënte survey en daarmee een voorbeeld voor toekomstige 2D-seismische acquisitie voor geothermieprojecten.

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	3
2	Introductie	6
3	Referentiedata en geologische setting	7
3.1	Reference wells	7
3.2	Geologische setting ROSL	8
4	Seismische acquisitie	9
4.1	Acquisitie Parameters	9
4.2	Processing	11
5	Interpretatie en tijd-diepte conversie	12
5.1	Interpretatiecriteria	12
5.2	Tijd-Diepte conversie	13
6	Resultaten	14
6.1	Seismische interpretatie	14
6.2	Top Rotliegend dieptekaart	17
7	Conclusies	18
8	Dankwoord	19
	Referenties	20

Figurenlijst

Figuur 1 Overzicht van seismische data en referentie putten. Blauwe lijnen zijnde nieuw verworven data binnen dit project; rood geeft bestaande SCAN-lijnen weer.	7
Figuur 2 (links) CDP-fold voorbeeld van lijn HV24-03, en (rechts) voorbeeld van uitdagingen voor plaatsing van geophones en source in de stedelijke omgeving.	11
Figuur 3 (boven) seismische lijn HVC24-04 en (onder) lijn SCAN41. NS: Noordzee Groep, Intra-Trias: informele horizon binnen Trias, SK: Nedersaksen Groep, ZE: Zechstein. ROSL: Formatie van Slochteren. Beide lijnen hebben hetzelfde amplitude kleurenspectrum.	15
Figuur 4 Oostelijke sectie van HVC24-01 met compressiestructuren.	16
Figuur 5 Dieptekaart Slochteren Formatie reservoir in het AOI in het 2022 model zonder o.b.v. WarmingUp GOO Seismic EN SCAN seismiek. De nieuwe breukstructuur is ook te zien als zwarte stippellijnen.	17

2 Introductie

HVC ontwikkelt in samenwerking met Vattenfall het geothermieproject Lelystad. Het zoekgebied is toegekend in December 2018. Het doel van de ontwikkeling is het realiseren van een aardwarmteproject met als target de Formatie van Slochteren (ROSL). Vattenfall opereert een warmtenet in Lelystad dat nu wordt gevoed door een biomassacentrale. Die nadert het einde van de productietijd. Aardwarmte is een van de belangrijkste mogelijke vervangende alternatieven.

De Formatie van Slochteren (ROSL) is in de regio Lelystad aangeboord door onder andere de LEL-01 en ZEW-01 putten. De complexe structurele setting bleek al uit kaarten van breuken van het basis Zechstein DGM-deep V2 (Duin, et al. 2006) op basis van vintage seismiek rond Lelystad. Hierop is te zien dat ten oosten van Lelystad noordwest-zuidoost georiënteerde breuken en meer oost-west georiënteerde breuken samenkomen. Hier zijn dus complexe opschuivingen te verwachten waarvoor hoge seismische datadichtheid nodig is om het goed in kaart te brengen. SCAN 2D lijnen SCAN41, SCAN35 en SCAN04 (Figuur 1) brachten de relatieve positie weer een stap verder, en deze data is gebruikt voor een eerste geologisch model van het geothermiereservoir in het zoekgebied Lelystad in 2022 (Figuur 5B). De afstand tussen deze lijnen is echter vergelijkbaar met grote breukpatronen in het Rotliegend (Ligtenberg, Okkerman en Keijzer 2011) (van Oijk, et al. 2020), en daarmee bleef een significante kans dat er breuken zijn die niet worden doorkruist door de SCAN lijnen. Extra seismische lijnen, die deze structurele onzekerheden kunnen verminderen waren dus nodig om onzekerheden over de structurele setting te verkleinen en risico's voor het geothermieproject te verminderen.

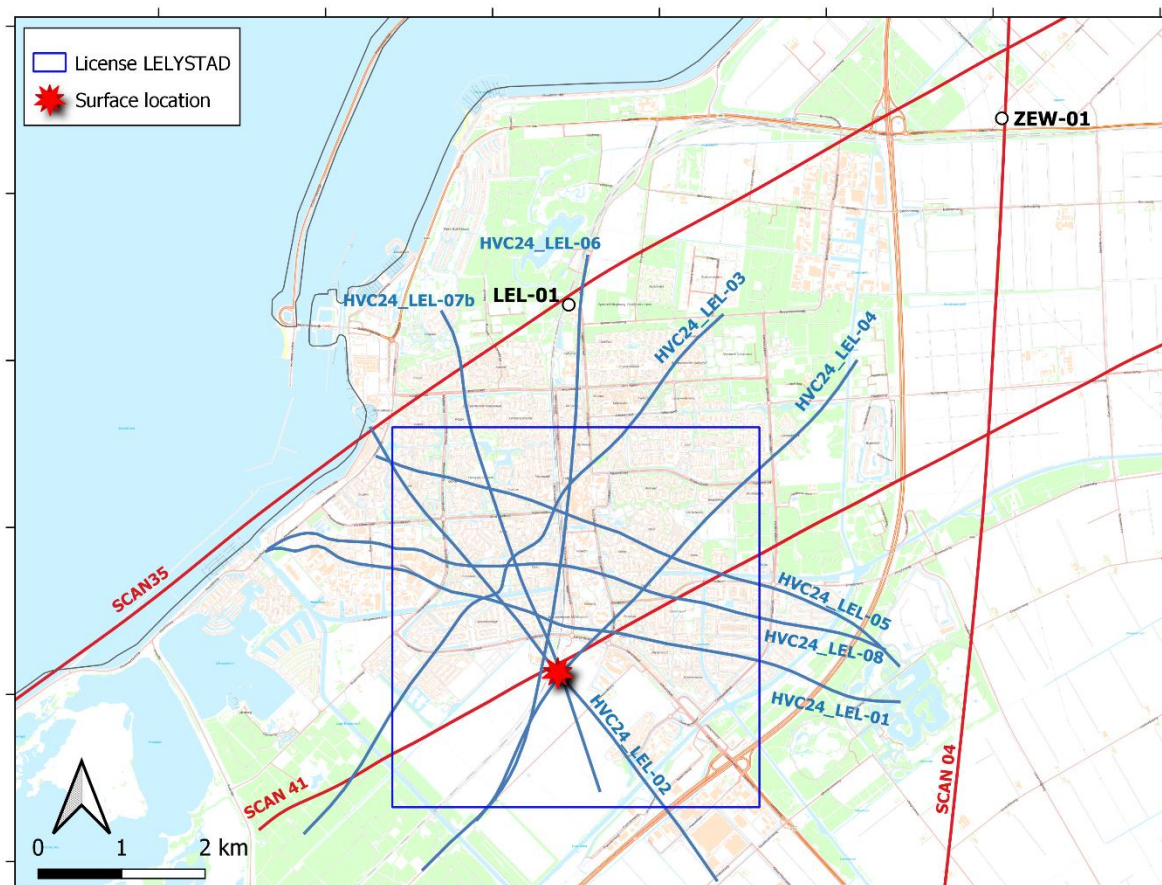
De data in dit rapport is verkregen met steun van Warming^{UP}GOO¹. Warming^{UP}GOO richt zich op de versnelling van de uitrol van geothermie en ondergrondse warmteopslag in Nederland, door het vergroten van de kennis over de ondergrond, het uitvoeren van HTO pilots, verbetering van de efficiëntie van geothermie projecten en vergroten van het maatschappelijk draagvlak. De data-acquisitie vond plaats tussen februari en augustus 2024. Daarbij is er ongeveer 61 km aan 2D-seismische data verkregen in en rond Lelystad. De data zijn verkregen met behulp van de Storm eVibe van Seismic Mechatronics en het Stryde Nodal System. Er is gekozen voor deze techniek als kostenefficient alternatief voor conventionele seismische campagnes met vibroseis trucks, zodat de campagne zowel de innovatieve eVibe bron demonstreert, en ook als voorbeeld dient voor seismische acquisitie voor toekomstige geothermieprojecten in stedelijke gebieden. Dit rapport beschrijft de acquisitie, processing, interpretatiestrategie en de resultaten die de campagne heeft opgeleverd.

¹ www.warmingup.info/goo

3 Referentiedata en geologische setting

3.1 Reference wells

De belangrijkste data die gebruikt is voor seismische interpretatie en diepteconversie komen uit de putten LEL-01 en ZEW-01. Voor beide putten is checkshot data beschikbaar en logdata van de belangrijkste seismische horizonten. De 2D seismische lijnen SCAN04 en SCAN35 doorkruisen elk een van deze putten (Figuur 1).



Figuur 1 Overzicht van seismische data en referentie putten. Blauwe lijnen zijnde nieuw verworven data binnen dit project; rood geeft bestaande SCAN-lijnen weer.

3.2 Geologische setting ROSL

Lelystad ligt aan de noordrand van het Centraal-Nederland Bekken, ten oosten van het Noord-Holland Platform en ten zuiden van de Texel-IJsselmeer Hoogte. Het bekken kent een complexe geschiedenis van daling en opheffing. Van het Vroeg-Perm tot het Jura vond daling plaats door extensie, waarbij Rotliegend-, Zechstein-, Trias- en Jura-afzettingen werden gevormd. De laatste grote inversie trad op in het Laat-Krijt, waarbij grote delen van het Krijt, Jura en zelfs Trias werden geërodeerd. De structurele setting en impact van de tektonische geschiedenis op de bepaling van maximale begravingsgeschiedenis van de Slochteren Formatie is als in detail beschreven in eerder WarmingUp onderzoek (Veldkamp, et al. 2022).

De Boven-Slochteren Member, het target van de geothermie exploitatie is onderdeel van de zandsteenrijke Slochteren Formatie binnen de Boven-Rotliegend Groep. In dit gebied bestaat deze groep uitsluitend uit het Boven- Slochteren Laagpakket (ROSLU) die in dit gebied is gedomineerd door eolische afzettingen. Een complete definitie van de reservoir geologie is te vinden in o.a. (Panterra 2025).

4 Seismische acquisitie

Tussen februari en augustus 2024 heeft Seismic Mechatronics ongeveer 61,1 km aan 2D seismische data geacquireerd voor HVC, binnen en rondom Lelystad. De data is verkregen met de Storm eVibe van Seismic Mechatronics en het Stryde Nodal System. Het project bestond uit twee fasen van acquisitie. De eerste fase omvatte zeven lijnen: HVC24_LEL-01, 02, 03, 04, 05, 06 en 07a. De tweede fase bestond uit een heropname van het zuidelijke deel van HVC24_LEL-07 (aangeduid als HVC24_LEL-07b) en een extra lijn door de stad: HVC24_LEL-08. De drieledige strategie van het lijnen plan is zichtbaar in Figuur 1. Lijnen 06, 03 en 04 hebben een noordoost-zuidwest orientatie en hebben als doel om breuken met het de in Nederland gebruikelijke noordwest-zuidoost strekking in kaart te brengen. Lijnen 01, 05 en 08 hebben als doel om de continuïteit van het Rotliegend tussen de grote breuklijnen te bevestigen. En de lijnen kruisen zoveel mogelijk de beoogde boorlocatie om verbreuking langs mogelijk boortrajecten te onderzoeken ter preventie van drill fluid losses.

Dankzij de combinatie van de Storm eVibe en het Stryde-systeem kon seismische data makkelijker worden verzameld binnen de stadsgrenzen, vergeleken met conventionele gebruik makend van grote vibroseis trucks. De data zijn verwerkt via een Pre-Stack Time Migration-verwerkingsflow die is samengevat in sectie Processing4.2

4.1 Acquisitie Parameters

De acquisitieparameters bleven gedurende de gehele survey gelijk, met uitzondering van de heropname van HVC24_LEL-07b en HVC24_LEL-08, waarbij de receiver-afstand werd gewijzigd van 5 meter naar 10 meter. Deze beslissing was gebaseerd op test sweeps, waaruit bleek dat het vergroten van de receiver-afstand geen nadelig effect had op de uiteindelijke datakwaliteit.

De station ranges en CDP-ranges van de lijnen, en acquisitieparameters worden weergegeven in Tabel 1. De heropname van het zuidelijke deel van HVC24_LEL-07 is samengevoegd met de oorspronkelijke HVC24_LEL-07 om een volledige lijn te vormen: HVC24_LEL-07b. Deze lijn loopt door de voorgestelde locatie van de injectieput in het zuidoosten van de stad.

Tabel 1 Acquisitieparameters

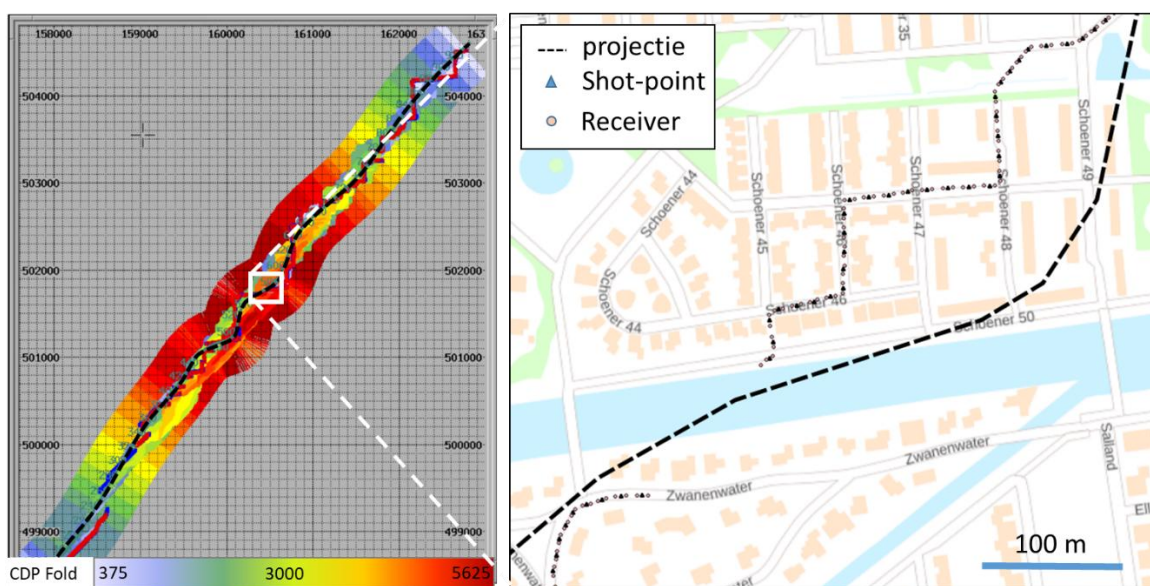
Lijn	Eerste CDP	Laatste CDP	Eerste Station	Laatste Station	Length [km]
HVC-24-01	101	892	10051	11610	7.91
HVC-24-02	105	788	20015	21381	6.83
HVC-24-03	106	917	30005	34554	8.11
HVC-24-04	101	908	40001	41593	8.07
HVC-24-05	105	786	50072	51420	6.81
HVC-24-06	101	799	60042	61398	6.98
HVC-24-07	102	696	70014	71128	5.94
HVC-24-07b	105	711	70014	71128	6.06
HVC-24-08	103	866	80001	80756	7.63
				Totaal	64.34
Parameter					
Source Point Spacing [m]			10		
Sweeps per VP			3		
Sweep range [Hz]			3-75		
Sweep length [s]			24		
Sweep Type			Linear		
Receiver type			Stryde Nodes		
Receiver Interval			5m (10m voor HVC-24-07b en HVC-24-08)		
Sample interval [ms]			4		
Trace Length [m]			5000		
Spheriod			Bessel 1841		
Projectie			Oblique Stereographic		
Projectiezone			Amersfoort/RD New		
Long. Of Central Meridian			52315.5E		
Grid Coord. At Origin			155000E, 463000N		
Scale factor			0.9999079		

4.2 Processing

Met behulp van *crooked line binning* zijn de seismische traces geprojecteerd op de ondergrondse lijnen, waarbij rekening is gehouden met terreinvarianties en afwijkingen in de locatie van de Common Depth Points (CDP). De CDP-fold geeft aan hoeveel traces bijdragen aan één gemeenschappelijk reflectiepunt op de uiteindelijke 2D-lijn (Figuur 2).

Na het resampelen van de data en het toepassen van near-surface correcties zijn *Squelch* en *Quash* gebruikt om verschillende vormen van ruis te onderdrukken. Squelch verwijdert random en spurious noise, terwijl Quash lineaire ruis onderdrukt zoals coherent noise door o.a. ground roll, multiples, ondiepe refracties en source-generated noise.

Na drie velocity analysis passes, een voorlopige PSTM en een aanvullende Migration Velocity Analysis is een Kirchhoff PSTM uitgevoerd. Op de resulterende raw stacks zijn diverse filters toegepast (TVF, FK, FX, spectral shaping), evenals cascaded AGC, een 180° faseverschuiving conform de Nederlandse reverse polarity-conventie, en vertical shifts om de data te matchen met de SCAN-lijnen 04 en 25.



Figuur 2 (links) CDP-fold voorbeeld van lijn HV24-03, en (rechts) voorbeeld van uitdagingen voor plaatsing van geophones en source in de stedelijke omgeving.

5 Interpretatie en tijd-diepte conversie

5.1 Interpretatiecriteria

Binnen het Onderzoeksgebied (Area of Investigation, Aoi) zijn vier geologische horizonten geïnterpreteerd volgens strategie en seismic-to-well tie in Panterra (2022):

- Basis Noordzee Supergroep (Base N)
- Basis Schieland Groep (Base SK)
- Basis Trias (Base RB)
- Basis Zechstein (Ze) – Top van het Slochteren-reservoir

De basis van de Noordzee Supergroep wordt doorgaans gekenmerkt door een sterke, harde reflectie. Vaak wordt deze ook herkend als een discordantie tussen de (sub)horizontaal gelaagde, continue Tertiaire reflectoren en de gekantelde en golvende onderliggende reflectoren van de Jura- of Trias-afzettingen (Figuur 3).

De basis van de Schieland Groep wordt geïdentificeerd bij de discordantie tussen de reflectoren van de Schieland Groep en de Boven-Germaanse Trias Groep. Deze discordantie wordt benadrukt door het verschil in seismisch karakter tussen beide groepen. De Trias-lagen zijn over het algemeen minder continu en vertonen een lagere amplitude of een semi-transparante seismische respons. De Trias-lagen liggen conform bovenop de Zechstein Groep (Figuur 3). Er is geen interne horizon geselecteerd voor de tijd-diepte conversie tussen de Boven- en Onder-Germaanse Trias Groepen, aangezien de Boven-Germaanse Trias is geërodeerd bij boring ZEW-01, waardoor een well-to-seismic tie niet mogelijk is. De seismische snelheden in beide groepen onder Lelystad zijn zeer vergelijkbaar, wat betekent dat er geen significante impact op de dieptekaart wordt verwacht. Wel is een informele interne horizon binnen het Trias geschetst om een tweedeling in de seismische facies van dit interval te belichten. De basis van de Trias wordt geïdentificeerd als de eerste sterke harde reflectie (rood) binnen een interval met hoge amplitude en continue reflectoren, kenmerkend voor de Zechstein Groep. Boorgegevens van boring ZEW-01 bevestigen dat deze harde reflectie overeenkomt met de top van Zechstein Boven-Kleistein Formatie.

De basis van de Zechstein Groep, en dus de top van het Slochteren reservoir, wordt in LEL-01 gevormt door het Koperschalie Laagpakket. De meest duidelijke reflector is echter de overgang van het Z1 Anhydriet laagpakket naar onderliggende kleistenen. Deze soft-kick reflector is geïnterpreteerd als near-Base Zechstein, aangenomen dat de stratigrafie constant is het Aoi. Vanwege variabiliteit in het aantal reflectoren worden de Tijdsdikte (TWT) van de Zechstein Groep uit DGM-deep V4 onshore en de locatie van boring ZEW-01 als leidraad gebruikt. De tijdsdikte van de Zechstein binnen het AOI varieert van 80 ms tot 130 ms. De basis van het Slochteren reservoir is niet geïnterpreteerd omdat het niet duidelijk zichtbaar is op de nieuwe data.

5.2 Tijd-Diepte conversie

De vier seismische horizonten zijn omgezet naar grids met behulp van de 'minimum curvature' methode, met een celgrootte van 50 m x 50 m. Breukpolygonen zijn meegenomen in het gridding proces. Voor de diepteconversie van de vier horizonten en breuken binnen het Aol is gebruikgemaakt van Velmod 3.2. Voor de Trias-lagen is de gecombineerde interval-snelheid van de Boven- en Onder-Germaanse Trias Groepen (TR_f_V0) toegepast. Tabel 2 toont de residuen per boring waar de top van het Boven-Rotliegend Slochteren aanwezig is. Een negatief residu geeft aan dat de diepte van het grid lager ligt dan de topdiepte in de boring.

Tabel 2 Residuals-check van het velocity model de diepte conversie.

Well	Top RO [m]	Residual [m]	Residual [%]
ZEW-01	1617	5	0.3%
LEL-01	1880	-63	3.3%

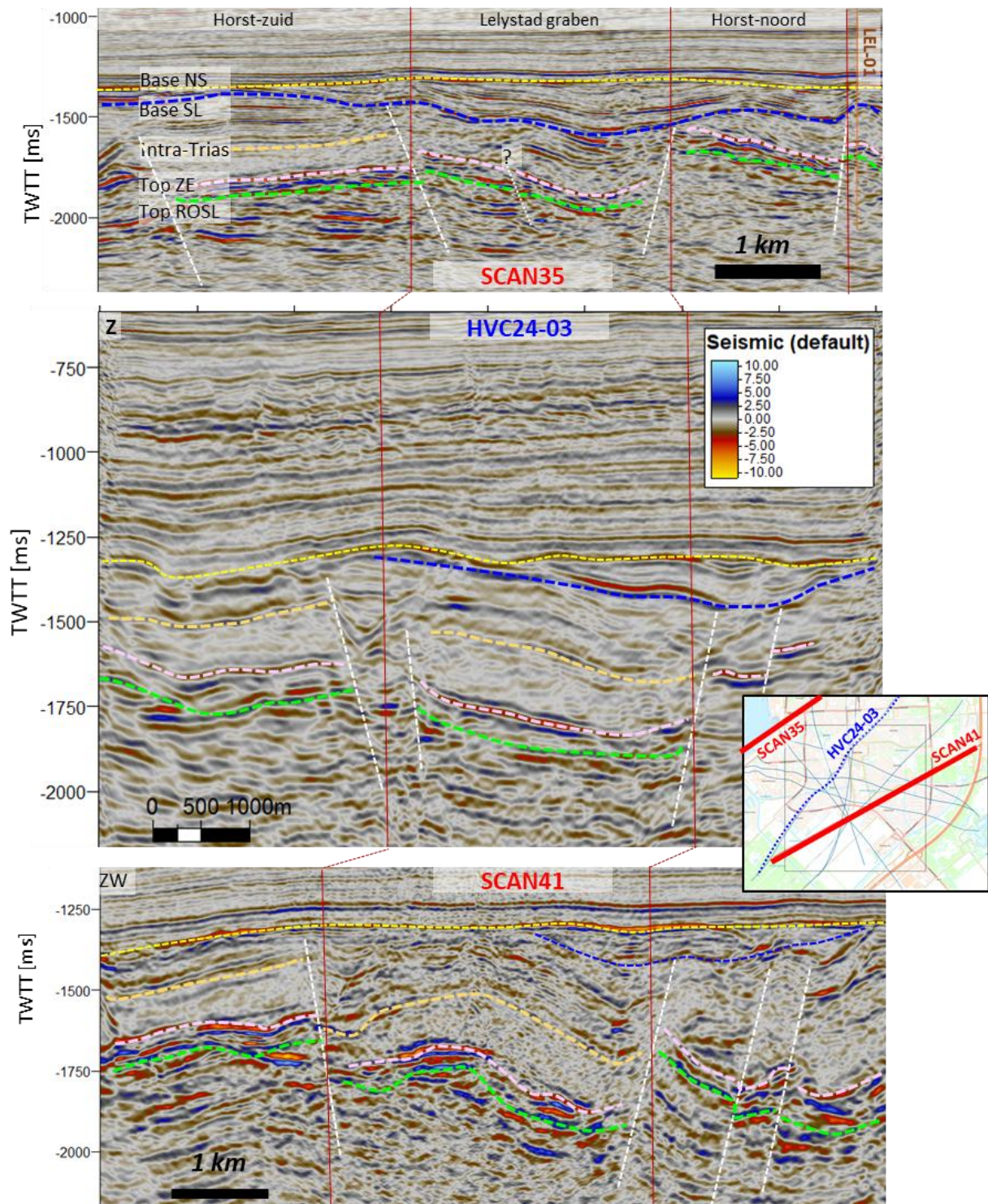
6 Resultaten

6.1 Seismische interpretatie

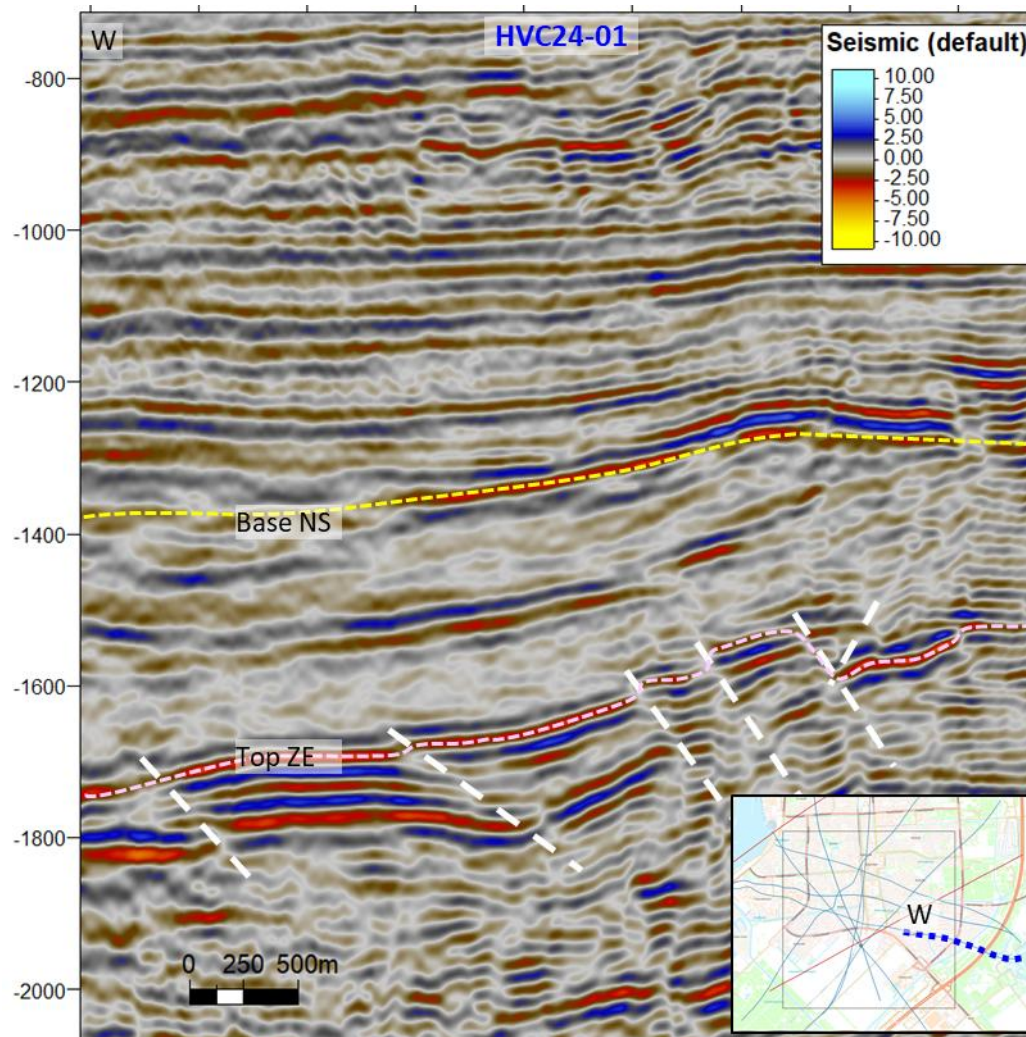
Figuur 3 toont twee SCAN-lijnen en de nieuwe lijn HVC24-04. Deze zuidwest-noordoost georiënteerde profielen geven samen een overzicht van de structurele setting onder Lelystad. Alle drie tonen zij het Lelystad-graben, geflankeerd door een noordelijke en zuidelijke horst. Op HVC24-03 helt het Rotliegend naar het noorden en bedraagt de breedte van het breukblok circa 2,5 km. Op SCAN35 is een verstoring zichtbaar die op geen van de andere lijnen terugkomt. Op SCAN41, de meest zuidelijke lijn, vertonen de lagen binnen het graben een duidelijke plooïing. Dwars op SCAN41 laten de nieuwe lijnen, waaronder HVC24-01, zien dat in het zuidoosten van het Aol opschuivingen voorkomen (Figuur 4) die deze plooïing kunnen verklaren. Deze opschuivingen zijn niet afzonderlijk in Figuur 3 weergegeven, waarschijnlijk omdat hun oriëntatie vrijwel parallel loopt aan deze lijnrichting.

Figuur 3 vergelijkt tevens de seismische expressie van de SCAN-data met die van de nieuwe survey. In de Trias zijn in de nieuwe dataset hogere-frequentie reflectoren boven de informele 'Intra-Trias' horizon deels onderdrukt door processing, terwijl de SCAN-lijnen over het algemeen sterkere amplitudes tonen. Desondanks zijn in beide datasets de belangrijkste stratigrafische grenzen goed herkenbaar: de unconformities aan de basis van de Noordzee- en Schieland-groepen, de top van de Zechstein Groep en de top van de Formatie van Slochteren. De SCAN-lijnen laten dieper gelegen reflecties echter frequenter en continuër zien, mede door de grotere bron-energie en verschillen in opnamegeometrie. Basis Slochteren is in veel breukblokken niet of zeer slecht zichtbaar op alle seismische lijnen. Dit is vooral zo op de nieuwe seismiek, maar dit geldt ook al voor de SCAN lijnen. Daarom is de interpretatie hiervan niet meegenomen in dit rapport.

De complexere structuur op SCAN41 kan deels worden verklaard door de opschuivingen in het zuidoosten van het Aol (Figuur 4), die samenvallen met een convergent breukpatroon in de Base-Zechstein dieptekaart uit DGM-diep V2 (Duin et al., 2006). Daarnaast speelt mee dat diepere discontinuïteiten in de nieuwe data minder duidelijk tot expressie komen. Dit is een gevolg van de imaging-focus van de nieuwe survey: acquisitie- en verwerkingsparameters zijn geoptimaliseerd voor het Rotliegend-interval, terwijl onderliggende eenheden (met name de Zechstein en het Carboon) door signaalattenuatie en lagere signaal-ruisverhouding intrinsiek minder scherp worden afgebeeld. Binnen deze beperkingen focust dit rapport op beschrijven van de hoofdstructuren en rapportage van de acquisitie. Meer complexe interpretatie van breukgeometrieën vereist aanvullende data of een bredere regionale studie.



Figuur 3 (boven) seismische lijn HVC24-04 en (onder) lijn SCAN41. NS: Noordzee Groep, Intra-Trias: informele horizon binnen Trias, SK: Nedersaksen Groep, ZE: Zechstein. ROSL: Formatie van Slochteren. Beide lijnen hebben hetzelfde amplitude kleurenspectrum.

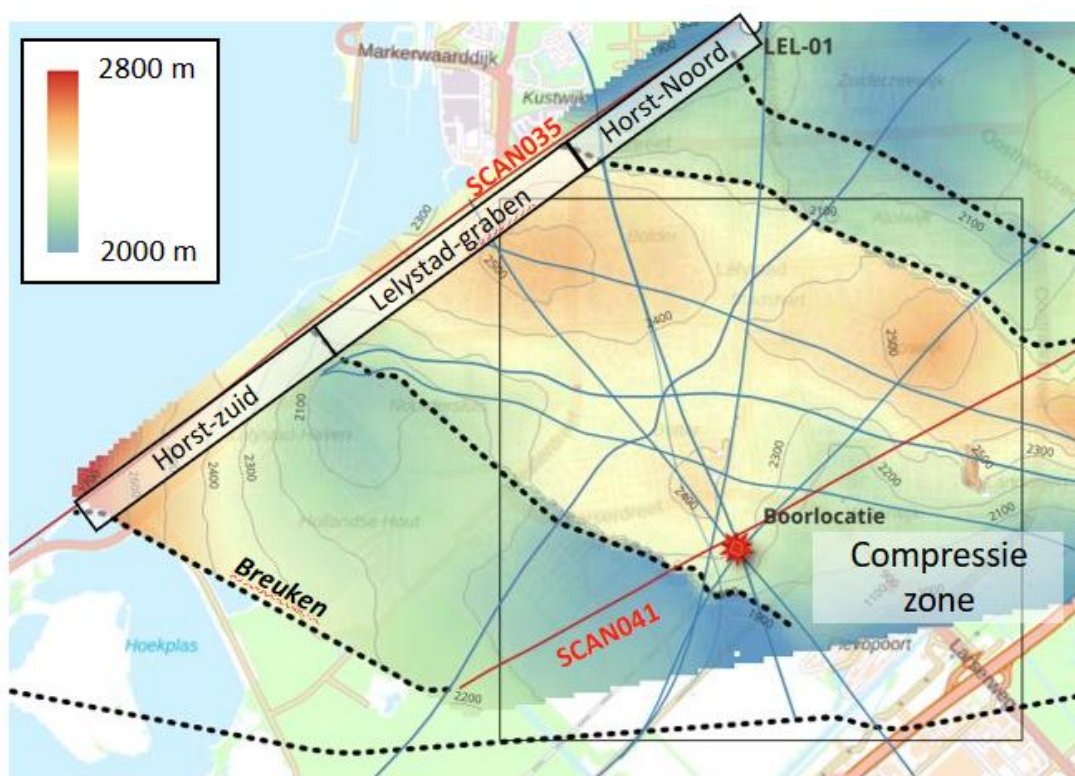


Figuur 4 Oostelijke sectie van HVC24-01 met compressiestructuren.

6.2 Top Rotliegend dieptekaart

De seismische acquisitie focust op een breukblok binnen een grabenstructuur onder het Lelystad zoekgebied. De diepte van de top van het Rotliegendreservoir binnen het graben varieert van circa 2350 meter tot 2500 meter (Figuur 5). De noordelijke en zuidelijke flanken worden gevormd door twee grote randbreuken met een verzet van 100 tot 400 meter en een noordwest-zuidoostelijke oriëntatie. Deze breuken convergeren ten zuidoosten van het AOI.

In het zuidoostelijke deel van het AOI zijn nog meer compressiestructuren te zien zoals in Figuur 4. Vanwege hun oriëntatie en omdat deze in de low-fold delen van de seismische data liggen zijn ze niet consistent te interpreteren en daarom ook niet weergegeven in Figuur 5. De contourlijnen van de dieptekaart reflecteren echter wel het karakter van deze opschuivingen.



Figuur 5 Dieptekaart Slochteren Formatie reservoir in het AOI in het 2022 model zonder o.b.v. WarmingUp GOO Seismic EN SCAN seismiek. De nieuwe breukstructuur is ook te zien als zwarte stippellijnen.

7 Conclusies

Deze seismische campagne richtte zich op de ondergrond van het zoekgebied Lelystad. Het doel was om binnen stedelijk gebied met een kostenefficiënte campagne toch de complexe structurele setting van het gebied in kaart te brengen en risico voor de geothermieontwikkeling te verkleinen. De resultaten zijn hieronder opgesomd:

- Er is een verbeterd inzicht verkregen van de structurele setting en dieptekaart, en een betere definitie van de randbreuken die het graben flankeren.
- De nieuwe dataset levert een helder seismisch beeld van de Noordzee-, Schieland-, Trias- en Zechstein-eenheden. De imaging-focus van de acquisitie ligt echter bij het Rotliegend, waardoor de basis van de Rotliegend-groep en dieper gelegen eenheden (m.n. Carboon) minder duidelijk tot expressie komen.
- De campagne blijkt een effectieve, kostenefficiënte survey, en is daarom een voorbeeld voor toekomstige 2D seismische data-acquisitie voor geothermieprojecten, met name in stedelijk gebied.

8 Dankwoord

De werkzaamheden voor dit rapport zijn uitgevoerd als onderdeel van het project WarmingUP Geothermie en Opslag Opschaling (Warming^{UP}GOO). Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie (MOOI), bij RVO bekend onder projectnummer MOOI322012. Warming^{UP}GOO geeft invulling aan MOOI-missie B Gebouwde Omgeving en levert een bijdrage aan innovatiethema Duurzame collectieve warmtevoorziening.

Referenties

Duin, E.J.T., J.C. Doornenbal, R.H.B. Rijkers, J.W. Verbeek, en Th.E. Wong. „Subsurface structure of the Netherlands – results of recent onshore and offshore mapping.” Netherlands Journal of Geosciences, nr. 84 (2006): 245-276.

Ligtenberg, Herald, Jos Okkerman, en Martin De Keijzer. „Fractures in the Dutch Rotliegend—An Overview.” In The Permian Rotliegend of the Netherlands. SEPM Society for Sedimentary Geology, 2011.

Panterra, SDE++ Geological Study Lelystad. Alkmaar, HVC-groep, 2022.

Panterra. EBN SCAN Rotliegend Legacy Core Study - SUMMARY REPORT. Utrecht: EBN BV, 2025.

van Oijk, K., A. Silvius, Y. Kremer, en Z.K. Shipton. „Fault seal behaviour in Permian Rotliegend reservoir sequences: case studies from the Dutch Southern North Sea.” Integrated Fault Seal Analysis (Geological Society), nr. Special Publications (2020): 9-38.

Veldkamp, J.G., M. van Unen, M. Vrijlandt, en J.D. van Wees. Aquifer characterization of a marginal part of the Slochteren Formation. TNO, 2022.