

TNO 2024 R11169 (versie 2) – 10 juli 2025

H3O-Diep Zuid-NL - Diepe Ondergrond Zuid-Nederland in meer detail, VERSIE 2

De ondergrond van de provincies Noord-Brabant en Zeeland
in meer detail

Auteurs	J.H. (Johan) ten Veen, M. (Maryke) den Dulk, S. (Susanne) Nelskamp, A.J.P. (Alexander) Houben, A.L. (Anuska) Kaliar, T.T. (Tessa) Witteman & R.J. (Rixt) Altenburg
Aantal pagina's	109
Aantal bijlagen	7
Opdrachtgever	Directeur GDN, co-financiers Provincies Noord-Brabant en Zeeland
Projectnaam	H3O-Diep Zuid-NL
Projectnummer	060.45044-060.55224

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2025 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Samenvatting	5
Resultaten	6
Belangrijkste conclusies	6
Summary	7
1 Inleiding	9
1.1 Achtergrond	9
1.2 Vraagstelling	10
1.3 Doelstelling	10
1.4 Modelgebied	12
1.4.1 Laterale afbakening	12
1.4.2 Afbakening in de diepte	13
1.4.3 Inhoudelijke afbakening	14
1.5 Werkwijze	14
1.6 Samenwerking met experts uit België en Duitsland	15
1.7 Projectorganisatie	16
1.8 Leeswijzer	16
2 Datavoorbereiding	18
2.1 Boringen	18
2.2 Boorgatmetingen	21
2.3 Seismische data	21
3 Stratigrafische indeling	23
3.1 Stratigrafische aspecten	23
3.2 Lithostratigrafische inzichten	27
3.2.1 Onder Carboon – Carboniferous Limestone Groep	27
3.2.2 Namurien – Westphalien – Limburg Groep	28
3.2.3 Perm – Rotliegend en Zechstein groepen	30
3.2.4 Trias	32
3.2.5 Onder-Midden Jura – Altena Groep	34
3.2.6 Boven Jura – Onder Krijt – Schieland en Rijnland Groepen	36
3.2.7 Boven Krijt – Krijtkalk (Chalk) Groep	39
3.2.8 Kenozoïcum – Noordzee Groep	41
3.3 Seismic-to-well tie	42
3.3.1 Tijd-diepte relatie	42
3.3.2 Synthetische seismische data	43
3.3.3 Resultaten	45
3.4 De profielen	51
4 Seismische interpretatie	52
4.1 Aanpak	52
4.2 Paleozoïcum	53
4.2.1 Dinantien (Formatie van Zeeland – CLZL)	54
4.2.2 Namurien (Formatie van Epen – DCGE)	56
4.2.3 Westfalien – Caumer en Dinkel subgroepen (DCC, DCD)	58

4.3	Mesozoïcum	61
4.3.1	Germaanse Trias groepen (RB en RN)	61
4.3.2	Basis Altena Groep (AT)	62
4.3.3	Top Posidonia Schalie Formatie (ATPO)	63
4.3.4	Basis Formatie van Werkendam (ATWD)	63
4.3.5	Basis Formatie van Brabant (ATBR)	64
4.3.6	Basis Schieland Groep (SL)	64
4.3.7	Basis Rijnland Groep (KN)	65
4.3.8	Basis Krijtkalk Groep (CK)	65
4.4	Kenozoïcum	67
4.4.1	Basis Laagpakket van Liessel van de Formatie van Landen	68
4.4.2	Basis Laagpakket van Ieper van Formatie van Dongen	69
4.4.3	Basis nabij Laagpakket van Brussel van de Formatie van Dongen	69
4.4.4	Basis Laagpakket van Asse van de Formatie van Dongen	70
4.4.5	Basis Formatie van Tongeren	71
4.4.6	Basis nabij Laagpakket van Berg van de Formatie van Rupel	71
4.4.7	Basis nabij Laagpakket van Boom van de Formatie van Rupel	72
4.4.8	Basis Breda Subgroep	72
4.5	(Her)interpretatie breuken	73
5	Modellering	74
5.1	Modellering breukvlakken	74
5.2	Modellering grensvlakken	75
5.3	Tijd-diepteconversie	76
5.4	Modellering in diepte	78
5.5	Modellering geologische en hydrogeologische eenheden	79
5.6	Beschrijving van de modeleenheden	93
5.7	Resultaten breukvlakken en grensvlakken	100
6	Conclusies en aanbevelingen	104
7	Literatuurlijst	106
8	Ondertekening	108
9	Bijlagen	109

Samenvatting

Voor u ligt het rapport van het project H3O-Diep Zuid-NL, welke door TNO-GDN is uitgevoerd. Het project H3O-Diep Zuid-Nederland is een overkoepelend project dat twee projecten combineert: de projecten H3O-Diep Noord-Brabant en H3O-Diep Zeeland, mede mogelijk gemaakt door respectievelijk de provincie Noord-Brabant en de provincie Zeeland. Het project is ontstaan uit de behoefte om de ondergrond van Zuid-Nederland in meer detail te karteren ten behoeve van de energietransitie en toekomstige ondergrondse vraagstukken. Met deze gemeenschappelijke doelstelling en nieuwe (seismische) data die de laatste jaren beschikbaar zijn gekomen heeft TNO-GDN een nieuw hydrogeologisch ondergrondmodel van beide provincies gemaakt. Dit model bevat alle belangrijke waterdoorlatende en niet-waterdoorlatende gesteentelagen en een grote hoeveelheid breuken. Dit is een verbetering ten opzichte van het model DGM-diep v5.0, dat minder gedetailleerd is betreffende het aantal lagen en breuken en minder goed toepasbaar voor vraagstukken omtrent het duurzaam gebruik van de ondergrond.

Het modelgebied omvat de twee provincies en een deel van Midden-Limburg, maar per provincie is de exacte invulling van het model anders. Zo bevat het deelproject van de Provincie Zeeland alle gesteentelagen van ongeveer 5 -360 miljoen jaar oud met een totale dikte van ongeveer 6 km. Voor de Provincie Noord-Brabant is de bovenste kilometer van de ondergrond, met lagen tot ongeveer 65 miljoen jaar oud, reeds in het kader van eerdere H3O-projecten in kaart gebracht; dit deelproject bevat daarom alleen lagen die ouder zijn en die reiken tot een diepte van ongeveer 7,5 km.

Werkwijze

De werkzaamheden zijn verdeeld in vijf werkpakketten (WP), elk leidend tot een tussenresultaat dat tijdens bijeenkomsten is gepresenteerd aan de begeleidingscommissie. Na evaluatie zijn deze tussenresultaten gepresenteerd aan de stuurgroep. De vijf werkpakketten zijn in de tijd opeenvolgend uitgevoerd, maar kenden ook de nodige iteraties en afhankelijkheden:

WP 1: het verzamelen en beoordelen van seismische gegevens en boordata;

WP2: het maken van geïnterpreteerde seismische doorsteken (profielen) van het modelgebied die dienen als conceptuele onderbouwing van de uitgevoerde interpretaties en modellering in de volgende werkpakketten. Hiertoe is eerst bepaald hoe de ondergrondse gesteentelagen - zoals die in boringen aangetroffen zijn - er in de seismische data uit zien (de zogenaamde “seismic-to-well tie”);

WP3: interpretatie van alle seismische gegevens in het modelgebied;

WP4: modellering van de seismische interpretatie tot kaarten (grids) van de diverse gesteentelagen. Het proces houdt rekening met de aanwezige breukvlakken in de ondergrond en zorgt dat de diepte en dikte van lagen exact aansluit bij de gegevens uit boringen. Dat laatste is belangrijk omdat boringen de enige directe waarneming geven;

WP5: Vrijgave van het model door de Chief Geologist TNO-GDN, rapportage, het openbaar beschikbaar maken van alle resultaten en eindpresentatie.

Resultaten

Het gemaakte model is een lagenmodel bestaande uit 21 lagen. Voor al deze lagen van het model zijn kaarten gemaakt van de diepte van de basis en van de dikte. Deze kaarten zijn in pdf-formaat beschikbaar. Ook is een breukenmodel gemaakt dat gebruikt wordt voor de modellering van de lagen, om op die manier de verplaatsing van deze lagen langs breuken mee te nemen. Daarnaast is een ARCGIS Pro project beschikbaar dat informatie bevat over alle gebruikte seismische- en boordata, de seismische interpretatiepunten en de resulterende kaarten. Het project bevat tevens alle in dit rapport getoonde topografische informatie. Vijf geïnterpreteerde seismische doorsteken van het modelgebied dienen als conceptuele onderbouwing van de uitgevoerde interpretaties en modellering.

Belangrijkste conclusies

Met het maken van het H30-Diep Zuid-NL model zijn belangrijke stappen gezet in de modellering van de ondergrond van zuidelijk Nederland. Het model herinterpreteert oude bevindingen en roept nieuwe vragen op die om verder onderzoek vragen:

- Zo is voor het eerst het Paleozoïcum (het Carboon) in het Kempen Blok in kaart gebracht met behulp van sterk verbeterde seismische data;
- De Krijtkalk Groep op het Kempen Blok wordt meest waarschijnlijk vertegenwoordigt door de zandige Formatie van Gulpen in tegenstelling tot de Formatie van Omme-landen zoals eerder gedacht werd. Dit vergt nader onderzoek;
- De veronderstelling dat zowel Perm en Trias gesteenten in boring RSB-01 aanwezig zijn, is onjuist gebleken; dit heeft geleid tot een aanzienlijke wijziging in de verbreiding van deze eenheden ten opzichte van eerdere modellen;
- Het H30-Diep Zuid-NL model biedt een regionaal inzicht in de ondergrondse gesteente-eenheden en breuken. Er zijn echter grenzen aan het detail dat de huidige modelleringstechnieken kunnen produceren. Kleinere gebiedsstudies kunnen meer detail bieden mits aanvullende data voor die gebieden beschikbaar komt;
- De breukkartering levert een actuele weergave van het breukenverloop, nuttig voor risicoanalyses en verdere studies naar de geschiedenis van breuken in het gebied.

Summary

The H3O-Diep Zuid Nederland project, carried out by TNO-Geological Survey of the Netherlands (TNO-GDN), is an overarching project that combines two projects: the projects H3O-Diep Noord-Brabant and H3O-Diep Zeeland, made possible respectively by the province of Noord Brabant and the province of Zeeland. The project was initiated to map the subsurface of the southern Netherlands in greater detail. This effort supports the energy transition and addresses future subsurface challenges. With this shared objective and the availability of new seismic data in recent years, TNO-GDN has developed a new hydrogeological subsurface model for both provinces. This model includes all major permeable and impermeable rock layers and a large number of faults, representing an improvement over the less detailed DGM-deep v5.0 model, which is less suitable for sustainable subsurface use.

The model area includes the two provinces and part of Central Limburg; however, the subsurface interval considered differs per province. The Zeeland subproject includes all rock layers aged approximately 5 to 360 million years, with a total thickness of about 6 km. For Noord Brabant, the upper kilometer of the subsurface (up to about 65 million years old) was already mapped in earlier H3O projects; this subproject therefore only includes older layers, reaching depths of about 7.5 km.

Methodology

The work was divided into five work packages (WPs), each resulting in interim products that were presented to the steering committee. After evaluation, these results were shared with the project board. The five work packages were executed sequentially but involved iterations and interdependencies:

WP1: Inventory and collection of seismic and borehole data.

WP2: Construction of interpreted seismic cross-sections through the model area, serving as a conceptual basis for interpretations and modeling in subsequent WP's. This also included an assessment of how subsurface rock layers observed in boreholes appear in seismic data ("seismic-to-well tie").

WP3: Interpretation of all seismic data in the model area.

WP4: Modeling of seismic interpretations into maps (grids) of various rock layers, accounting for fault planes and ensuring depths and thicknesses align with borehole data. The latter acted as tie points as they are the only direct observations.

WP5: Model release by TNO-GDN's Chief Geologist, reporting, public dissemination of all results, and final presentation.

Results

The resulting model consists of 21 layers. For each layer, maps of base depth and thickness were created and are available in PDF format. A fault model was also developed to account for layer displacement along faults. Additionally, an ArcGIS Pro project was disseminated, containing all seismic and borehole data, interpretation points, and resulting maps, along with all topographic information shown in the report. Five interpreted seismic cross-sections of the model area serve as conceptual support for the interpretations and modeling.

Key Conclusions

The H3O- Diep Zuid Nederland model marks significant progress in modeling the subsurface of the southern Netherlands. It adjusts old findings and raises new questions for further research:

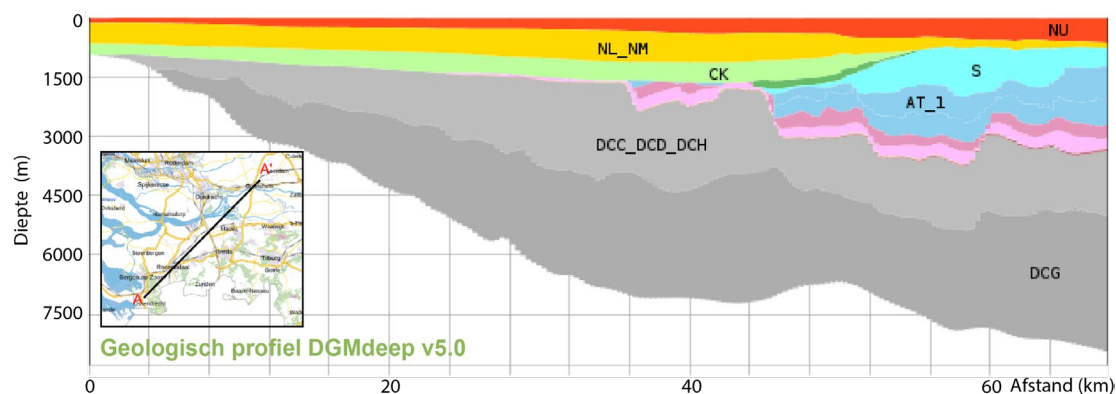
- For the first time, the Paleozoic (Carboniferous) in the Kempen Block in the Netherlands has been mapped using significantly improved seismic data.
- The Chalk Group in the Kempen Block is most likely represented by the sandy Gulpen Formation, rather than the previously assumed Ommelanden Formation—this requires further investigation.
- The assumption that both Permian and Triassic rocks are present in borehole RSB-01 proved incorrect, leading to a major revision of the distribution of these units compared to earlier models.
- The model provides regional insight into subsurface rock units and faults, though current modeling techniques have limitations in detail. Studies in smaller areas could offer more detail if additional data becomes available.
- The fault mapping provides an up-to-date view of fault structures, useful for risk analyses and further studies on fault history in the region.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Sinds 2012 zijn door TNO-Geologische Dienst Nederland (TNO-GDN) projecten uitgevoerd gericht op vervaardiging van geologische en hydrogeologische modellen tot een diepte van maximaal 1800 m onder het maaiveld (het Kenozoïcum). Deze modellen staan bekend onder de naam H3O en bevatten informatie over de belangrijkste watervoerende (aquifers) en scheidende lagen (aquitards) in Noord-Brabant en een deel van Limburg. De modellen bedekken ook de grensstreken van België en Duitsland. Zowel de Provincie Noord-Brabant als de Provincie Limburg hebben in deze H3O-projecten geparticipeerd en er werd nauw samengewerkt met partners in België en Duitsland.

De H3O modellen bundelen (hydro)geologische kennis en informatie ten behoeve van het duurzaam beheer en gebruik van de ondergrond - en grondwater in het bijzonder. De resultaten van deze projecten vormen regionale verbeteringen van de (zuidelijke delen van de) landelijke modellen DGM v2.2, REGIS II v2.2 en (het ondiepere deel van) DGMdiep v5.0 van TNO-GDN. De resultaten van de H3O modelleringen worden dan ook in nieuwe versies van deze landelijke modellen verwerkt.



Figuur 1.1 Geologische doorsnede (profiel) door het DGMdiep v5.0 model door het H3O-Diep Zuid-NL modelgebied (zie inzetkaartje voor locatie).

Het geologisch model DGMdiep (v5.0) reikt in Zuid-Nederland tot maximaal circa ~7,5 km diepte en is gebaseerd op interpretaties van seismische data en boorgegevens (putten). Het model bestaat uit landelijke grids met dieptes en diktes van de belangrijkste gesteentelagen uit het Paleo-, Meso- en Kenozoïcum. Nadere onderverdeling ontbreekt nog. Zo bevat het model informatie over bijvoorbeeld de diepte en dikte van de gehele Krijt-kalk Groep (CK), maar niet over individuele aquifers en aquitards binnen dit interval (zie Figuur 1.1). Informatie over de exacte verbreiding, diepte en dikte van hydrogeologische eenheden is echter wel essentieel om - ook op grote diepte - een juiste inschatting van ondergronds potentieel van aardwarmte en energieopslag (waaronder warmteopslag - MTO/HTO) te kunnen maken.

1.2 Vraagstelling

Recentelijk heeft de WARM¹-studie voor alle Regionale Energiestrategie gebieden (RES-gebieden) de potentie van aardwarmte als kostenefficiënte warmtebron in kaart gebracht (Berenschot, 2020). Deze studie geeft decentrale overheden meer inzicht in de mogelijkheden van het benutten van aardwarmte in hun regio. Voor alle RES-gebieden zijn ook kennislacunes benoemd en aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek. In de gebieden Roerdaalslenk, West-Brabant en Zeeland gaat het om onzekerheden over aanwezigheid, diepte, dikte en eigenschappen van aquifers in alle dieptebereiken, met name die onder de 1800 m.

Modellering van dit dieptebereik is van oudsher uitdagend geweest vanwege het geringe aantal zeer diepe boringen (en boorgatmetingen) en de overwegend matige kwaliteit van - tot dusver - beschikbare seismische data. De recente acquisitie van nieuwe seismiek en de herbewerking van bestaande seismiek in het kader van het SCAN-aardwarmte project leveren echter sterk verbeterde informatie op cruciale plekken in Zuid- en Midden-Nederland op. Het verzamelen van deze seismische data, en het uitvoeren van nieuwe diepe onderzoeksborings hebben als doel de kennislacunes te verkleinen. De nieuwe data wordt in dit project geïntegreerd met bestaande ondergrondmodellen en -inzichten.

Het beschikbaar komen van de nieuwe SCAN data - en de bevindingen van het WARM-rapport - hebben bij de Provincie Noord-Brabant geleid tot de wens dat er meer gedetailleerde modellen van de diepe ondergrond (dieper dan de reeds afgeronde H3O projecten) publiek beschikbaar komen. In een latere fase toonde ook de Provincie Zeeland een zelfde interesse. Deze gezamenlijke behoefte komt voort uit de energietransitie en andere (toekomstige) ondergrondse vraagstukken en sluit aan bij de reeds door TNO-GDN noodzakelijk geachte detaillering van het landelijke model DGM-diep tot op het niveau van aquifers en aquitards.

1.3 Doelstelling

De gemeenschappelijke behoefte is door TNO-GDN als leidraad gebruikt voor het uitwerken van een projectplan met als beoogd resultaat een hydrogeologisch ondergrondmodel van de diepe ondergrond van een groot deel van Zuid-Nederland. In dit model, genaamd H3O-Diep Zuid-NL, zijn de belangrijkste aquifers, aquitards en breuksystemen opgenomen middels interpretaties van bestaande en de nieuw beschikbare (SCAN) data. De methodiek is vergelijkbaar met de eerder gemaakte H3O modellen, maar dan gericht op het deel onder het Kenozoïcum. Feitelijk worden de bestaande H3O modellen op uniforme werkwijze in de diepte uitgebreid en daarmee het DGMdiep model in Zuid-Nederland verbeterd, dan wel vervangen.

Specifiek gaat het onder andere om de volgende eenheden en activiteiten:

1. Het toevoegen van al bestaande modelgegevens van paleozoïsche lagen (Limburg en Kolenkalk Groep). De Dinantien kalkstenen (Vroeg-Carboon, Formatie van Zeeland) van de Kolenkalk Groep vormen de diepst gelegen aquifer. Deze komt weliswaar in heel Zuid-Nederland voor op een diepte die gunstig is voor geothermie (en

¹ WARM is door Berenschot, Panterra Geoconsultants en TNO uitgevoerd in opdracht van EBN en haar Masterplanpartners DAGO, Stichting Platform Geothermie en Stichting Warmtenetwerk.

ultradiepe geothermie - UDG), maar was tot dusver moeilijk seismisch te karteren (Ten Veen et.al., 2019). Bovendien zijn de hydraulische eigenschappen van de aquifers moeilijk te bepalen. De SCAN data is gebruikt voor een update van de diepte, dikte en breukwerking;

2. Aandacht voor de Trias aquifers zoals de Nederweert-, Hoofd Bunter- en Rötzandstenen, waarvan de verbreiding slechts op basis van boringen was bepaald;
3. De Formatie van Brabant uit het Midden-Jura die sedimentpakketten bezit die mogelijk gunstige aquifer eigenschappen hebben, maar die nog niet eerder seismisch waren gekarteerd;
4. Aquifers uit het Boven-Jura- en Onder-Krijt, behorende tot respectievelijk de Formatie van Nieuwerkerk en de Vlielandzandsteen Formatie, die een zeer complexe verbreiding kennen welke tot dusver alleen op basis van boringen was bepaald. Hierbij lag de nadruk vaak op het West-Nederlands Bekken, waar al meerdere lopende geothermieprojecten zich op deze zandstenen richtten. Ook hiervoor ontbrak echter een gedegen seismische interpretatie over geheel Zuid-Nederland;
5. De Krijtkalk Groep die meerdere zandige aquifers bevat welke aan weerszijden van de Roerdalslenk in een beperkt aantal boringen zijn aangetroffen. De exacte verbreiding was onbekend. Daarnaast kan de zogenaamde krijtkalkfacies niveaus met goede (secundaire) aquifereigenschappen hebben. Een meer gedetailleerde seismische interpretatie geeft verbeterd inzicht in de verbreiding van deze niveaus;
6. Meerdere aquifers in het Kenozoïcum hebben een grote potentie voor lage temperatuur geothermie (LTG) en WKO. Deze aquifers zijn vaak al in het kader van H3O-projecten gekarteerd, maar buiten deze gebieden is er zeer beperkte kennis over verbreiding van specifieke aquifers (m.u.v. het Zand van Brussel Laagpakket dat recent in het WarmingUP-project is onderzocht). Voor de provincie Zeeland is daarom ook het Paleogeen (basis Kenozoïcum tot aan basis Breda Subgroep) gekarteerd;
7. Verbetering van de breukmodellen om meer inzicht te krijgen in lokale discontinuïteiten in de verbreiding, diepte en dikte van de aquifers;
8. In de afgelopen 10 jaar is middels de diverse H3O-projecten veel kennis opgedaan over de gehele geologische architectuur van Zuid-Nederland. Door uitbreiding van de H3O methodiek tot 7500 m diepte vormt dit project een logische afsluiting van alle inspanningen van de afgelopen jaren.

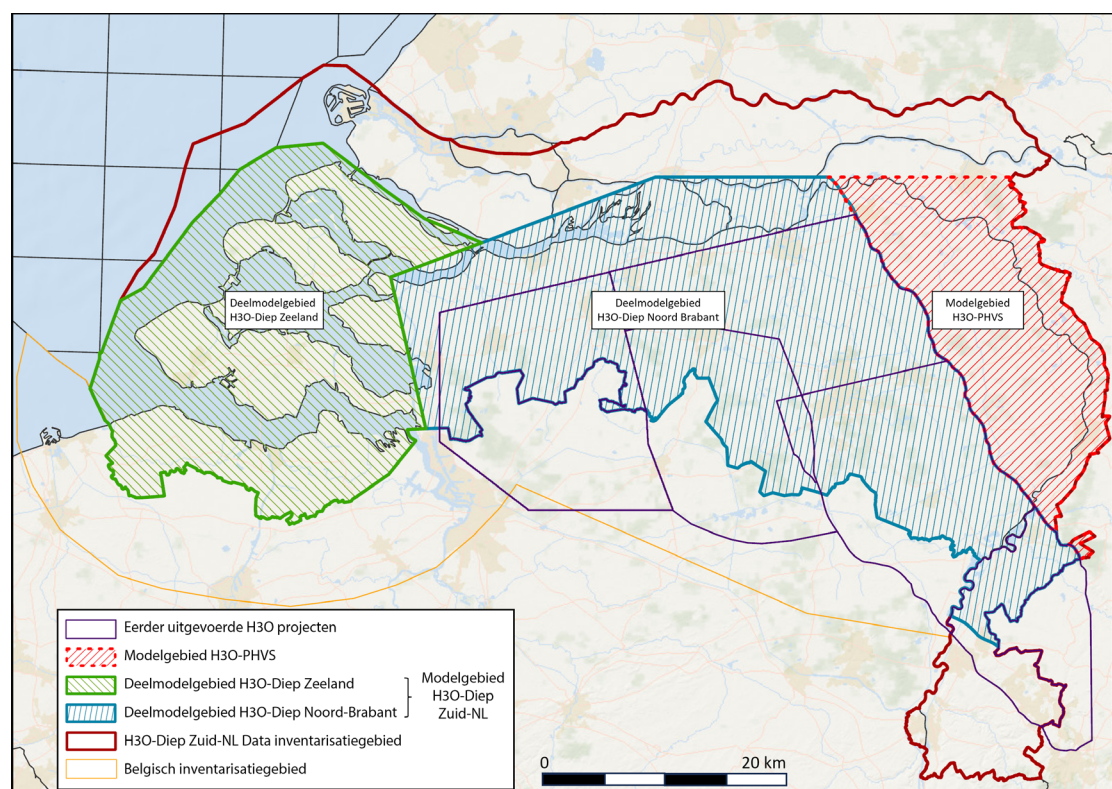
1.4 Modelgebied

1.4.1 Laterale afbakening

Het H3O-Diep Zuid-NL modelgebied beslaat de hele provincie Noord-Brabant, aangevuld met het Limburgse deel van de Roerdalslenk in Midden-Limburg plus de provincie Zeeland (zie **Figuur 1.2**). De exacte omlijning van het modelgebied valt zoveel mogelijk samen met geologisch significante structuren (vooral breuken) en de lands- en provinciegrenzen.

Vanwege administratieve redenen en de verschillen in dieptebereik is het modelgebied H3O-Diep Zuid-NL opgedeeld in twee delen: de deelmodelgebieden H3O-Diep Noord-Brabant en H3O-Diep Zeeland. Het deelmodelgebied H3O-Diep Noord-Brabant omvat ook het deel van Midden-Limburg. Het modelgebied van het H3O-Peelhorst en Venloslenk project – dat in 2025 wordt afgerond – valt buiten het modelgebied.

Eind 2019 is door TNO-GDN het karterproject GeoZuid gestart dat zich richt op de mesozoïsche en paleozoïsche afzettingen in Zuid-Limburg. Dit project heeft een looptijd tot eind 2025. Met inachtneming van deze looptijd en verschillende (wetenschappelijke) vraagstellingen is besloten dit gebied buiten het H3O-Diep Zuid-NL model te laten.



Figuur 1.2 Kaart met de ligging van het H3O-Diep Zuid-NL modelgebied, de deelmodelgebieden H3O-Diep Zeeland en H3O-Diep Noord-Brabant en het inventarisatiegebied. Het modelgebied van het project H3O-Peelhorst & Venloslenk (PHVS) is ter referentie aangegeven evenals eerder uitgevoerde H3O projecten.

Om het modelgebied ligt een inventarisatiegebied. Dit is een ruimer gebied waarbinnen aanvullend datainventarisatie en -interpretaties hebben plaatsgevonden (Figuur 1.2). Het

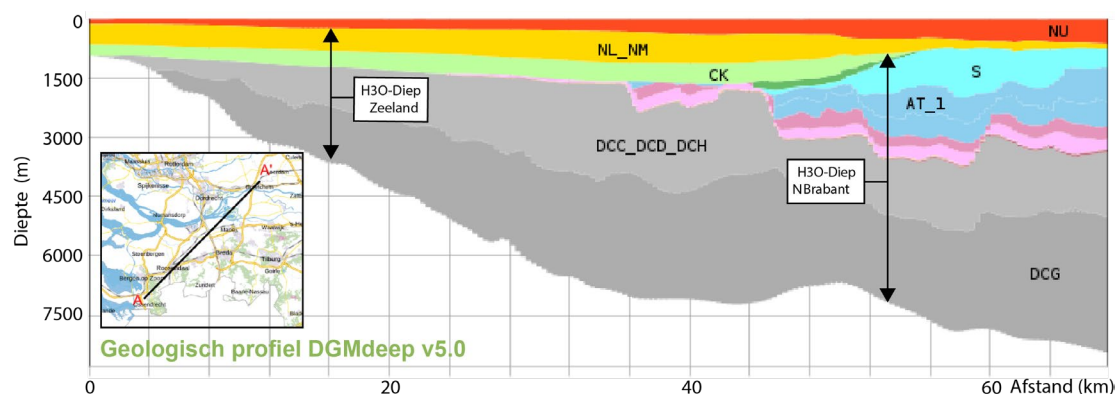
inventarisatiegebied wordt meegenomen in de modellering en naderhand afgesneden (“geclipt”) tot het daadwerkelijke modelgebied. Dit wordt gedaan om ongewenste randeffecten langs de modelgrenzen te voorkomen en om aansluiting van toekomstige modellen te vergemakkelijken. De breedte van het inventarisatiegebied is afhankelijk van de dichtheid van beschikbare gegevens, tijdens de datavoorbereidingsfase vastgesteld en in september 2024 in overleg met de Provincies Zeeland en Noord-Brabant nog aangepast. Om randeffecten langs de landsgrenzen te voorkomen zijn ook Belgische en Duitse gegevens opgevraagd en meegenomen in de modellering.

1.4.2 Afbakening in de diepte

Deelmodelgebied H3O-Diep Noord-Brabant

De activiteiten in dit deelmodelgebied betreffen de (her)interpretatie en modellering van de (hydro)geologische eenheden binnen het Mesozoïcum en het daaronder gelegen Perm. Door de grote diepteligging van het Paleozoïcum in de Roerdalslenk is dit interval slecht zichtbaar op de gebruikte seismische lijnen. Binnen het Kempen Blok ten zuiden van de Roerdalslenk kan het Paleozoïcum wel seismisch geïnterpreteerd en gemodelleerd worden. De eenheden binnen het Kenozoïcum zijn eerder gemodelleerd in het kader van de H3O projecten Roerdalslenk, De Kempen, Roer Valley Graben South-East (H3O-ROSE), Roerdalslenk Noordwest, De Voorkempen en het in 2025 af te ronden H3O project Peelhorst & Venloslenk. Harmonisatie en integratie van deze modelresultaten zullen aansluitend op de afronding van het project H3O-Peelhorst & Venloslenk plaatsvinden.

Opgemerkt dient te worden dat een zone langs de noordzijde van de provincie Noord-Brabant nog niet in het kader van een H3O-project is gemodelleerd. Van dit gebied zijn daardoor nog geen gedetailleerde (her)interpretaties en modellen van het Kenozoïcum beschikbaar, noch van het Paleogeen dat in dit gebied geen deel uitmaakt van de landelijke referentiemodellen DGM en REGIS II.



Figuur 1.3 Geologische doorsnede (profiel) door het DGMdiep v5.0 model op de grens van de deelmodelgebieden H3O-Diep Zeeland en H3O-Diep Noord-Brabant (zie inzetkaartje voor locatie). Dit profiel is identiek aan Figuur 1.1, maar toont hier ook het dieptebereik van beide deelmodelgebieden.

Deelmodelgebied H3O-Diep Zeeland

In dit deelmodelgebied is gewerkt aan de (her)interpretatie van de (hydro)geologische eenheden binnen het Paleogeen, Mesozoïcum en het Paleozoïcum. Gedetailleerde

interpretaties van de neogene en kwartaire afzettingen zijn deels al in het kader het TNO-GDN model DGMplus uitgevoerd (waaruit het GeoTOP model Zeeland en Goeree-Overflakkee worden geëxtraheerd). Ondanks dat door nieuwe inzichten in de opbouw van het Neogeen een herinterpretatie en modellering van de neogene aquifers en aquitards (behorende tot de Breda Subgroep en de Formatie van Oosterhout) wenselijk is, valt dit buiten de hier beschreven projectactiviteiten.

Een deel van de paleogene (hydro)geologische eenheden was nog niet eerder gekarteerd en op grond van (nieuwe) seismische gegevens en inzichten ge(her)interpreteerd. De (her)interpretatie en modellering van deze eenheden zijn gecombineerd met de modellering van de eenheden uit het Mesozoïcum en Paleozoïcum.

1.4.3 Inhoudelijke afbakening

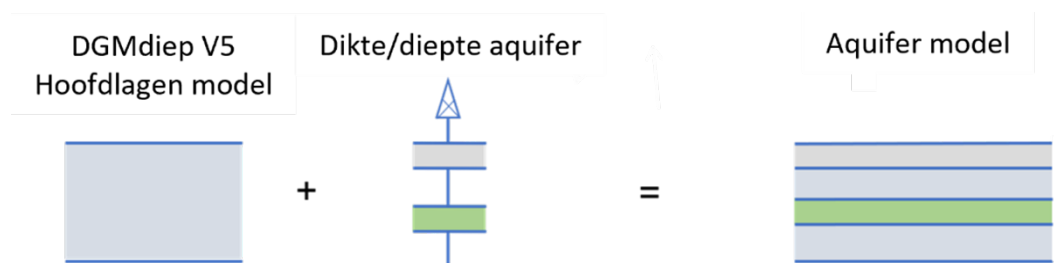
Het Mesozoïcum is opnieuw geïnterpreteerd binnen het gehele modelgebied. Betreffende het Paleozoïcum zijn de bestaande ondergrondmodellen aangepast met behulp van de SCAN data.

De (her)interpretatie en modellering van de (hydro)geologische eenheden binnen het Mesozoïcum en Paleozoïcum in het oostelijke deel van de provincie Noord-Brabant en het noordelijke deel van de provincie Limburg zijn onderdeel van het nog lopende project H3O-Peelhorst & Venloslenk. De resultaten daarvan zullen in het kader van het voorliggende project later worden geïntegreerd tot een dataset die de hele provincie Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg omvat.

1.5 Werkwijze

Voor het project zijn inzichten, opgedaan bij het maken van eerdere ondergrondmodellen, als uitgangspunt gebruikt. De modellen hebben uiteenlopende werkwijzen en detailniveaus:

DGM model:	gebaseerd op boorinterpretaties, detaillering tot op laagpakketniveau
REGIS II model:	gebaseerd op boorinterpretaties, detaillering tot op aquifer/aquitard niveau
H3O projecten:	gebaseerd op boorinterpretaties en seismische interpretaties, detaillering tot op aquifer/aquitard niveau
DGMdiep V5.0:	gebaseerd op seismische interpretaties & boorinterpretaties, tot op hoofdlagen niveau (geen aquifers)
ThermoGIS:	afgeleid aquifermodel op basis van boringen + DGM-diep (Figuur 1.4)



Figuur 1.4 Illustratie van de werkwijze van de ThermoGIS modellering.

In het hier gerapporteerde H3O-Diep Zuid-NL project zijn resultaten van seismische interpretaties en lithostratigrafische boorinterpretaties gecombineerd om zowel

hoofdeenheden (formaties) en - waar mogelijk - laagpakketten op aquifer niveau te modelleren. Het verschil met ThermoGIS is dat in het onderhavige project de aquifers zoveel mogelijk seismisch gekarteerd zijn. De dikke modellering aan de hand van putgegevens is alleen toegepast als een eenheid te dun is om met vertrouwen te kunnen herkennen in de seismische data. Hoofdstuk 3 geeft een gedetailleerd overzicht van de bestudeerde (hoofd)lagen in dit project.

Het project is uitgevoerd door de werkzaamheden te groeperen in werkpakketten (WP):

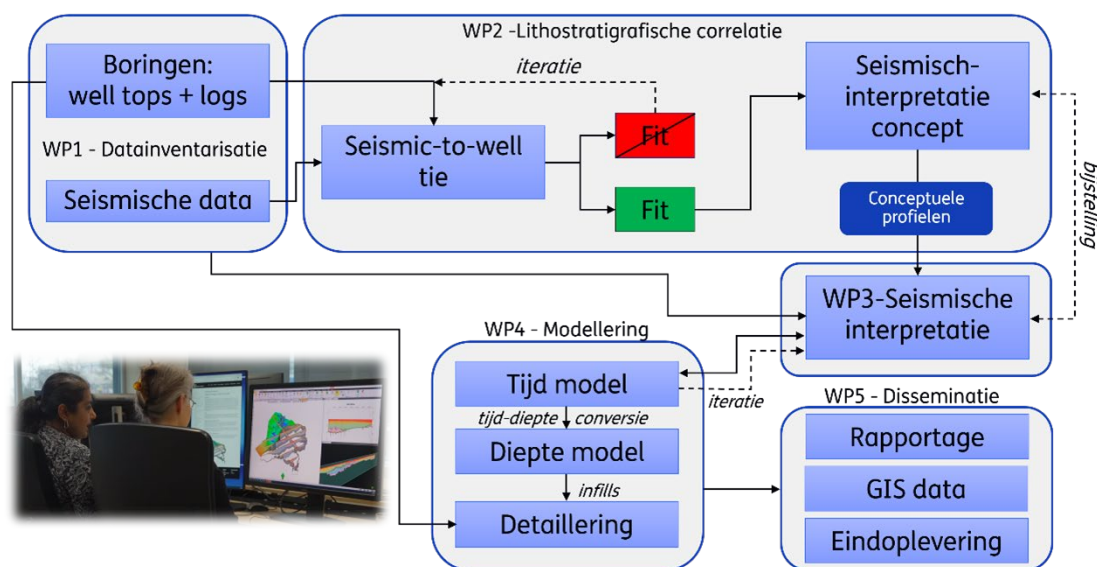
WP1 – Datavoorbereiding

WP2 – Lithostratigrafische correlatieprofielen

WP3 – Seismische interpretaties (incl. boorinterpretaties)

WP4 – Modellering

WP5 – Rapportage en disseminatie



Figuur 1.5 Schematisch overzicht van de werkpakketten (WP) en de daaronder vallende werkzaamheden plus de iteraties tussen de werkpakketten.

De werkzaamheden van de vijf werkpakketten hebben tussen- en eindproducten opgeleverd die tijdens zogenaamde milestone meetings aan de begeleidingscommissie ter beoordeling zijn voorgelegd. Na eventuele bijstelling zijn de tussen- en eindproducten door de stuurgroep goed bevonden. Tussen de werkpakketten was sprake van iteratieve activiteiten (Figuur 1.5), welke nader worden geduid in de volgende hoofdstukken. Het eindresultaat is een nieuw model van de diepe ondergrond van Zuid-NL (van circa 1,5 tot 7,5 km diepte), waarin alle karteerbare aquifers, aquitards en breuken zijn opgenomen.

Opname van de nieuwe modelresultaten in het landelijke model DGMdiep v5.0 en publicatie (via www.dinoloket.nl) vallen buiten de hier gerapporteerde werkzaamheden.

1.6 Samenwerking met experts uit België en Duitsland

In tegenstelling tot voorgaande en lopende H3O-projecten, die meestal in nauwe samenwerking met organisaties uit België (Vlaanderen) of Duitsland zijn uitgevoerd, is de (her)interpretatie van de buitenlandse gegevens voornamelijk door TNO-GDN gedaan. Reden

hiervoor is dat planning en prioriteiten bij geologische diensten in de buurlanden niet aansloot bij de gewenste planning van dit project. Overleg met buitenlandse experts heeft zich beperkt tot bespreking van de correlaties en de conceptinterpretaties in de grensstreken. De buitenlandse experts maakten wel deel uit van de begeleidingscommissie (zie volgende paragraaf).

1.7 Projectorganisatie

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door een projectteam bestaande uit gespecialiseerde medewerkers van TNO-GDN. Voor begeleiding en inhoudelijke advisering van tussen- en eindresultaten zijn bij aanvang van het project een stuurgroep en een begeleidingscommissie samengesteld, waarmee regelmatig tussen- en eindresultaten zijn besproken tijdens zogenoemde milestonemeetings. De stuurgroep bestond uit de volgende vertegenwoordigers:

Erik Heskes (Provincie Noord-Brabant, als co-financier)
Archana Sadhoeram (Provincie Zeeland, als co-financier)
Michiel van der Meulen (TNO-GDN, als gedelegeerd opdrachtgever)
Eric Castenmiller (Provincie Limburg)
Denise Maljers (TNO-GDN)
Ronald Vernes (TNO-GDN)
Johan ten Veen (TNO-GDN)
Tessa Witteman (TNO-GDN)

De begeleidingscommissie functioneerde als inhoudelijk klankbord met de volgende leden:

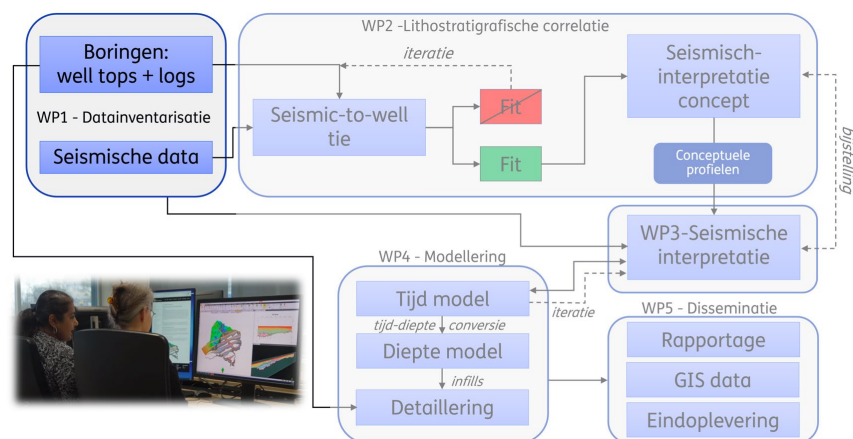
Marten Ter Borgh (EBN)
Henk van Lochem (EBN)
Michiel Duser (BGD)
Kris Piessens (BGD)
Bernd Linder (GD-NRW)
Martin Salamon (GD-NRW)
Ronnie Hollebrandse (Provincie Zeeland)
Kees Geel (TNO-GDN)
Hans Veldkamp (TNO-GDN)
Jan Diederik van Wees (TNO-GDN)

1.8 Leeswijzer

De volgende hoofdstukken schetsen de werkzaamheden en resultaten van de verschillende werkpakketten van het project. In hoofdstuk 2 wordt de datavoorbereiding besproken. Hoofdstuk 3 behandelt de stratigrafische indeling van de gemodelleerde eenheden. In hoofdstuk 4 wordt gedetailleerde uitleg over de seismische interpretaties gegeven. Hoofdstuk 5 bespreekt de uiteindelijke modelresultaten. Hoofdstuk 6 sluit af met conclusies en enkele aanbevelingen.

De aard van de werkzaamheden was iteratief, waardoor verwijzingen tussen de hoofdstukken voorkomen. Geconstateerde onvolkomenheden uit een voorgaande activiteit moesten eerst worden opgelost voordat de uitvoering van de daaropvolgende hoofdactiviteit kon worden voortgezet.

2 Datavoorbereiding



Binnen het werkpakket WP1 - Datavoorbereiding zijn relevante basisgegevens geïnventariseerd, geselecteerd, gecontroleerd en bewerkt ten behoeve van de vervolgvactiteiten. De basisgegevens betreffen boringen, boorgatmetingen en seismische data. Er zijn geen veldwerkzaamheden uitgevoerd om aanvullende gegevens te verzamelen in gebieden met beperkte data.

2.1 Boringen

Boorgegevens zijn verzameld binnen het gehele inventarisatiegebied. Het betreft alleen boringen die vooraf reeds door TNO-GDN waren voorzien van lithostratigrafische interpretaties. Eventuele onjuiste interpretaties zijn in het kader van dit project herzien. De boringen zijn afkomstig uit de volgende bronnen:

- Diepe boringen (putten), doorgaans dieper dan 500 m, beschikbaar via www.nlog.nl;
- Ondiepe boringen, doorgaans ondieper dan 500 m, beschikbaar uit de databank DINO (Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond) van TNO;
- Databank DOV (Databank Ondergrond Vlaanderen) van de Vlaamse overheid en de Vlaamse Milieumaatschappij;
- Archieven van de Belgische Geologische Dienst (Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen – Wetenschappelijke Dienst Patrimonium).

In totaal zijn binnen het inventarisatiegebied 424 diepe boringen en 367 ondiepe boringen geselecteerd, samen genaamd de selectieset (zie Figuur 2.1 & Tabel 2.1). Boringen die op – of nabij – SCAN lijnen liggen (zie volgende paragraaf) zijn belangrijk voor de seismische interpretaties en worden ‘kapstokboringen’ genoemd.

De diepe boringen omvatten ook 156 steenkoolboringen (DB-boringen) die echter vaak maar een beperkt stratigrafisch bereik hebben.

Ondiepe boringen zijn veelal geplaatst voor (hydro)geologisch onderzoek en bevatten (vaak gedetailleerde) lithologische beschrijvingen en soms boorgatmetingen. Deze boringen reiken over het algemeen maximaal tot 500 m beneden maaiveld. Voor het H3O-Diep Zeeland deelmodel van het Kenozoïcum is een selectie gemaakt van boringen die ook voor het GeoTOP-Zeeland model zijn gebruikt, indien deze tot minimaal 50 m beneden maaiveld reiken.

Diepe boringen zijn doorgaans exploratieboringen (zowel on- als offshore) voor olie, gas en geothermie en bevatten stratigrafische informatie en boorgatmetingen. Deze laatste zijn publiek beschikbaar als onderdeel van de Nederlandse Mijnbouwwet en opvraagbaar via www.nlog.nl. Buitenlandse boringen vallen niet onder de Nederlandse regelgeving. Voor het Belgisch inventarisatiegebied zijn 186 boringen meegenomen.

Vertrouwelijkheid

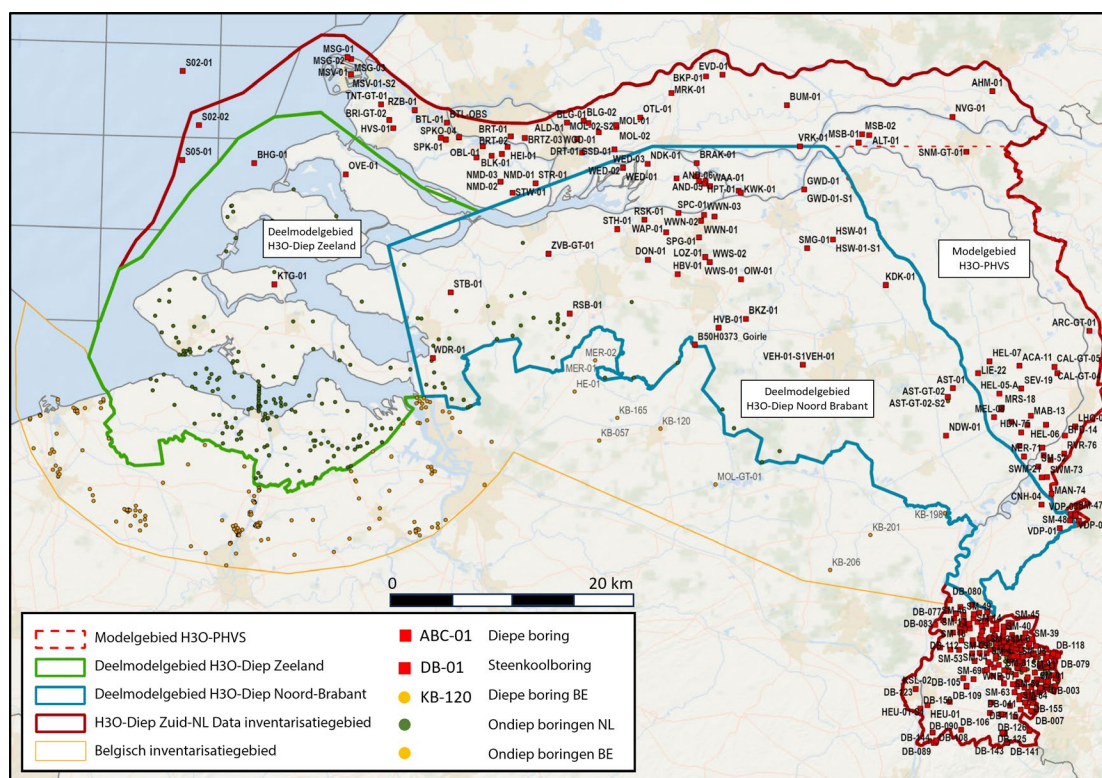
In het Nederlandse deel van het inventarisatiegebied bevatte de selectieset een aantal diepe boringen die bij de start van het project nog vertrouwelijk waren. Deze boringen zijn intussen wel openbaar beschikbaar en opvraagbaar via NLOG. De geselecteerde boringen in het Vlaamse deel van het inventarisatiegebied zijn allen openbaar.

Controle

De metadata en lithostratigrafische interpretatie van de selectieset worden verondersteld correct te zijn. Een juiste stratigrafische indeling is namelijk leidend voor de seismische interpretatie en voor de zogeheten seismic-to-well ties (voor uitleg zie Paragraaf 3.3). Lithostratigrafische herlabelingen die evengoed nodig waren, zijn gedocumenteerd in paragraaf 3.2 (lithostratigrafische inzichten).

Tabel 2.1 Overzicht van het aantal boringen in de selectieset van het Nederlandse en Vlaamse deel van het inventarisatiegebied en binnen de deelmodellen.

	NL	BE
H3O-Diep inventarisatiegebied	424	186
H3O-Diep Noord-Brabant deelmodel	220	10
H3O-Diep Zeeland deelmodel	3	176
Offshore	3	
H3O-Peelhorst & Venloslenk	42	
DB boringen binnen inventarisatiegebied	156	



Figuur 2.1 Locaties van de geselecteerde boringen in het H3O-Diep Zuid-NL inventarisatiegebied.

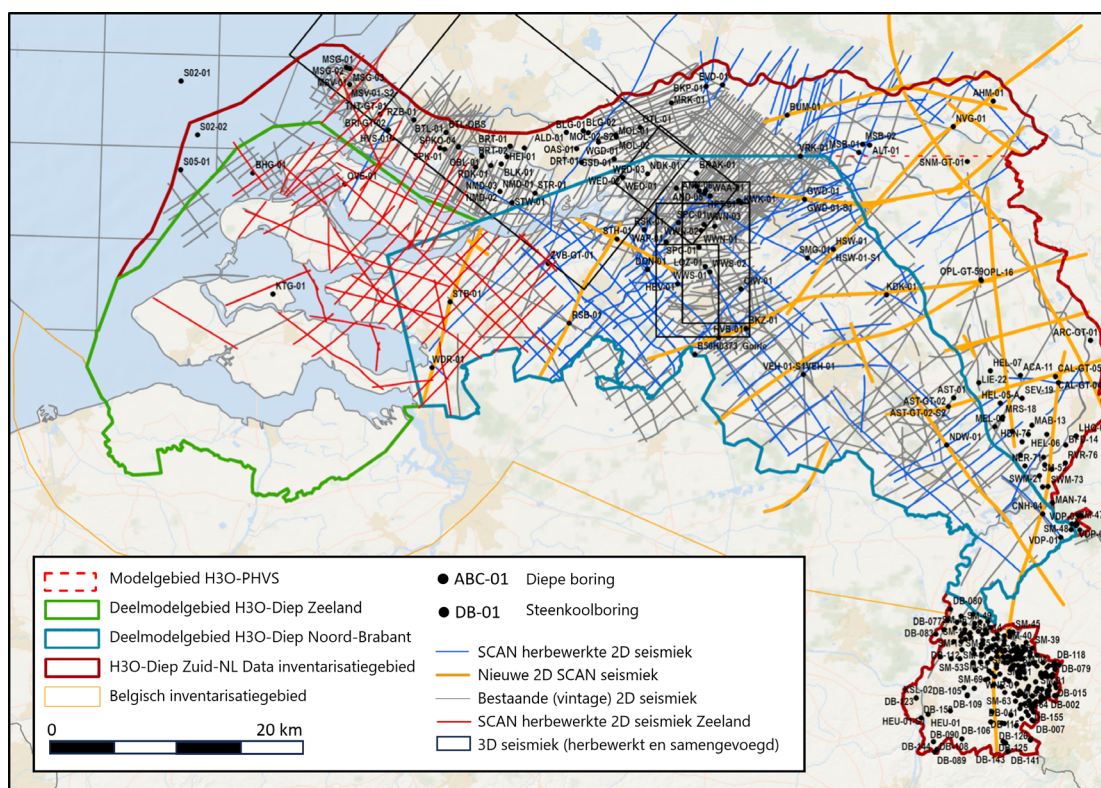
De selectieset is zowel in het seismische softwarepakket Petrel© (v2023) als in een ArcGIS project geladen. Het ArcGIS project is bij de oplevering van het model meegeleverd.

2.2 Boorgatmetingen

Van de selectieset diepe boringen beschikken 130 stuks over digitale boorgatmetingen, ook wel logs genoemd. Essentiële logs zijn de gamma-ray (GR) en sonic (DT) logs, daarnaast is een dichtheidslog (RHOB) wenselijk. De meeste van de geselecteerde boringen beschikken over een lithologische beschrijving in de Composite Well Log (CWL) en/of rapporten (beschikbaar via nlog.nl). Veel oudere exploratieboringen hebben geen GR meting, maar alleen een Spontaneous Potential (SP) log, deze is met name indicatief voor de aanwezigheid van klei. Samen met de GR geeft de DT-log een goede indicatie van de lithologische samenstelling (zand vs. klei). De sonic log (DT) kan ook gebruikt worden voor tijd-diepte relaties, bijvoorbeeld om de logs samen met de seismiek te kunnen visualiseren. Voor sommige boringen zijn checkshots en tijd-diepte paren beschikbaar, die gebruikt zijn voor het bepalen van de juiste tijd-diepte relatie, noodzakelijk om de seismische interpretaties (uitgevoerd in het tijddomein) om te zetten naar diepte in meters beneden maaiveld.

Van de ondiepe selectieset (binnen Nederland) bevatten een aantal boringen ook boorgatmetingen. Dit betreft meestal ondiepere boringen die tot grotere diepte reiken (tot wel 900 m). Deze zijn in dit project niet veelvuldig gebruikt voor lithostratigrafische interpretaties, omdat de lithostratigrafische onderverdeling overgenomen is van het H3O-de Voorkampen project (zie ook hoofdstuk 3).

2.3 Seismische data



Figuur 2.2 Seismische data binnen het modelgebied H3O-Diep Zuid-NL gebruikt voor seismische interpretatie. De locaties van diepe boringen is eveneens aangegeven. Boringen die op – of nabij – SCAN lijnen liggen zijn belangrijk voor de seismische interpretaties en worden ‘kapstokboringen’ genoemd.

Binnen het inventarisatiegebied is een grote hoeveelheid seismische data beschikbaar (zie Figuur 2.2 en Tabel 2.2). De meeste van deze data betreft 2D lijnen (>1200 lijnen); driedimensionale (3D) seismische data is alleen beschikbaar in gebieden waar grootschalige koolwaterstof exploratie en (eventuele) productie heeft plaatsgevonden. Dit betreft het midden van de Provincie Noord-Brabant en het aangrenzende deel van Zuid-Holland. Vermillion Energy Netherlands BV heeft voor eigen gebruik digitale herbewerkingen gemaakt van deze 3D seismische data en deze beschikbaar gemaakt voor dit project. Daarnaast is een samenvoeging (“merge”) gebruikt van herbewerkte 3D seismische surveys van het West-Nederlands Bekken.

Veel oudere (vintage) 2D seismische data zijn digitaal beschikbaar op www.nlog.nl. Dit betreffen zogenaamde eerste post-stack versies die onder gezag van de Mijnbouwwet door exploratiebedrijven aangeleverd zijn aan TNO. Om de kwaliteit van de oudere seismische opname te verbeteren, zijn belangrijke 2D lijnen vaak digitaal herbewerkt. Er kunnen dus meerdere versies van één en dezelfde lijn bestaan. De versie met de beste kwaliteit is voor dit project geselecteerd; meestal is dat de meest recente.

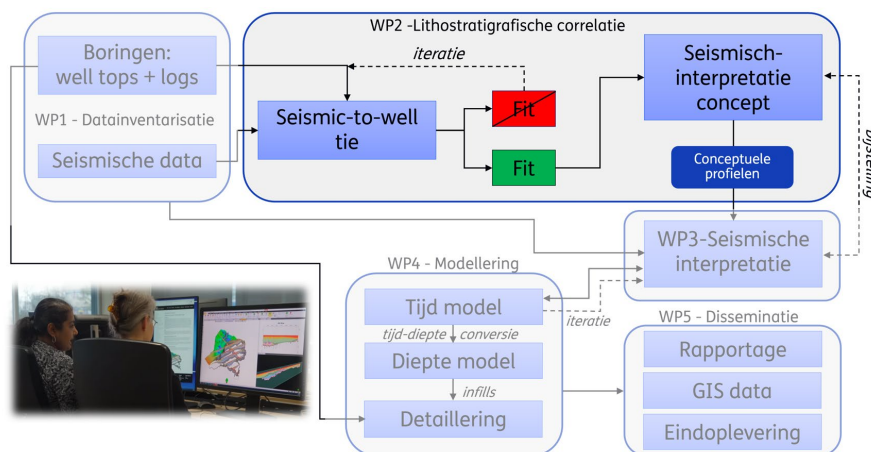
In het kader van het SCAN-aardwarmte project (www.scanaardwarmte.nl) zijn 67 nieuwe 2D lijnen geschoten in gebieden waar geen tot weinig seismische data beschikbaar was, maar die voor warmte vraagstukken wel relevant worden geacht. Een gedeelte van deze lijnen (20) valt binnen het inventarisatiegebied en loopt over (of vlak langs) voor de seismische interpretatie belangrijke boringen (de zogenoemde kapstokboringen).

Als onderdeel van het SCAN project zijn ook een groot aantal reeds bestaande 2D seismische datasets herbewerkt (reprocessing). De kwaliteit van deze seismische opnames is hierdoor sterk verbeterd, met name in de Provincie Zeeland (zie Figuur 2.2). Voor het verifiëren van interpretaties in de grensstreek is ook een groot aantal Belgische seismische lijnen (235) gebruikt. De meeste van deze lijnen zijn publiek beschikbaar; voor het gebruik van de overige lijnen is door het Vlaams Planbureau voor Omgeving (VPO) toestemming verleend om deze te gebruiken voor dit project.

Tabel 2.2 Overzicht gebruikte seismische data gegroepeerd naar type binnen het inventarisatiegebied. Het bij het rapport behorende ArcGIS project geeft een volledig overzicht van alle seismische lijnen. Surveys die tot buiten het inventarisatiegebied doorlopen zijn meegeteld.

Type seismiek	Beschrijving	Aantal lijnen (2D) of surveys (3D)
2D SCAN NEW	Nieuwe 2D lijnen geschoten in het kader van SCAN (Seismische Campagne Aardwarmte Nederland)	20
2D SCAN REPRO	Herbewerkte 2D seismiek (zowel in kader van SCAN en andere initiatieven (enkele herbewerkingen in Oost-Brabant zijn door Hydreco-GeoMEC ter beschikking gesteld)	220
2D Vintage	Bestaande 2D seismische surveys uit NLOG-database	765
België 2D RD	Compilatie van Belgische seismiek (omgezet naar RD-coördinatenstelsel)	235
3D Vermillion REPRO	Herbewerkte 3D seismiek van gebied Andel, Tilburg, Waalwijk – (confidentieel, beschikbaar gesteld door Vermillion Energy)	2
3D REPRO	Herbewerking en samenvoeging (merge) 3D seismische surveys	1
3D Vintage	Bestaande 3D seismische surveys uit NLOG-database (ligging identiek aan 3D Vermillion REPRO)	2

3 Stratigrafische indeling

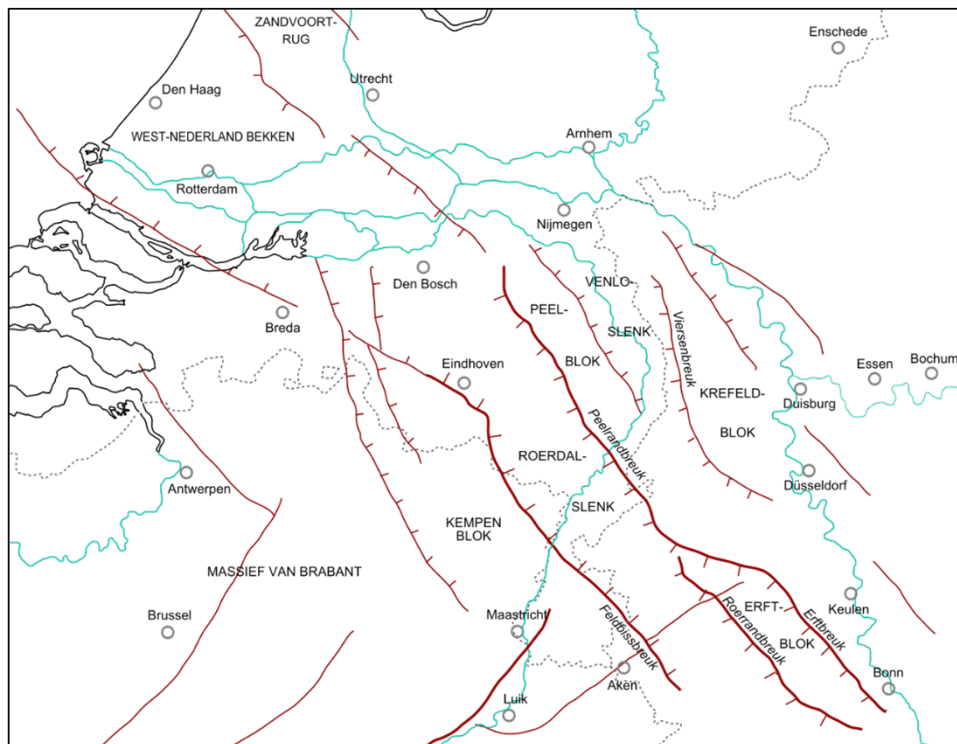


Dit hoofdstuk behandelt de stratigrafische opbouw van de ondergrond in het modelgebied. Paragraaf 3.1 geeft een overzicht van alle eenheden die tijdens de seismische interpretatie zijn onderscheiden; paragrafen 3.2, 3.3 en 3.4 zijn specialistische evaluaties van de eenheden.

3.1 Stratigrafische aspecten

De ondergrond van Nederland is onderverdeeld in stratigrafische eenheden, waarvan de definities en beschrijvingen zijn te raadplegen op [Stratigrafische Nomenclator | DINOLOket](#). Deze onderverdeling vormt de basis van het H3O-Diep Zuid-NL model, waarbij de modelleenheden zo veel mogelijk overeenkomen met laagpakketten.

In het dieptebereik van dit project hebben de laagpakketten doorgaans specifieke lithologische samenstellingen met bijbehorende hydraulische kenmerken (bijvoorbeeld zandsteen of kleisteen). De grensvlakken van veel van deze laagpakketten zijn in de seismiek goed herkenbaar omdat lithologische overgangen vaak ook een akoestische expressie hebben (zie ook paragraaf 3.3). Indien er sprake is van een (hoek)discordante overgang tussen laagpakketten is de seismische expressie meestal nog beter omdat lithologische overgangen dan abrupter zijn.



Figuur 3.1 De belangrijkste structurele elementen binnen het H30-Diep Zuid-NL project gebied zoals genoemd in de tekst. Het Massief van Brabant wordt ook wel London-Brabant Massief genoemd. Bron: Wikipedia. Dit bestand is gelicenseerd onder *Creative Commons Attribution-Share Alike 1.0 Generic license*.

In het H30-Diep Zuid-NL project zijn in totaal 21 stratigrafische eenheden gemodelleerd (zie Hoofdstuk 5 voor gedetailleerde uitleg) behorende tot het Kenozoïcum, Mesozoïcum en het Paleozoïcum. De grensvlakken van deze eenheden zijn meestal seismisch geïnterpreteerd. Voor een aantal grensvlakken bleek dat niet mogelijk omdat ze geen seismische expressie hebben, of door ontbreken van een akoestisch contrast of omdat de eenheid te dun is en top- en basisreflectoren interfereren. Deze eenheden zijn bij het modelleerproces op basis van diktegegevens aan het seismostratigrafisch bepaalde model toegevoegd en worden “invullingen” genoemd. Welke eenheden dit betreft is aangegeven in Tabellen 3.1 en 3.2.

De kenozoïsche geologische eenheden binnen het H30-Diep Zeeland deelgebied betreffen alleen de paleogene laagpakketten. Deze liggen onder de basis van de Breda Subgroep waarvan het bijbehorende grensvlak het ondiepste (of jongste) gemodelleerde grensvlak is in dit deelgebied.

In het deelgebied Noord-Brabant zijn alleen eenheden van het Mesozoïcum en het Paleozoïcum geïnterpreteerd en gemodelleerd, waaronder eenheden behorende tot het Trias (RB en RN groepen), de Altena Groep, de Schieland Groep, de Rijnland Groep en de Krijtkalk Groep. Paleozoïsche eenheden betreffen formaties behorende tot de Kolenkalk Groep en de Limburg Groep. Een belangrijke seismostratigrafische marker aan de top van de paleozoïsche sequentie is de Base Permian Unconformity (BPU). Het stratigrafisch oudste – en diepst gelegen – grensvlak betreft de basis van het onder Carboon (het Dinantien).

De lithologische samenstelling en eigenschappen van de eenheden die op seismische profielen te zien zijn, kunnen alleen worden bepaald uit boorinformatie. Over het algemeen geldt dat hoe dieper een eenheid beneden maaiveld is gelegen, hoe minder boorinformatie beschikbaar is. Zo zijn er slechts enkele diepe boringen die tot het Dinantien reiken. De

lithostratigrafische informatie uit de boringen (de zogenoemde well tops) zijn in Petrel geladen om stratigrafische correlaties (zgn. putcorrelaties) tussen boringen te maken en om het seismisch reflectie patroon op de seismische lijnen te kunnen koppelen aan de lithostratigrafie. Inventarisatie van lithostratigrafische boorinformatie laat zien dat correlaties tussen boringen op groepsniveau vrij eenvoudig en snel te maken zijn. Op het niveau van formaties en laagpakketten is de lithostratigrafische boorinformatie vaak onvolledig. Deze is in het kader van dit project, waar nodig, aangevuld voordat de seismic-to-well ties konden worden gemaakt. Dit heeft geleid tot een aantal nieuwe inzichten die in de volgende paragrafen beschreven zijn.

In het bij dit rapport meegeleverde ArcGIS bestand kunnen de deelgebieden en boringen met de querybuilder overzichtelijk gefilterd worden op stratigrafische eenheid. Dit geeft een overzicht in hoeverre de gemodelleerde eenheden binnen het modelgebied voorkomen, op welke diepte en met welke dikte.

Tabel 3.1 Overzicht van gemodelleerde stratigrafische eenheden binnen deelmodelgebied H3O-Diep Zeeland en de typering als aquifer, aquitard of ongedefinieerd. De kolom S.I. geeft aan welke grensvlakken seismisch geïnterpreteerd zijn. De invullingen zijn tijdens de modellering toegevoegd.

Era	Code	Groep	Subgroep	Formatie	Laagpakket	code	aquifer	aquitard	ongedif	S.I.	invulling	
Kenozoïcum	Hoofdlagen model DGMdiep v5		modelleenheden deelmodel Zeeland									
	NU	Boven-Noordzee Groep	buiten scope van dit deelmodel									
	Early Miocene Unconformity										x	
	NL+N M	Onder en Midden-Noordzee groepen	Rupel	Boom	NMRUBO		x			x		
				Berg	NMBUBE	x				x		
				Tongeren	diverse klei/zand afw.	NMTO			x			
			Pyrenean Unconformity								x	
			Dongen	Asse	NLDOAS		x			x		
				Zand van Brussel	NLDOBR	x				x		
				Ieper	NLDOIE		x	x			x	
				Oosteind	NLDOOO	x			x			
			Landen	Liesse	NLLALI		x					x
				Gelinden	NLLAGE	deels			x			
Orp	NLLAOE	x							x			
CK	Krijtkalk Groep	Houthem		CKHM	?					x		
Laramide Unconformity										x		
Mesozoïcum	CK	Krijtkalk Groep		Ommelanden		CKGR	?					
	Subhercynian Unconformity										x	
	KN	Rijnland Groep	niet in projectgebied aanwezig									
	Late Kimmerian Unconformity											
	SL	Schieland Groep	niet in projectgebied aanwezig									
	Mid Kimmerian Unconformity											
	AT	Altena Groep	niet in projectgebied aanwezig									
	Vroeg Kimmerian Unconformity											
	RN	Boven-Germaanse Trias Gp	niet in projectgebied aanwezig									
	Hardegse Unconformity											
	RB	Onder-Germaanse Trias Gp	niet in projectgebied aanwezig									
ZE	Zechstein Groep	niet in projectgebied aanwezig										
RO	Boven-Rotliegend Groep	niet in projectgebied aanwezig										
Base Permian Unconformity (Sudetic + Asturian Unconformities)										x		
Paleozoïcum	DC	Limburg Groep	Hunze	Strijen		DCHS	x	x		x		
			Dinkel	Hellevoetsluis		DCDH	x	x		x		
			Caumer	Maurits		DCCU			x	x		
				Ruurlo		DCCR			x	x		
				Baarlo		DCCB			x	x		
			Geul	Epen		DCGE		x				
	Sudetic Unconformity										x	
	CL	Kolenkalk Groep		Zeeland		CLZL	x					
	Bretonian Unconformity										x	

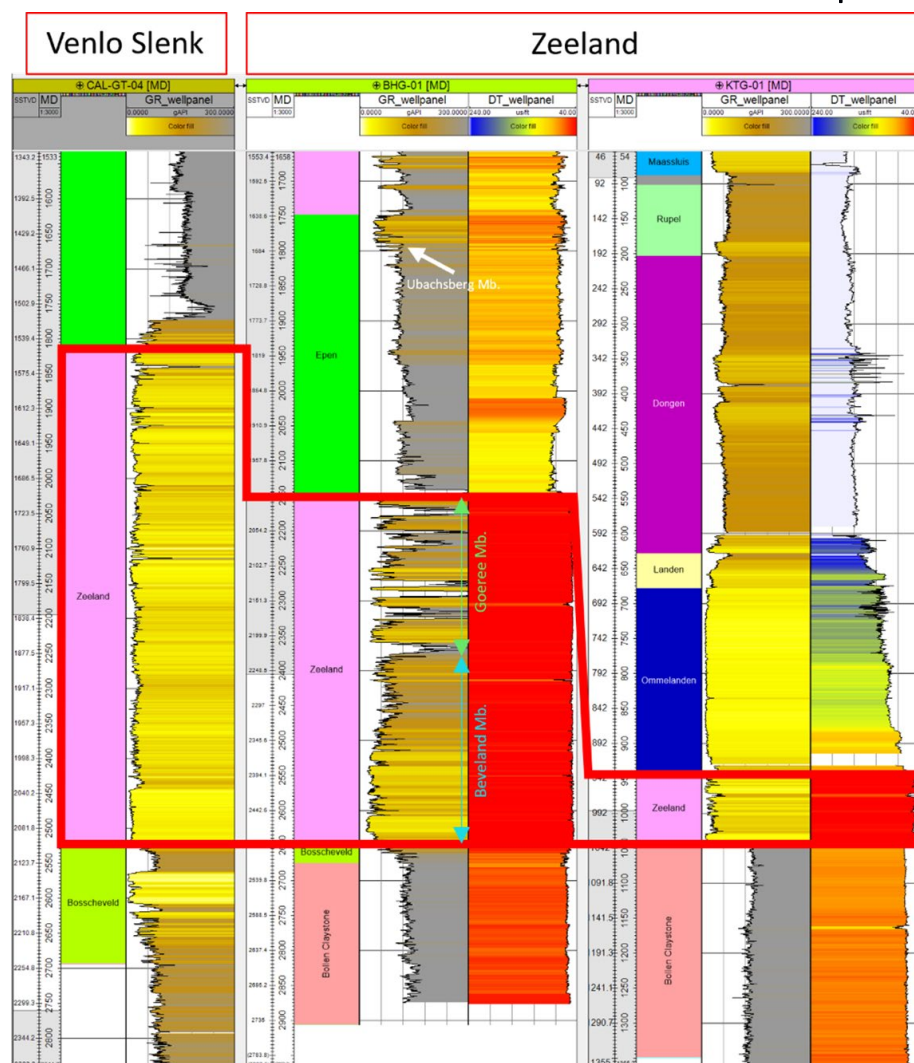
Tabel 3.2 Overzicht van gemodelleerde eenheden binnen deelmodelgebied H30-Diep Noord-Brabant en de typering als aquifer, aquitard of ongedefinieerd. De kolom S.I. geeft aan welke grensvlakken (basis) seismisch geïnterpreteerd zijn. De invullingen zijn tijdens de modellering toegevoegd.

Era	Code	Groep	Subgroep	Formatie	Laagpakket	code	aquifer	aquitard	ongedif	S.I.	invulling	
Kenozoïcum	Hoofdlagen model DGMdiep v5		modelleenheden deelmodel Noord Brabant									
	NU	Boven-Noordzee Groep	buiten scope van dit deelmodel									
	NM	Midden-Noordzee Groep										
	NL	Onder-Noordzee Groep										
Laramide Unconformity											x	
Mesozoïcum	CK	Krijtkalk Groep		Houthem		CKHM	?				x	
				Ommelanden		CKGR	?				x	
	Subhercynian Unconformity										x	
	CK	Krijtkalk Groep		Texel	niet aanwezig	CKTX	?					
	KN	Rijnland Groep		Holland	Onder-Holland Mergel	KNGLL	nee	ja				
	Late Kimmerian Unconformity										x	
	SL	Schieland Groep	Delfland	Nieuwerkerk	niet in projectgebied aanwezig	SLDNR		x				
					niet in projectgebied aanwezig	SLDND	x					
					Alblasserdam	SLDNA	x	x				
	Mid Kimmerian Unconformity										x	
	AT	Altena Groep		Brabant	kalkareniet/mergel afwisselingen	ATBR	x	x			x	
				Werkendam	Boven-Werkendam	ATWDU		x				
					Midden-Werkendam	ATWDM	x?				x	
					Onder-Werkendam	ATWDL		x				
				Posidonia		ATPO		x		x		x
		Aalburg			ATAL		x					
		Sleen			ATRT			x				
	Vroeg Kimmerian Unconformity										x	
	RN	Boven-Germaanse Trias Gp		Keuper		RNKP		x				
				Muschelkalk		RNMU		x			x	
				Boven-Bunter		RNUB		x				
				Röt	Röt Randzansteen	RNROF	x	x			x	
				Sollingen	Basaal Sollingen	RNSOB	x	x			x	
	Hardegens Unconformity										x	
	RB	Onder-Germaanse Trias Gp	Hoofd-Bontzandsteen	Hardegens		RBMH	x					
				Dethfurt	Boven Dethfurth Zandsteen	RBM DU	x					
					Dethfurth Kleisteen	RBMDC		x				
					Onder Dethfurth Zandsteen	RBM DL	x					
					Boven Volprieausen Zandsteen	RBMVU	x					
				Volprieausen Kleisteen	RBMVC		x					
				Onder Volprieausen Zandsteen	RBMVL	x						
			Onder Bontzandsteen	Hoofd Kleisteen		RBSM		x			x	
				Nederweert zandsteen		RBSN	x					
			ZE	Zechstein Groep		Z2 (Strassfurt)		ZEZ2			x	
	Z1 (Werra)					ZEZ1			x		x	
	ZE randklastica					ZEFC	x					
	RO	Boven-Rotliegend Groep		Slochteren		ROSL	x				x	
Base Permian Unconformity (Sudetic + Asturian Unconformities)											x	
Paleozoïcum	DC	Limburg Groep		Hunze	Strijen	DCHS	x	x			x	
				Dinkel	Hellevoetsluis	DCDH	x	x			x	
				Caumer	Maurits	DCCU			x		x	
					Ruurlo	DCCR			x		x	
					Baarlo	DCCB			x		x	
				Geul	Epen	DCGE		x				
	Sudetic Unconformity										x	
	CL	Kolenkalk Groep		Zeeland		CLZL	x					
	Bretonian Unconformity										x	

3.2 Lithostratigrafische inzichten

In deze paragraaf wordt aan de hand van een serie putcorrelatieprofielen de kenmerkende stratigrafische opeenvolging in het modelgebied besproken, beginnend met de oudste eenheden. Hiertoe worden de bestaande lithostratigrafische interpretaties, zoals afkomstig van Dinoloket/NLOG, geëvalueerd aan de hand van petrofysische logs, met name de gamma ray (GR) en sonische snelheid ("Sonic", afgekort als DT). Deze combinatie geeft een indicatie van de lithologische samenstelling en de te verwachten seismische impedantiecontrasten (zie hiervoor ook paragraaf 3.3).

3.2.1 Onder Carboon – Carboniferous Limestone Groep



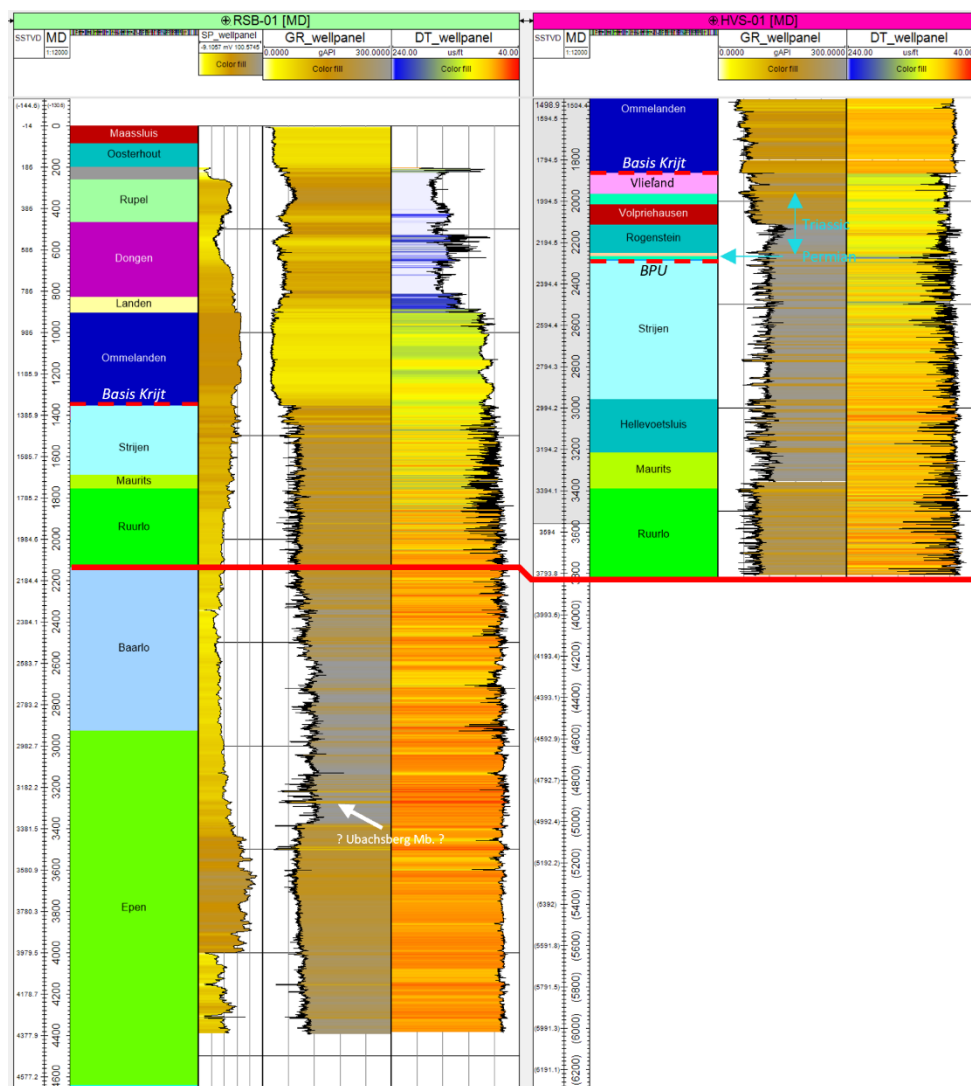
Figuur 3.2 Overzicht van drie boringen door de Onder Carboonafzettingen van de Formatie van Zeeland. De gekleurde kolommen geven de lithostratigrafische interpretatie op formatieniveau, de twee log-tracks tonen de Gamma-ray (GR) en Sonic (DT). De kleuropvulling van de Gamma-Ray log laat de variatie in gesteentesoorten zien (geel = zand, bruin = silt, grijs = klei). Boring Californie-GT-04 (CAL-GT-04) ligt ten oosten van het H30-Diep Zuid-NL modelgebied in de Venlo Slenk. Boringen Brouwershavensegat-1 (BHG-01) en Kortgene-1 (KTG-01) liggen in de Provincie Zeeland (op het Massief van Brabant). Elders zijn deze afzettingen niet aangeboord.

Hoewel lokaal oudere afzettingen zijn aangeboord (Devoon, Banjaard Groep) zijn de oudste afzettingen die voor dit project zijn gemodelleerd van Vroeg Carboon ouderdom. Deze afzettingen behoren tot de Formatie van Zeeland van de Kolenkalk Groep. Over het algemeen bestaat deze uit een opeenvolging van kalk- en dolomietafzettingen, gevormd op carbonaatplatformen tijdens het Tournaisien en Viséen. Gezamenlijk staan deze stages bekend als het Dinantien, een term die vaak gebruikt wordt voor de kalksteen-afzettingen van deze ouderdom. Deze kalkstenen zijn met name bekend van structurele hogen, waar veel putten gepositioneerd zijn. In Zeeland zijn deze afzettingen afgezet op de noordflank van het Massief van Brabant (Figuur 3.1). Diverse studies bepleiten dat de Formatie van Zeeland in noordelijke richting verdunt en dieper komt te liggen. Deze diepe ligging heeft enerzijds te maken met verticaal verzet langs de randbreuken van het West-Nederlands Bekken (WNB) en de Roerdalslenk (RDS), maar is deels ook gerelateerd aan het paleozoïsche reliëf dat gekarakteriseerd is door een noordwaartse overgang van dikke carbonaatplatformen naar dunne klei-gedomineerde diep-water afzettingen (Kulm-facies). In Nederland is deze Kulm Facies door de grote diepteligging niet in boringen aangetroffen. In het zuiden van de Provincie Zeeland – dicht tegen het Massief van Brabant aan – zijn de Dinantien carbonaatgesteenten tijdens latere opheffing geërodeerd. Dit is bijvoorbeeld te zien in boring KTG-01 waar de Formatie van Zeeland erg dun is, karstverschijnselen vertoont en direct bedekt wordt door de Boven-Krijt afzettingen van de Formatie van Ommelanden (Gutteridge et al., 2024; Figuur 3.2).

De Formatie van Zeeland is in een drietal laagpakketten (Lp) onderverdeeld, t.w. van oud naar jong de laagpakketten van Beveland (overwegend dolomiet), Schouwen (overwegend micritische kalksteen) en Goeree (gedeeltelijk verkiezelde kalksteen). Deze onderverdeling is in een aantal putten aangetroffen, maar de verwachting is dat deze gezien hun geringe snelheids- en dichtheidsverschillen in de seismiek niet tot moeilijk herkenbaar zijn. Er wordt daarom binnen dit project geen onderscheid op laagpakket-niveau gemaakt.

3.2.2 Namurien – Westfalien – Limburg Groep

Boring Rijsbergen-01 (RSB-01) is een kapstokboring voor met name de jongere Carboonafzettingen behorende tot de Limburg Groep. De Limburg Groep is onderverdeeld in vier subgroepen, deze vertegenwoordigen elk een grootschalige regressieve megasequentie. Het oudste deel, de Geul Subgroep heeft een Namurien ouderdom en wordt gekenmerkt door overwegend fijnkorrelige sedimenten waarin duidelijke fossielhoudende mariene intercalaties voorkomen. Donkerkleurige kleistenen en koollagen zijn kenmerkend voor de Caumer Subgroep (Westfalien-A, -B). De Dinkel Subgroep (Westfalien-C) bestaat overwegend uit zandsteen. De jongste van de vier, de Hunze Subgroep (Westfalien-D), bestaat uit roodgekleurde kleistenen.



Figuur 3.3 Overzicht van twee boringen door de Limburg Groep. Boring Rijsbergen-1 (RSB-01) is de belangrijkste kapstokboring voor dit interval in het modelgebied. Boring Hellevoetsluis-1 (HVS-01) ligt ten noorden van de Provincie Zeeland, buiten het modelgebied maar is van belang om de opeenvolging van het jongste Carboon (formaties van Hellevoetsluis en Strijen) te illustreren. In de getoonde putcorrelatie zijn de twee boringen op basis van de Formatie van Ruurlo gelijkgetrokken (doorgetrokken rode lijn). Voor RSB-01 is naast de Gamma-Ray (GR) en Sonic (DT) ook de Spontaan Potentiaal (SP) log weergegeven. De twee belangrijkste discordanties zijn met gestippelde rode lijnen aangegeven.

De Geul Subgroep bestaat voornamelijk uit de Formatie van Epen die discordant op de Formatie van Zeeland ligt. In enkele boringen in Limburg is aan de basis van de Formatie van Epen een bitumineuze schalie aangetroffen die bekend staat als het Laagpakket van Geverik en die zich kenmerkt door hoge GR waarden. In de boringen binnen het modelgebied is dit laagpakket niet te onderscheiden. De Formatie van Epen is, alhoewel gedomineerd door klei en silt, gekenmerkt door repeterende *coarsening upward* cycli. Deze fijnkorrelige sedimenten zijn afgezet in het diepe voorlandbekken van het Variscische orogeen en de cycliciteit is gerelateerd aan eustatische zeespiegelbewegingen. Karakteristiek voor de Formatie van Epen zijn de mariene fossielrijke niveaus en de afwezigheid van significante koollagen. Lokaal, op verschillende plekken in Nederland, wordt het Laagpakket van Ubachsberg herkend als een massieve zandlaag of -lagen nabij de top van de Formatie van Epen en

wordt als deltafrontafzettingen geïnterpreteerd (TNO-GDN, 2024). In het modelgebied is dit laagpakket duidelijk waarneembaar in de Zeeuwse boring BHG-01 (Figuur 3.2). Mogelijk is een equivalent hiervan ook in RSB-01 aanwezig (Figuur 3.3), maar niet als dusdanig vermeld op NLOG.

Het verschijnen van meerdere dikke koollagen is het criterium dat gebruikt kan worden om de overgang naar de bovenliggende Caumer Subgroep te herkennen. Deze bestaat uit de formaties van Baarlo, Ruurlo en Maurits. De Formatie van Baarlo bestaat uit kleistenen met frequente koollagen. Deze koollagen zijn door hun lage seismische snelheid goed te herkennen op de sonic log (uitslag naar links in Figuur 3.3). Basaal is de Formatie van Baarlo nog marien beïnvloed, maar naar boven toe wordt deze gevolgd door een prograderend deltasysteem, hetgeen ook weerspiegeld wordt door een coarsening upward trend. De Formatie van Ruurlo bestaat uit meer siltige- en zandige kleistenen. Het petrofysisch logpatroon is opvallend repetitief als gevolg van een cyclisch afwisseling van deltaïsch-fluviatiel en lacustriene sedimenten met respectievelijk fining upward en coarsening upward trends. Ook bij de Formatie van Ruurlo zijn de koollagen duidelijk te zien in de sonic log. De Formatie van Maurits bestaat uit kleistenen met veel koollagen. Deze toename wordt toegeschreven aan de verlanding van het afzettingsmilieu (binnen de Caumer Subgroep) van marien naar een dominant lacustrien afzettingsmilieu met moerassen.

De Dinkel Subgroep bestaat in het modelgebied uit slechts twee formaties: de Formatie van Hellevoetsluis en de Formatie van Neeroeteren. Karakteristiek voor deze Subgroep is de rode kleur van het gesteente die veroorzaakt is door oxidatie tijdens afzetting. De oxidatie wordt toegeschreven aan het veel drogere klimaat ten tijde van afzetting. De Formatie van Hellevoetsluis bestaat voornamelijk uit middel-grove tot zeer grove zandsteen. Opvallend is wel dat deze er op de Gamma-Ray log van HVS-01 (zie Figuur 3.3) niet prominent uitspringen. De Formatie van Neeroeteren is een zuidelijk lateraal equivalent van de Formatie van Hellevoetsluis, is afgezet in het Kempisch Bekken en bestaat uit dikgebankte grofkorrelige zandstenen afgewisseld met een enkele koollaag. Het is vooralsnog onduidelijk of deze lithofacies in het modelgebied aanwezig is. De ouderdom van deze eenheden is niet exact bepaald, maar wordt verondersteld Westphalien-C-D te zijn.

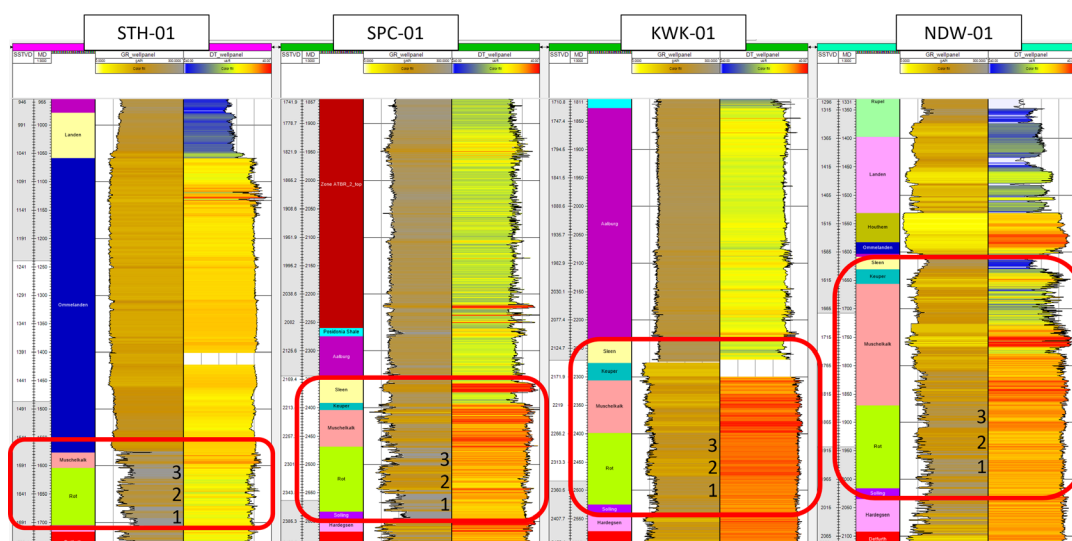
De Hunze Subgroep bestaat in het modelgebied enkel uit de Formatie van Strijen. Deze bestaat uit roodbruine, geoxideerde siltige- tot zandige kleistenen. Steenkool is afwezig. De eenheid ligt ofwel op de Formatie van Hellevoetsluis (zie boring HVS-01) maar kan ook discordant op de oudere Formatie van Maurits liggen, zoals in boring RSB-01 (Figuur 3.3).

3.2.3 Perm – Rotliegend en Zechstein groepen

De variscische orogene fase leidde aan het eind van het Carboon tot sterke opheffing, scheefstelling en erosie. Het grootste deel van het late Carboon en Vroege Perm is dan ook afwezig in het modelgebied; dit hiaat correspondeert met de Base Permian Unconformity (BPU). In een zeer beperkt aantal boringen (bijvoorbeeld Nederweert-1, NDW-01, Figuur 3.4) zijn duidelijk Laat Perm afzettingen boven de BPU aanwezig. Deze behoren tot de Rotliegend Groep (Formatie van Slochteren, overwegend zand) en de Zechstein Groep. Binnen het modelgebied bevat de Zechstein Groep vooral klastische sedimenten die afgezet zijn aan de rand van het Perm Bekken. Deze sedimenten worden ook wel de *Permian Fringe Deposits* genoemd. Zouten en andere evaporieten, die elders karakteristiek zijn voor de Zechstein Groep, zijn binnen het modelgebied niet aanwezig. Deze kunnen overigens op het Belgische Kempisch Blok ook gedeeltelijk kalkhoudend zijn (Helchteren Formatie; [2.2 Helchteren](#)

[Formation | National Commission for Stratigraphy Belgium](#)). Met uitzondering van de vermeende Formatie van Slochteren zijn de Perm afzettingen overwegend fijnkorrelig en daarom als de kleisteen laagpakketten/formaties van de Zechstein Groep (bijvoorbeeld Zechstein-1-Midden-Kleisteen en Boven Zechstein Kleisteen Formatie) geïnterpreteerd. Mogelijk hebben deze afzettingen nog een Carboon ouderdom (pers. comm. Michiel Duser). De totale dikte van deze “Perm” afzettingen is in Nederweert-1 slechts 55 m. In veel andere boringen is de veronderstelde dikte nog veel minder. Gezien hun positie nabij de zuidrand van het Permbekken lijkt het erop dat er nauwelijks grofkorrelig sediment van het zuidelijker gelegen Londen Brabant Massief aangevoerd is. In de meeste Belgische boringen rust het Zechstein rechtstreeks op het Carboon, maar in enkele boringen komt een residueel conglomeraat voor dat meerdere meters dik kan zijn en een interne opbouw vertoont analoog aan het Conglomeraat van Malmédy in een slenk op het Massief van Stavelot. Dit conglomeraat is van Perm ouderdom maar verder niet gedateerd.

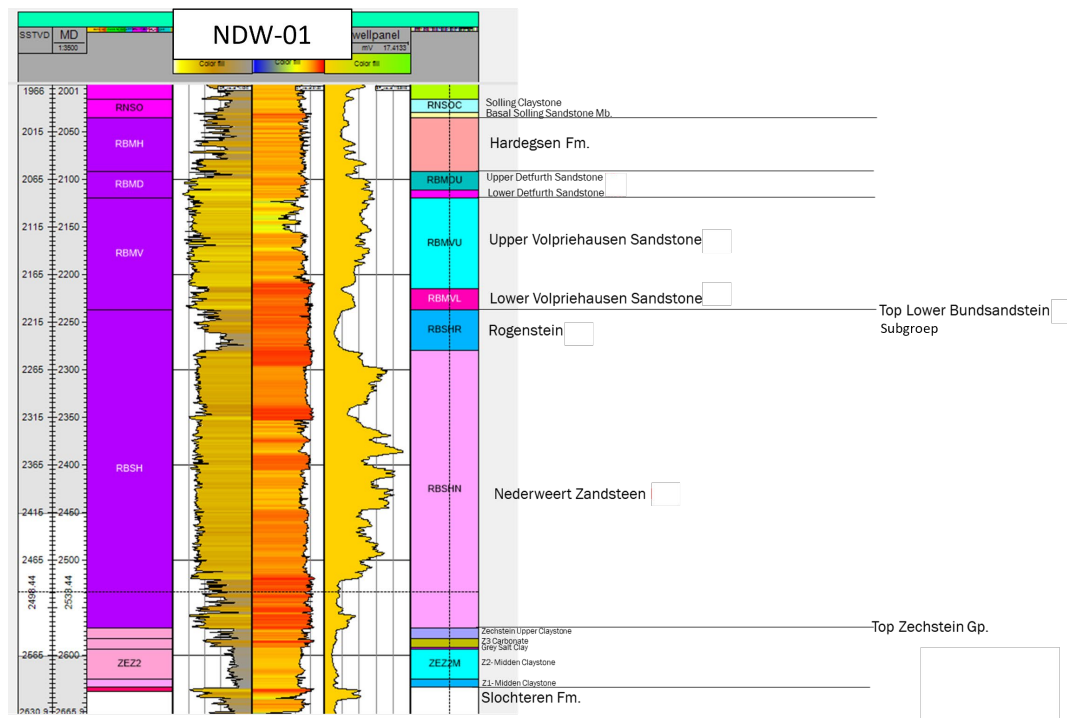
In deze over het algemeen sterk geoxideerde afzettingenmilieu is biostratigrafische validatie veelal onmogelijk. Een uitzondering is boring Nederweert-1 waarin uit de Z2 Midden-Kleisteen Laagpakket een typische Laat Perm pollen associatie is aangetroffen (Van de Laar, 1985). Het is desalniettemin meestal onduidelijk of de veronderstelde Perm afzettingen daadwerkelijk aanwezig zijn en in welke hoedanigheid. Een voorbeeld is boring RSB-01. In oudere boorbeschrijvingen wordt een pakket van ongeveer 50 meter bestaande uit de Formatie van Slochteren en Zechstein-Boven Kleisteen Formatie geïnterpreteerd dat ingeschakeld zou zijn tussen de Onder-Bontzandsteen Subgroep (RBS) en de Hunze Subgroep (DCH). In tegenstelling tot wat deze lithostratigrafische beschrijving suggereert (zie www.nlog.nl) is de aanwezigheid van Perm en Trias afzettingen niet in overeenstemming met het seismisch beeld (zie ook Figuur 3.4). Mogelijk is deze interpretatie alleen op basis van de rode kleur gemaakt die echter ook in gesteenten van de Formatie van Hellevoetsluis voor kan komen. Dit soort incorrecte boorinterpretaties zijn in het verleden wel gebruikt in het DGMdiep ondergrondmodel en hebben geleid tot onjuiste verbreidingen van bepaalde eenheden en verkeerde aannames over de geologische geschiedenis.



Figuur 3.4 Overzicht van vier boringen die het Boven-Perm (Formatie van Slochteren en Zechstein Groep) aangeboord hebben. Boringen Steelhoven-1 (STH-01), Sprang Capelle-1 (SPC-01) en Kerkwijk-1 (KWK-01) liggen op een zuidwest-noordwest gericht profiel door de Roerdaalslenk. Boring Nederweert-1 (NDW-01) ligt niet op dit profiel en bevindt zich aan de zuidoostflank van de Roerdaalslenk. De selectie is enkel bedoeld om een beeld te geven van de verschillen in petrofysische expressie van deze dunne en slecht gekarakteriseerde eenheden.

3.2.4 Trias

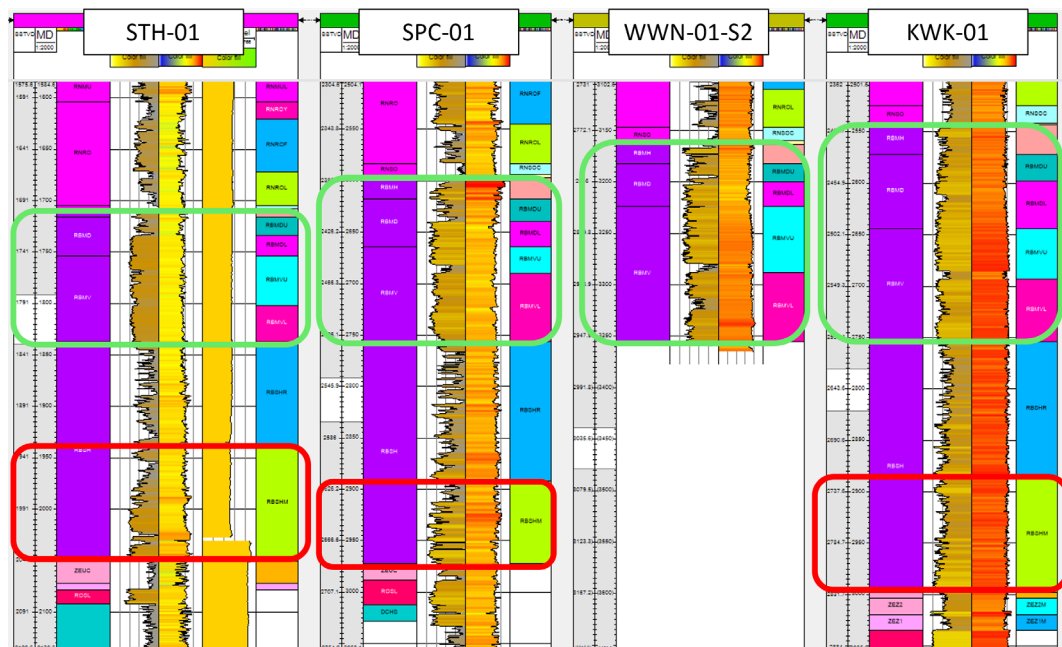
De Trias afzettingen in het modelgebied bestaan uit twee hoofdgroepen, die onderverdeeld zijn in subgroepen en formaties. De Onder-Germaanse Trias Groep bestaat uit twee subgroepen: de Onder Bontzandsteen Subgroep en de Hoofd Bontzandsteen Subgroep. Voorheen (tot 2022) waren beide subgroepen formaties en waren de formaties van de huidige subgroepen laagpakketten.



Figuur 3.5 Overzicht van de Trias successie in boring Nederweert-1 (NDW-01).

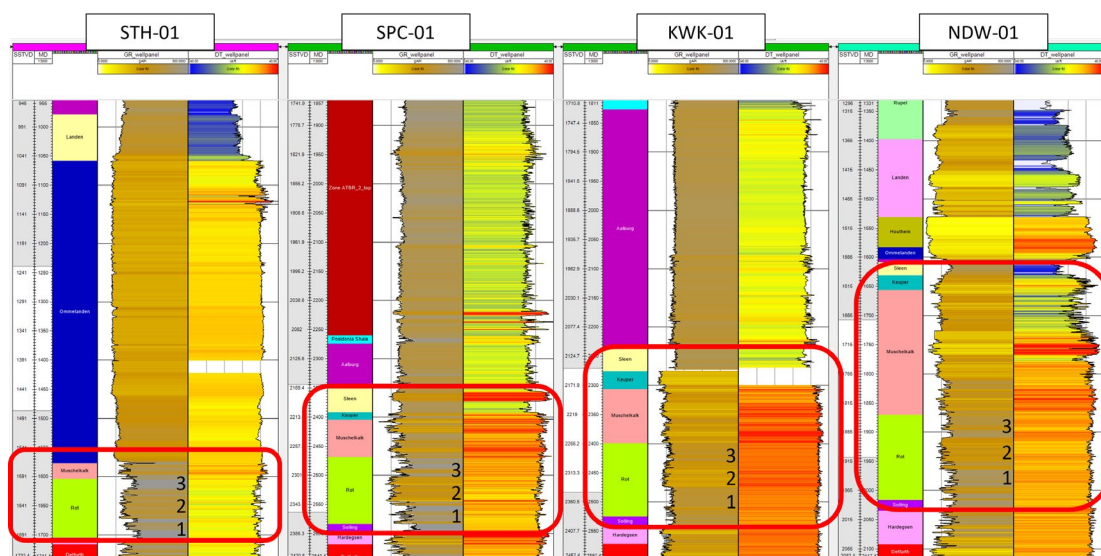
De Onder Bontzandsteen Subgroep bestaat uit de Nederweert Zandsteen (gedeeltelijk gecementeerde zandstenen), de Hoofd Kleisteen Formatie (fining-upward cycli van silt- naar kleisteenopeenvolgingen) en de Rogenstein Formatie (fijnzandige gelamineerde klei- en siltstenen, met oolietlagen). Hoewel de Nederweert Zandsteen Formatie bekend staat als een mogelijk reservoir is de verbreiding slecht begrepen. De eenheid is gedefinieerd in boring NDW-01 en daarin ook duidelijk als een zandsteenpakket te herkennen (Figuur 3.5). Er wordt verondersteld dat de Nederweert Zandsteen Formatie noordwaarts minder zandig wordt en overgaat in de Hoofd Kleisteen Formatie en het onderste deel van de Rogenstein Formatie. Dit is niet volledig duidelijk als gekeken wordt naar het logprofiel van een aantal boringen waarin de Hoofd Kleisteen Formatie is geïnterpreteerd. Duidelijk wordt dat deze ook vrij zandig ontwikkeld is (Figuur 3.6). De basis van de Rogenstein Formatie springt er op logbeeld altijd duidelijk uit, met een scherpe toename van de gamma-ray. De top van de Rogenstein Formatie en daarmee de Onder Bontzandsteen Subgroep is een discordantie. De Hoofd-Bontzandsteen Subgroep bestaat uit drie formaties (van oud naar jong): Volpriehausen (cyclisch opgebouwde zandsteenpakketten), Detfurth (zand- en kleisteen afwisselingen) en de Hardegsen (middelgrove gecementeerde zandsteen). Deze formaties zijn allen onderverdeeld in 2-3 laagpakketten die worden gekenmerkt door dominantie van zand- of kleisteen. In het modelgebied blijkt het in de praktijk moeilijk deze laagpakketten te onderscheiden en in veel boringen zijn enkel de zandsteen laagpakketten geïnterpreteerd.

Het is daarom het meest zinvol de Boven Bontzandsteen Subgroep als een complex te beschouwen (Figuur 3.6).



Figuur 3.6 Overzicht van vier boringen die de onder Germaanse Trias Groep aangeboord hebben. Het rode kader toont de Hoofd Kleisteen Formatie met een opvallend zandig karakter. Het groene kader geeft de Boven Bontzandsteen Subgroep aan, waarbinnen het moeilijk is om een consistente onderverdeling op formatie- of laagpakket niveau te maken.

De Boven Germaans Trias Groep is opgebouwd uit vier formaties, t.w. de Solling, Röt, Musschelkalk en Keuper formaties (Figuur 3.7). Alleen in de as van de Roerdaalslenk zijn deze eenheden aanwezig. De basis van deze groep wordt gevormd door de Hardegsen Unconformity.



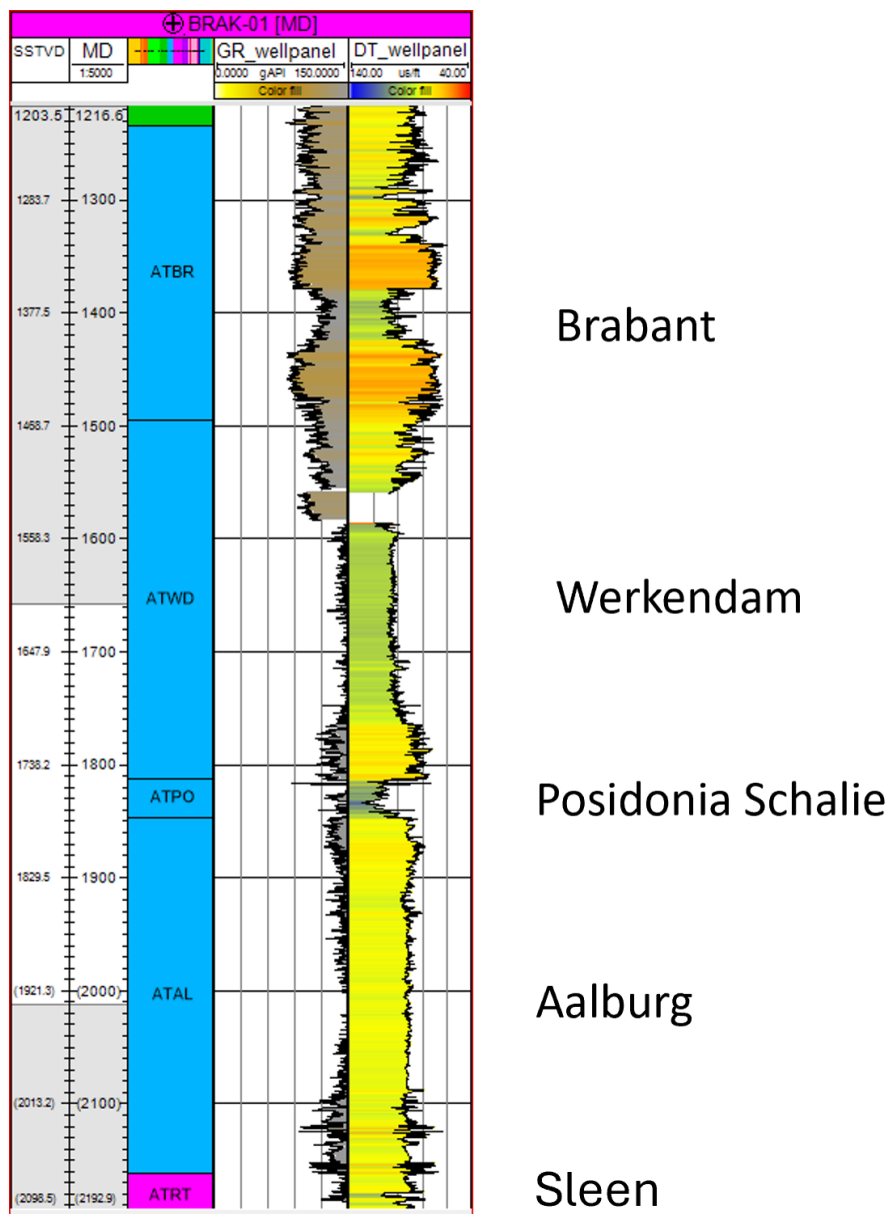
Figuur 3.7 Overzicht van vier boringen die de Boven Germaanse Trias Groep (rood kader) aangeboord hebben. De cijfers 1-3 geven de laagpakketten binnen de Röt Formatie aan.

De Formatie van Solling is erg dun en bestaat uit een basale fijne zandsteen die naar boven toe overgaat in een geoxideerde kleisteen, waarin ook anhydrieten voor kunnen komen. De Röt Formatie bevat afzettingen die plaatsvonden in een afgesloten Trias bekken. Het modelgebied bevindt zich aan de zuidrand van dit voormalige bekken. De Röt Formatie bestaat hier uit afwisselingen van kleisteen en zandsteen (t.w. de Onder-Röt Randkleisteen, Röt Randzandsteen en de Boven-Röt Randkleisteen laagpakketten). Deze driedeling is op gamma-ray logs goed te herkennen (1-3 in Figuur 3.7). De kenmerkende evaporieten van de Röt Formatie komen niet voor in het modelgebied. De opeenvolging van de Röt, Musschelkalk en Keuper formaties zijn in de meeste boringen in de Roerdalslenk aangetroffen. Deze opeenvolging is doorgaans goed te herkennen als een interval van relatief hoge amplitude reflecties. Het is echter niet mogelijk alle lithologische overgangen ook in de seismische data te herkennen. Op sommige seismische lijnen is wel de basis van de Röt Formatie (het Röt Kleisteen Laagpakket) en de basis van het Onder Röt Randzandsteen Laagpakket te vervolgen.

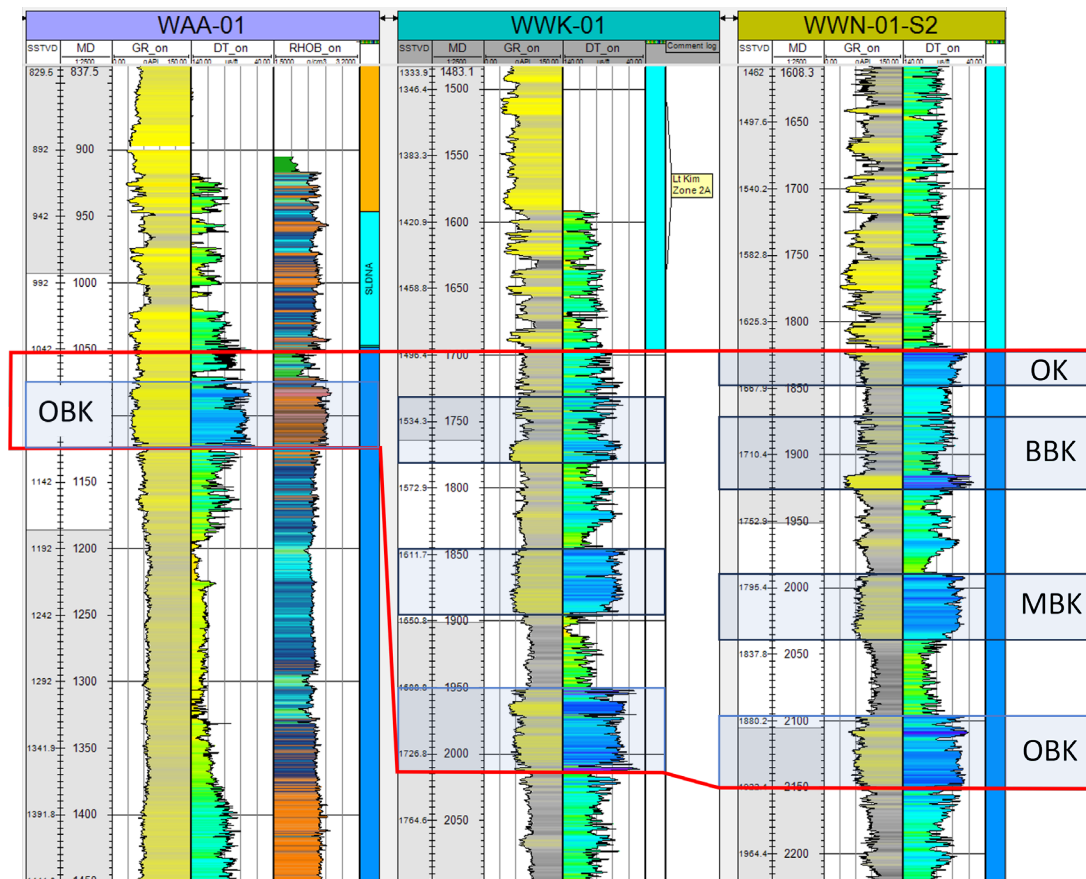
3.2.5 Onder-Midden Jura – Altena Groep

De Altena Groep, vernoemd naar het Land van Altena in Noord-Brabant, is van Onder en Midden-Jura ouderdom en in grote delen van het modelgebied aanwezig. De Altena Groep bestaat uit vijf formaties (van oud naar jong): de Formatie van Sleen, de Formatie van Aalburg, de Posidonia Schalie Formatie, de Formatie van Werkendam en de Formatie van Brabant. Deze eenheden vertonen een relatief simpele horizontale stapeling en zijn in boorgatmetingen goed te herkennen. De Posidonia Schalie Formatie weerspiegelt een belangrijke wereldwijde gebeurtenis, de Toarcian Oceanic Anoxic Event en is in de GR, DT en RHOB logs makkelijk te herkennen (Figuur 3.8).

De Formatie van Brabant vormt de bovenste eenheid van de Altena Groep en bestaat uit een cyclische opeenvolging van zandige kalkstenen en mergels. Het bovenste deel van de formatie is vaak weg geërodeerd waardoor met name de onderste laagpakketten nog aanwezig zijn (Figuur 3.9).



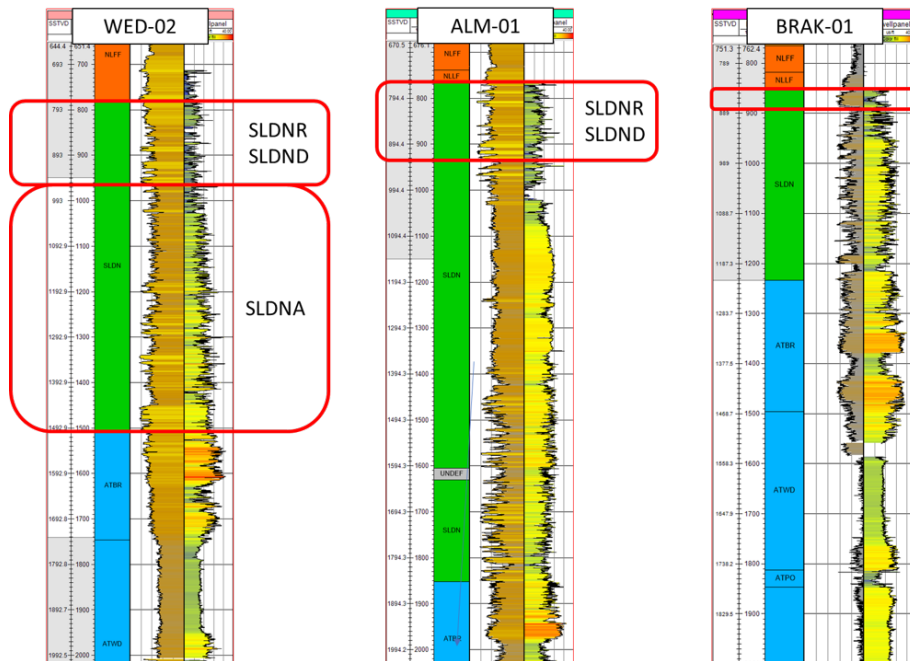
Figuur 3.8 De vijf formaties van de Altena Groep. De eenheden hebben karakteristieke logpatronen en zijn daarom goed te herkennen.



Figuur 3.9 De Formatie van Brabant met daarin aangegeven (in lichtblauw) de opeenvolgende kalksteen laagpakketten: de Onder Brabant Kalksteen (OBK), Midden Brabant Kalksteen (MBK), Boven Brabant Kalksteen (BBK) en Oisterwijk Kalksteen (OK) laagpakketten. De gesteenten tussen de kalkstenen is meer kleig en worden als mergel laagpakketten bestempeld. De basis Schieland Group is erosief en heeft in boring Wijk-Aalburg-01 (WAA-01) het grootste deel van de Formatie van Brabant geërodeerd waardoor alleen het OBK-laagpakket aanwezig is.

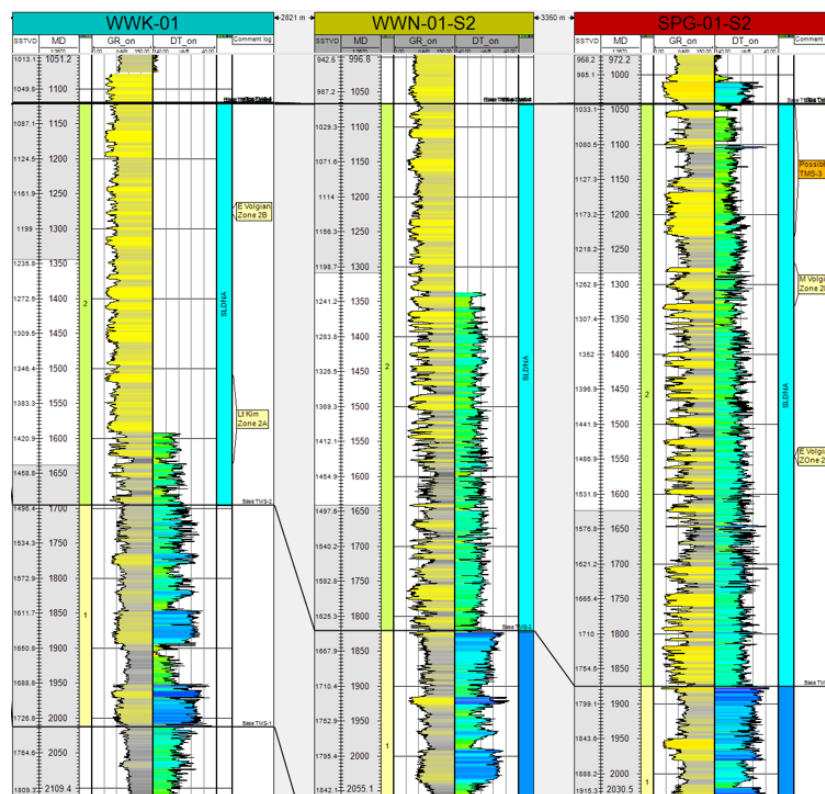
3.2.6 Boven Jura – Onder Krijt – Schieland en Rijnland Groepen

De Boven Jura – Onder Krijt Schieland Groep wordt in het modelgebied vertegenwoordigd door de Delfland Subgroep die slechts uit de Formatie van Nieuwerkerk bestaat. Deze formatie bestaat uit de opeenvolging van de Delft Zandsteen en Rodenrijs Kleisteen laagpakketten (Figuur 3.10).



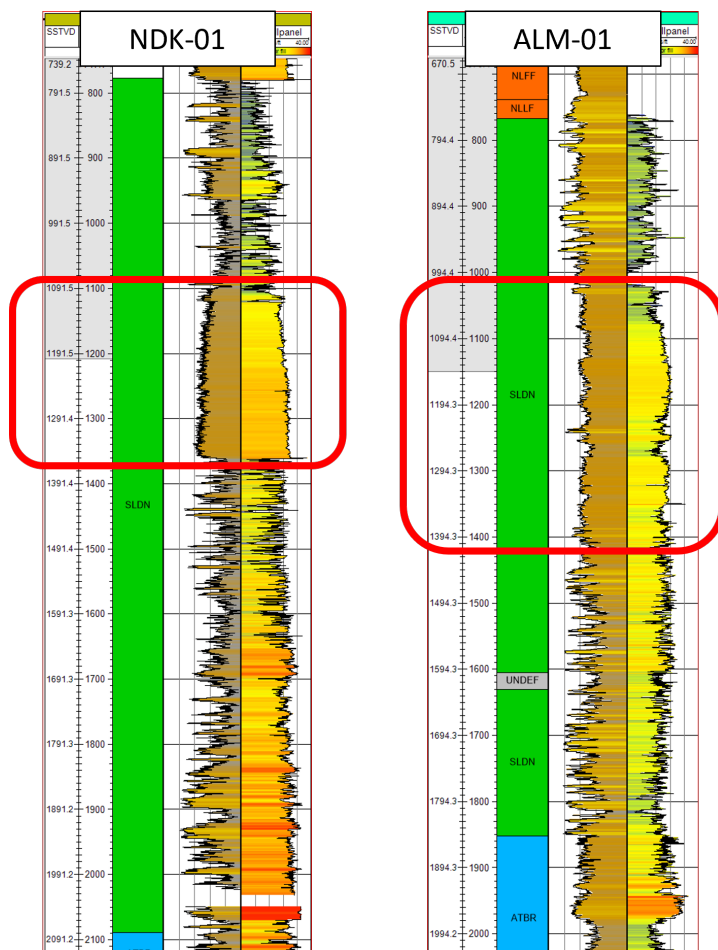
Figuur 3.10 De toekenning van de laagpakketten Delft Zandsteen (SLDND) en Rodenrijs Kleisteen (SLDNR) in o.a. de boringen WED-02, ALM-01 en BRAK-01, zoals vermeld op NLOG.

De ouderdom van het Laagpakket van Alblasserdam is moeilijk vast te stellen vanwege het voornamelijk fluviatiele afzettingsmilieu, maar aangenomen wordt dat de ouderdom in verschillende boringen kan uiteenlopen. In boring Oisterwijk-01 (OIW-01) lijkt het laagpakket concordant op de Formatie van Brabant uit de Altena Groep te liggen en dit zou daarmee binnen het modelgebied het oudste voorkomen zijn van het Laagpakket van Alblasserdam. In de boringen Waalwijk-01 (WWK-01) en Sprang-Capelle-01 (SPC-01) zijn laat Kimmeridgien en Volgien ouderdommen vastgesteld voor het Laagpakket van Alblasserdam op basis van dinoflagellatencysten (bron NLOG). Kennelijk zijn er mariene intervallen in het gebied rond Sprang, Sprang-Capelle en Waalwijk (Figuur 3.11). Deze mariene voorkomens roepen de vraag op of toekenning aan het Laagpakket van Alblasserdam juist is, omdat deze per definitie fluviatiel hoort te zijn (NLOG).



Figuur 3.11 Voorkomens van mariene intervallen (gelabeld) van Laat Kimmeridgien en Volgien ouderdom in het Alblasterdam Laagpakket (SLDNA) in het gebied rond Waalwijk en Sprang.

Een interessante afwijking in de lithologie van het Laagpakket van Alblasterdam doet zich voor in de boringen Nieuwendijk-01 (NDK-01) en Almkerk-01 (ALM-01). Ongeveer in het midden van het Laagpakket van Alblasterdam komt een ca. 300 meter dik interval voor met relatief constante GR en DT-waarden (Figuur 3.12). Deze intervallen contrasteren sterk met de rest van het laagpakket dat een wisselend logpatroon laat zien dat karakteristiek is voor zandsteen-kleisteel afwisselingen. De GR waarden van de afwijkende intervallen liggen tussen de 50 en de 75 API en de sonische snelheden (DT) tussen de 30 en de 50. Volgens de eindslip van boring NDK-01 bestaat het afwijkende interval uit zachte kleisteel met kalkige bijmenging. Uit palynologisch onderzoek aan enkele cuttings van boring ALM-01 is gebleken dat het afwijkende interval hoogst waarschijnlijk een estuariene afzetting vertegenwoordigd.

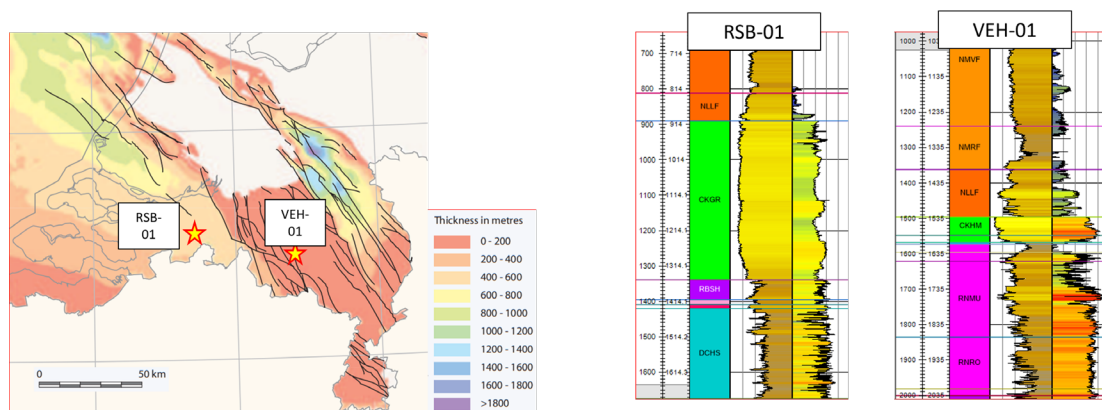


Figuur 3.12 Intervallen met afwijkende gesteenten in het Alblasserdam Laagpakket van de boringen NDK-01 en ALM-01. Deze 300-400 meter dikke intervallen bestaan uit zachte kleiëten die zijn afgezet in een estuarien (brak-water) milieu. De boven- en onderliggende delen tonen grillige logpatronen die typisch zijn voor zand-klei afwisselingen.

De Onder Krijt Rijnland Groep komt in het modelgebied bijna niet voor. Afzettingen met een Barremian – Albion ouderdom zijn geërodeerd in het Laat Krijt. Het aangrenzende West Nederlands Bekken ten noordwesten van de Roerdalslenk bevat wel dikke Rijnland Groep afzettingen.

3.2.7 Boven Krijt – Krijtkalk (Chalk) Groep

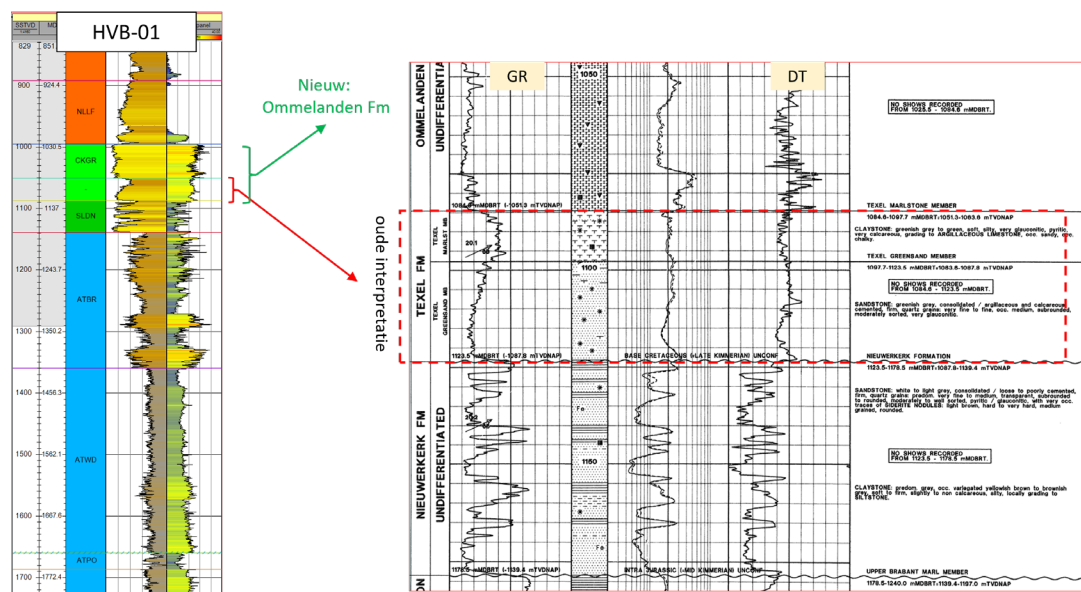
De Boven-Krijt afzettingen van de Krijtkalk Groep zijn in vrijwel het hele modelgebied aanwezig, het dikst op de flanken van de Roerdalslenk en erg dun in de as van de Roerdalslenk. Ten oosten van de Peelrandbreuk, op de Peel- en Venloblokken en op het Kempen Blok bestaat de Krijtkalk Groep gedeeltelijk uit siliciclastische sedimenten die zijn afgezet als syn-inversie en post-inversieafzettingen tijdens diverse Laat Krijt inversiefasen. In deze gebieden worden de namen van vergelijkbare eenheden uit Zuid-Limburg gebruikt, te weten de formaties van Aken, Vaals, Gulpen, Maastricht en Houthem.



Figuur 3.13 Overzicht van boringen RSB-01 en VEH-01. Opvalt dat de Krijtcalc Groep (lichtgroene kleur) dunner wordt in de as van de Roerdalslenk. De dikte kaart van de Krijtcalcgroep is aangepast naar Duin et al., 2006.

In de Roerdalslenk zijn de oudste afzettingen van de Krijtcalc Groep als gevolg van inversie afwezig en wordt enkel het bovenste deel van de Formatie van Ommelanden (Maastrichtien tot Turonien) en de Vroeg Paleocene (Danien) Formatie van Houthem (zie boring VEH-01 in Figuur 3.13) aangetroffen. Deze kalkige sedimenten zijn afgezet na de Laat Krijt (Subhercynische) inversiefase. Opvallend is het veelal gebrekkige of ontbrekende onderscheid tussen de formaties van Houthem (CKHM) en de Ommelanden (CKGR) van de Krijtcalc Groep. Bijvoorbeeld in boring Rijsbergen-01 (RSB-01) is de Formatie van Houthem niet geïnterpreteerd, terwijl op basis van seismiek deze onverstoord door lijkt te lopen vanaf boring Veldhoven (VEH-01).

In enkele boringen in de Roerdalslenk wordt echter een onderscheid gemaakt tussen de Formatie van Ommelanden met daaronder sedimenten met een zandiger karakter die oorspronkelijk als het Texel Greensand Laagpakket werden geïnterpreteerd (Figuur 3.14). Dit is bijvoorbeeld het geval in boring Hilvarenbeek-1 (HVB-01).



Figuur 3.14 Overzicht van de Jura-Krijt en Paleogene successie in put HVB-01. Rechts staat een extract van het “end of well” rapport van deze boring waarop is aangegeven dat het onderste deel van de Krijtcalc Groep toentertijd als Formatie van Texel (Texel Greensand Laagpakket) is

geïnterpreteerd. In de meest recente extractie uit dinoloket is dit interval als niet nader gedifferentieerde Krijtkalk Groep bestempeld.

Als deze interpretatie klopt, zou dat betekenen dat er ook pre- en/of syn-inversie afzettingen in de Roerdalslenk aanwezig zijn. Om dit te verifiëren is binnen dit project een kleine palynologische studie uitgevoerd op cuttings van put HVB-01. De resultaten zijn samengevat in Tabel 3.3: . De First Occurrence van de dinoflagellatencyst *Glaphyrocysta perforata* in het monster 1095 m, de aanwezigheid van *Chatangiella* spp. en de afwezigheid van typische oudere soorten als *Ovoidinium* spp., *Surculosphaeridium longifurcatum* en *Palaeohystrichophora infusorioides* ondersteunen een interpretatie als Formatie van Ommelanden. De Laat Paleocene – Vroeg Eocene ouderdom van het monster op 1000 m is gebaseerd op de dominante aanwezigheid van *Apectodinium* spp. Dit betekent dus dat er op biostratigrafische gronden geen reden is om een andere formatie dan de Formatie van Ommelanden te interpreteren in deze boring. In de basis blijkt deze dus een wat zandiger karakter te hebben, hetgeen te maken kan hebben met afzetting tijdens de laatste fase van de inversie (vroeg Maastrichtien).

Tabel 3.3 Ouderdomsinterpretatie van palynologisch onderzochte monsters van boring HVB-01.

Diepte monster	Veronderstelde lithostratigrafie	Ouderdom
1000	Formatie van Landen - Laagpakket van Gelinden	Paleoceen-Eoceen grens
1035	Formatie van Ommelanden	Laat Maastrichtien
1080	Formatie van Ommelanden	Laat Maastrichtien
1095	Krijtkalk Groep	Laat Maastrichtien
1110	Krijtkalk Groep	Maastrichtien
1120	Krijtkalk Groep	Maastrichtien

3.2.8 Kenozoïcum – Noordzee Groep

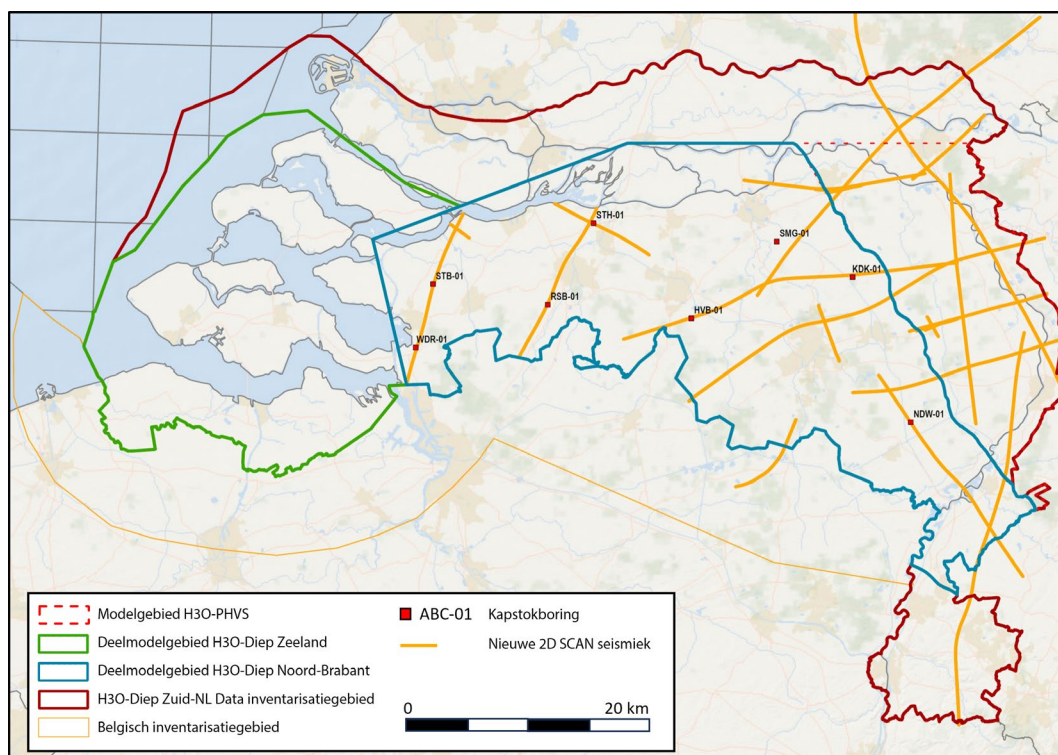
Het Kenozoïcum (met uitzondering van de Vroeg Paleocene Formatie van Houthem, zie paragraaf 3.2.6) wordt vertegenwoordigd door de Noordzee Groep. Deze is niet seismisch geïnterpreteerd in het H3O-Diep – Noord-Brabant deelmodelgebied, omdat deze al in het kader van andere H3O-projecten is gekarteerd en gemodelleerd. Hierbij is er vaak voor gekozen om de aansluiting te maken op de lithostratigrafische indeling zoals die in Vlaanderen wordt gehanteerd. Een overzicht en details hiervan worden gegeven in TNO – GDN, VITO & BGD (2023). In het deelmodelgebied H3O-Diep Zeeland is nog geen H3O-modellering van het Kenozoïcum uitgevoerd, daarom zijn deze eenheden daar nu wel seismisch gekarteerd. Omdat er nauwelijks (en niet overal) putcontrole is voor deze eenheden in Zeeland, wordt voor een verdere beschrijving, inclusief de lithostratigrafische inzichten verwezen naar Paragraaf 4.4 van dit rapport.

3.3 Seismic-to-well tie

Voor het seismic-to-well tie proces zijn alleen de nieuwe SCAN seismische lijnen gebruikt. Ten eerste omdat deze doorgaans de beste kwaliteit en resolutie hebben; ten tweede omdat de SCAN lijnen zo gepositioneerd zijn dat ze belangrijke exploratieboringen (de zogenoemde kapstokboringen, zie Figuur 3.15) met elkaar verbinden. Een aantal boringen binnen het 3D seismische data gebied (behorend bij de Waalwijk gasvelden) zijn reeds in eerdere (H3O- en andere) projecten gebruikt voor het maken van een seismic-to-well tie. Deze resultaten en inzichten worden in dit project gebruikt, maar hier niet verder behandeld.

3.3.1 Tijd-diepte relatie

Om de lithostratigrafische (her)interpretatie van de diepe boringen voor de seismische interpretatie te kunnen gebruiken, moet de verticale diepteschaal van de boorbeschrijvingen (in diepte) omgezet worden naar een verticale tijdschaal van de seismische lijnen (in tijd). Dit stelt de interpretator in staat de diepteligging van de stratigrafische niveaus in de boringen op de seismische lijnen te visualiseren. Om de diepteschaal om te zetten naar tijdschaal worden snelheidsdata uit boringen (sonic logs en/of checkshots) gebruikt; deze boringen vormen de kapstokboringen.



Figuur 3.15 Locatie van de kapstokboringen en de SCAN lijnen.

Het aanwijzen van goede kapstokboringen binnen het modelgebied is problematisch. Slechts 8 boringen in het inventarisatiegebied bevatten checkshots en/of complete sonic logs en liggen gunstig ten opzichte van nieuwe SCAN lijnen (HVB-01, KDK-01, SMG-01, RSB-01, STH-01, NDW-01). HSW-01, ALM-01; Figuur 3.15). Voor andere boringen is de loginformatie in de boringen incompleet en kan de tijd-diepte relatie alleen gebaseerd worden op het snelheidsmodel VELMOD 3.2 (Paap et al., 2024). Dit model geeft alleen informatie over het bereik van het maaiveld tot aan de basis Zechstein Groep (of BPU); voor eenheden tussen de

BPU en de top van de Formatie van Zeeland is een V0 snelheid van 3444 m/s aangehouden (zie ook paragraaf 5.3).

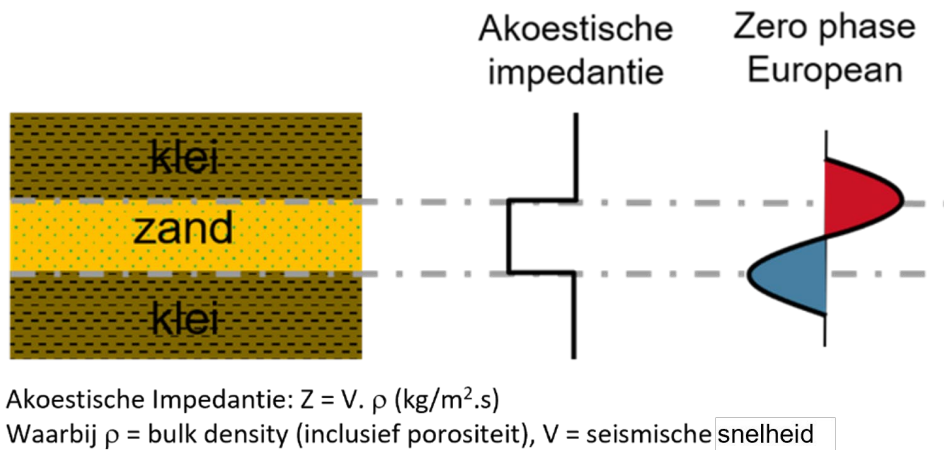
In paragraaf 3.3.3 worden de resultaten van de seismic-to-well tie studie gepresenteerd voor zes boringen die representatief zijn voor een bepaald gebied of stratigrafisch bereik. Alle boringen liggen op (of zeer nabij) de (seismische) lithostratigrafische correlatieprofielen.

3.3.2 Synthetische seismische data

Snelheids- en dichtheidsdata uit boringen wordt gebruikt om synthetische seismogrammen te creëren. Synthetische seismogrammen simuleren de te verwachten seismische response en dienen ter herkenning van lithostratigrafische overgangen en ondersteunen daarmee de seismische interpretatie. De interpretaties van de eenheden in de diepe boringen worden vervolgens gebruikt voor lithostratigrafische correlatieprofielen van de boringen langs de SCAN seismische lijnen. De geïnterpreteerde SCAN seismische lijnen vormen vervolgens het uitgangspunt (conceptuele seismische profielen) voor de interpretatie binnen het verdere modelgebied.

De belangrijkste input voor synthetische seismiek zijn de sonic velocity (DT) en density (RHOB) logs; het product van beide bepaalt de akoestische impedantie. Sommige boringen hebben ook andere snelheidsdata zoals checkshots en/of een Vertical Seismic Profile (VSP). Indien er geen RHOB-log is, kan deze met Petrel berekend worden met Gardner's equation, die een correlatie tussen beide parameters veronderstelt. De reflectiecoëfficiënt (de sterkte van het impedantiecontrast) wordt geconvolveerd met een seismische golf die qua frequentie/ golflengte overeenkomstig is met de oorspronkelijke seismische data langs het boortraject. Dit levert een synthetisch seismisch signaal op. Op basis van de visuele correlatie tussen de oorspronkelijke en synthetische seismiek (beide verticaal langs het boorgat weergegeven) kan een keuze gemaakt worden welke lithostratigrafische overgangen als reflecties in de seismiek vervolgd kunnen worden.

Om de seismische reflectie te kunnen duiden als lithologische overgangen wordt de "European zero phase/negative polarity" conventie gehanteerd (Figuur 3.16). Hierbij geldt dat een neerwaartse overgang van gesteenten met een lage naar hoge dichtheid gekenmerkt wordt door een positief impedantiecontrast ("hard-kick") en een negatieve amplitude. Deze negatieve amplitudes worden in blauw weergegeven. "Soft kicks" behorend bij een positief impedantiecontrast, geven positieve reflecties en worden in rood weergegeven. Zero phase geeft aan dat de maximale amplitude exact samen valt met de lithologische grens.



Figuur 3.16 Gehanteerde seismische conventie.

3.3.2.1 Beperkingen van de seismic-to-well tie

Het is zelden dat het seismic-to-well tie proces leidt tot een exacte match tussen de synthetische en echte seismische data. Vaak kan slechts over een bepaald dieptebereik een goede match worden verkregen. Dit heeft een (groot) aantal oorzaken, waarvan de belangrijkste zijn:

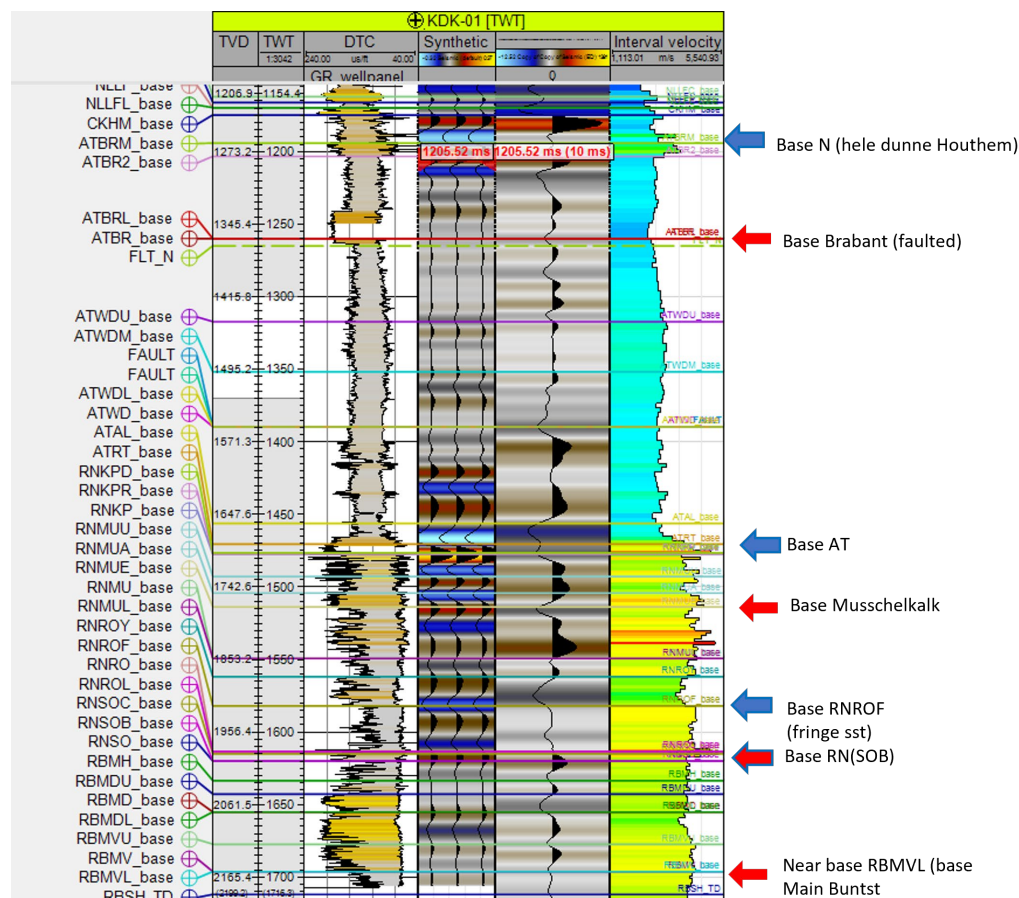
- De gekozen frequentie correspondeert niet met die van de echte seismiek. In echte seismiek varieert de frequentie met diepte en is afhankelijk van lithologie (zgn. earth filtering effect);
- De gekozen golfvorm correspondeert niet met die van de echte seismiek. Meestal is deze beter in overeenstemming met het ingangssignaal gebruikt bij de seismische acquisitie, maar minder goed met de werkelijke golfvorm omdat deze verandert in de ondergrond als gevolg van interferentie en afbuigingen;
- Het werkelijke seismische signaal bestaat uit meerdere golfsoorten, t.w. transversale (S) en longitudinale (P) golven. Het synthetische signaal gaat uit van alleen P golven;
- De sonische snelheden gemeten in het boorgat zijn voornamelijk representatief voor de horizontale snelheid van het gesteente rond het boorgat. De daadwerkelijk akoestische snelheid bestaat uit meerdere componenten. Synthetisch verkregen impedantiecontrasten (en dus seismische reflectoren) kunnen dus afwijken van de echte seismiek.

Als gevolg van deze beperking simuleren de synthetische seismogrammen de te verwachten seismische response dan ook maar ten dele. Ze kunnen echter wel gebruikt worden om een weloverwogen keuze te maken over hoe en welke lithostratigrafische overgangen in de seismiek te herkennen zijn en ondersteunen dus het seismische interpretatieconcept. De afbeeldingen getoond in de volgende paragraaf (resultaten) zijn vooral bedoeld om die gemaakte keuze te illustreren.

3.3.3 Resultaten

3.3.3.1 Keldonk-01 (KDK-01)

Boring KDK-01 (Figuur 3.17) is gelegen aan de noordostrand van het modelgebied net ten zuiden van de Peelrandbreuk (zie voor locatie Figuur 3.15), is representatief voor dit ondiepere deel van de Roerdalslenk en heeft bijna het gehele mesozoïsche interval aangeboord. Boring KDK-01 heeft de volgende boorgatmetingen vanaf ca. 150 m tot eind diepte (TD) in het Trias: gamma Ray (GR), sonic (DT) en een density (RHOB).

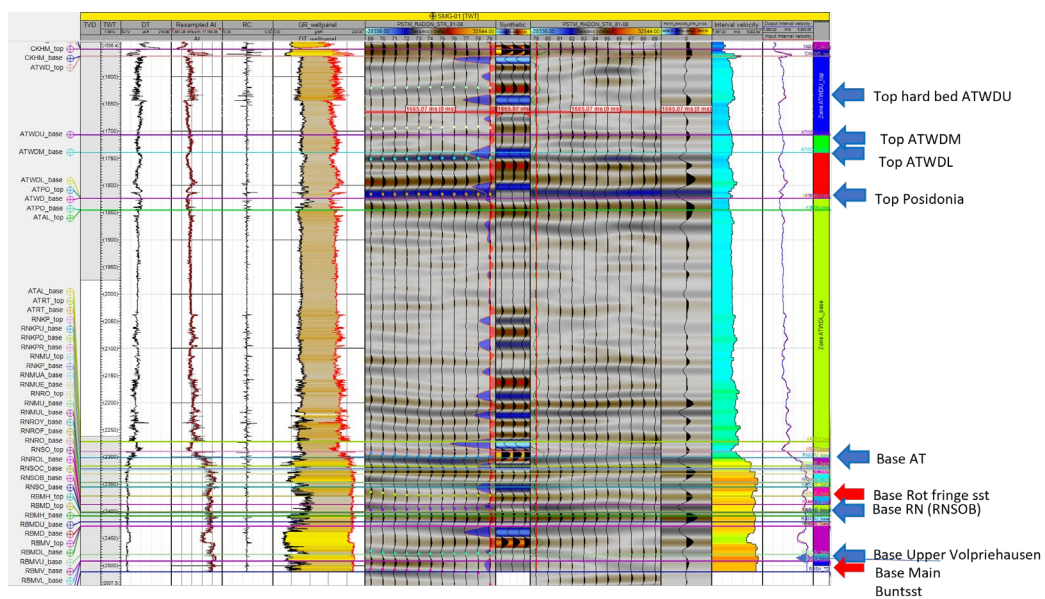


Figuur 3.17 Synthetisch seismogram van boring Keldonk-01 (NLOG-nr. KDK-01, DINO-nr. B51E0173). De gecombineerde gamma-sonic log geeft een goed beeld van de klei (grijs)/zand (geel) ratio en de competentie van het gesteente. Samen met de synthetische seismische log kan dat gebruikt worden om een voorspelling te doen waar belangrijke reflecties optreden. Voor optimalisatie van de tijd-diepte relatie zijn naast de sonic ook markante well tops gebruikt ter kalibratie. Rechts van de log is de seismische signatuur (trog = blauw; piek = rood) van de voor dit project belangrijke lithostratigrafische overgangen weergegeven (well tops zijn uiterst links aangegeven). Zie Tabel 3.2 voor de betekenis van lithostratigrafische codes.

3.3.3.2 Sint-Michielsgestel-01 (SMG-01)

Boring SMG-01 (Figuur 3.18) is gelegen aan de noordostrand van het modelgebied net ten zuiden van de Peelrandbreuk (zie voor locatie Figuur 3.15) en heeft een GR, DT en afgeleide

density gebaseerd op Gardner's equation (default waarden). De tijd-diepte relatie is gebaseerd op checkshots, omdat deze de beste resultaten vertoont voor key grensvlakken zoals de basis Krijtkalk Groep. Het is moeilijk om een goede seismic-to-well tie te maken voor het hele mesozoïsche bereik. Dit komt waarschijnlijk door variabele frequenties in de echte seismiek en door oblique aansnijding met breuken die het seismisch signaal verstoren (in de synthetische seismiek wordt het effect van breuken niet meegenomen). Daarom is de focus gelegd op het Trias interval. De top Trias (RNKPU of RNKPD = basis Altena Groep) is goed te vervolgen als hard-kick (Figuur 3.18). De basis van het RN interval wordt gevormd door de RNSOB boven de Hardegens Unconformity (of beter base Sollingen Unc.) en is te zien als soft-kick, maar soms ook als hard-kick. De opeenvolging van de formaties van Volpriehausen, Detfurth en Hardegens is herkenbaar als een hoog reflectief interval, maar individuele lithostratigrafische overgangen zijn in de seismiek moeilijk te vervolgen.

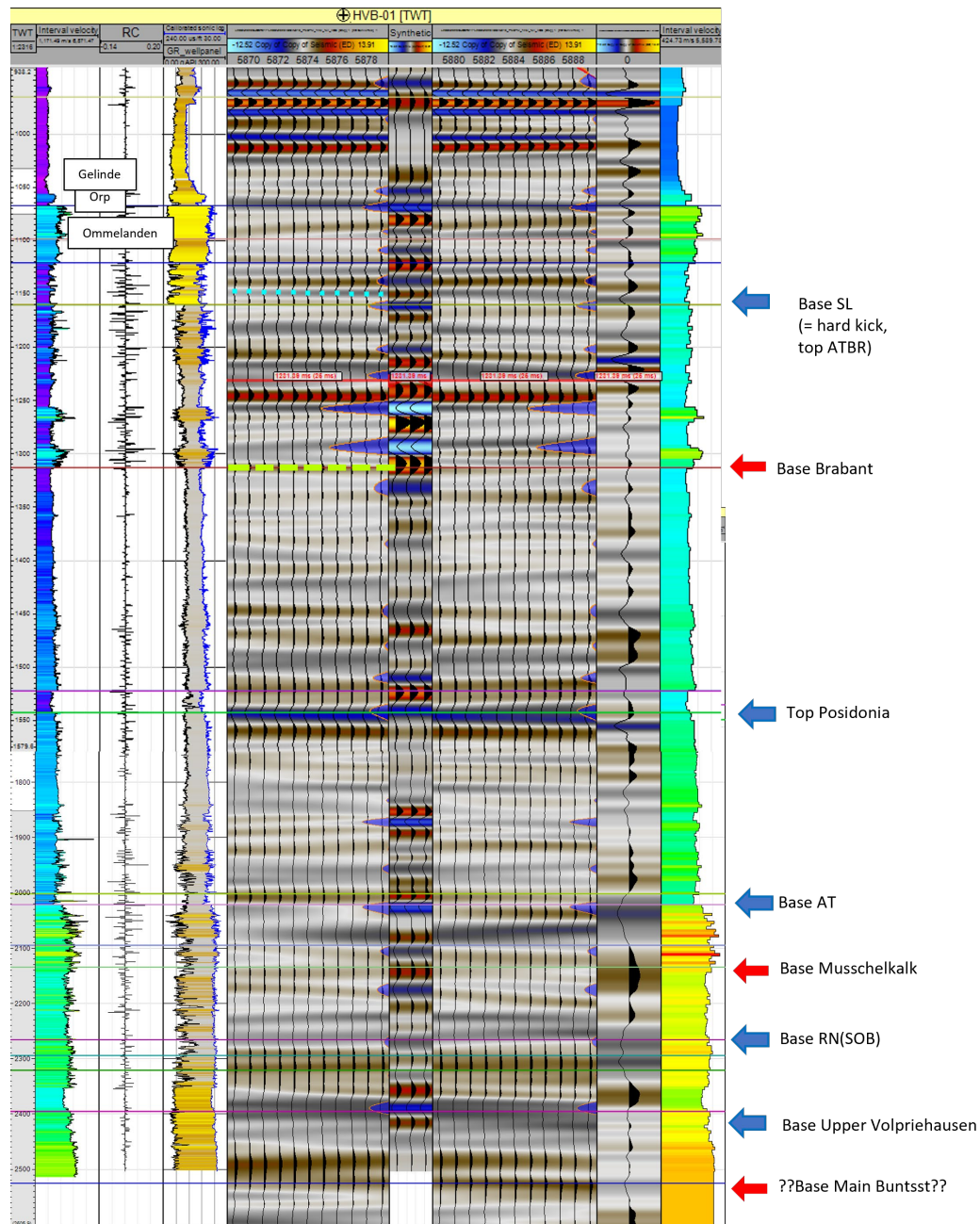


Figuur 3.18 Synthetisch seismogram van boring Sint-Michielsgestel-01 (NLOG-nr. SMG-01, DINO-nr. B45D0061). De gecombineerde gamma-sonic log geeft een goed beeld van de klei (grijs)/zand (geel) ratio en de competentie van het gesteente. De interval velocity is afgeleid van checkshots en de dichtheid is afgeleid m.b.v. Gardner's equation. De akoestische impedantie (productdichtheid en snelheid) en reflectiecoëfficiënt vormen de input voor de synthetische seismische log die gebruikt kan worden om een voorspelling te doen waar belangrijke reflecties optreden. Rechts van de log is de seismische signatuur (trog =blauw; piek =rood) van de voor dit project belangrijke lithostratigrafische overgangen weergegeven (well tops zijn uiterst links weergegeven). Zie Tabel 3.2 voor de betekenis van lithostratigrafische codes.

De basis van de Altena Groep (AT) is gekenmerkt door een goed te vervolgen trog (blauw). De basis van de organisch rijke Posidonia Formatie correspondeert met een piek (rood). Op basis van de well tie blijkt dat de top van de Posidonia Schalie Formatie ongeveer correspondeert met een sterke trog die ofwel wordt veroorzaakt door een carbonaatsniveau in de basis van de bovenliggende Werkendam Formatie of door carbonaatgesteenten (zgn. “doggers”) in de top van de Posidonia Schalie. Deze carbonaten kunnen sterke contrasten in akoestische en andere eigenschappen veroorzaken (zie ook Nelskamp et al., 2015). De sterke trog (Figuur 3.18) wordt daarom aangeduid met “near” top Posidonia. De hele formatie is in het algemeen rond de 30 m dik. Als de resolutie van de seismiek hoog genoeg is kunnen zowel de top en basis reflecties herkend worden. Bij lagere seismische resolutie kan het seismische signaal van basis en top samenvallen (als gevolg van constructieve interferentie

van seismische golven) wat leidt tot een sterke reflectie die niet direct aan de basis of top toe te kennen is.

3.3.3.3 Hilvarenbeek-01 (HVB-01)



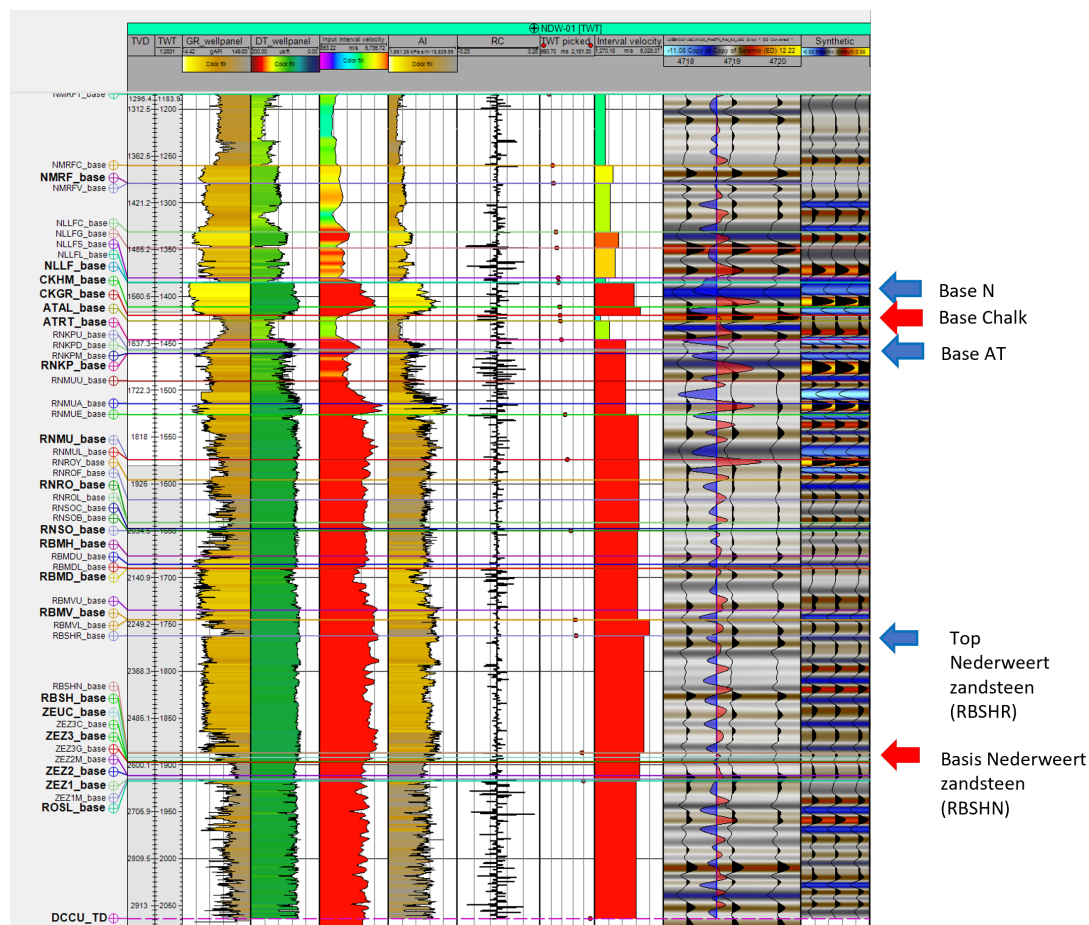
Figuur 3.19 Synthetisch seismogram van boring Hilvarenbeek-01 (NLOG-nr. HVB-01, DINO-nr. B50F0543) voor het Bovenste Jura – basis Noordzee Groep deel (boven) en het Trias-Jura deel (onder). De gecombineerde gamma-sonic log geeft een goed beeld van de klei (grijs)/zand (geel) ratio en de competentie van het gesteente. De interval velocity is afgeleid van checkshots en de dichtheid is afgeleid m.b.v. Gardner's equation. De akoestische impedantie (productdichtheid en snelheid) en

reflectiecoëfficiënt vormen de input voor de synthetische seismische log die gebruikt kan worden om een voorspelling te doen waar belangrijke reflecties optreden. Rechts van de log is de seismische signatuur (trog = blauw; piek = rood) van de voor dit project belangrijke lithostratigrafische overgangen weergegeven (well tops zijn uiterst links weergegeven). Zie Tabel 3.2 voor de betekenis van lithostratigrafische codes.

Boring HVB-01 (Figuur 3.19) is gelegen in de Roerdalslenk (zie voor locatie Figuur 3.15) en heeft een GR, DT en afgeleide density gebaseerd op Gardner's equation (default waarden). De tijd-diepte relatie is gebaseerd op checkshots in combinatie met tijd-diepte paren van evidente well markers. De Formatie van Brabant (ATBR) is een hoog reflectief seismisch pakket dat gekenmerkt wordt door 3 à 4 sets van harde reflectoren in de top van de Altena Groep. Boven de ATBR toont de Formatie van Schieland (SLDN) een hoger frequent maar lager amplitude reflectiepatroon. Een goede seismic-to-well tie is moeilijk omdat de seismiek verstoord is door (meerdere) breuken en steile reflectoren. De basis van de Posidonia Schalie Formatie wordt ter plekke van deze boring het best vertegenwoordigd door een trog (blauw).

3.3.3.4 Nederweert (NDW-01)

Boring NDW-01 (Figuur 3.20) is gelegen in de oostelijke Roerdalslenk (zie voor locatie Figuur 3.15). Voor deze boring zijn geen checkshots beschikbaar en is de tijd-diepte relatie afgeleid van sonic tics uit de composite well log. NDW-01 ligt op de kruising van drie seismische lijnen (1, 2, 3 in Figuur 3.20) met wisselende frequentie-inhoud, daarom is het moeilijk een



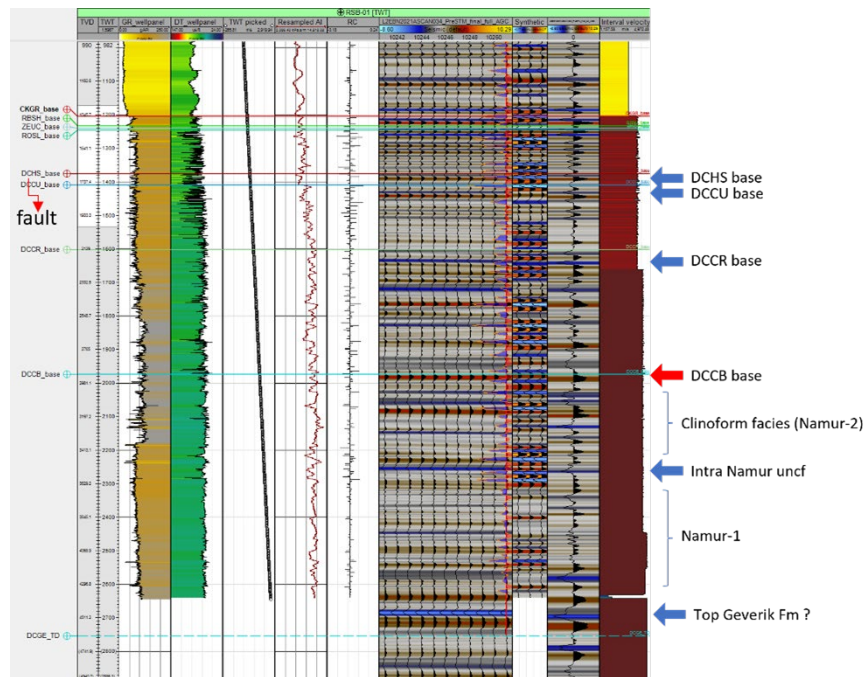
Figuur 3.20 Synthetisch seismogram van boring Nederweert-01 (NLOG-nr. NDW-01, DINO-nr. B58A0062). De gamma-ray log geeft een goed beeld van de klei (grijs)/zand (geel) ratio en de competentie van het gesteente. De akoestische impedantie (productdichtheid en snelheid) en reflectiecoëfficiënt vormen de input voor de synthetische seismische log die gebruikt kan worden om een voorspelling te doen waar belangrijke reflecties optreden. Rechts van de log is de seismische signatuur (trog = bouw; piek = rood) van de voor dit project belangrijke lithostratigrafische overgangen, weergegeven (well tops zijn uiterst links weergegeven). Zie Tabel 3.2 voor de betekenis van lithostratigrafische codes.

representatieve seismic-to-well tie te kiezen. Voor de synthetische seismiek is een wavelet met 40 Hz frequentie gekozen, overeenstemmend met de frequentie inhoud van SCAN lijn 30 (1 in Figuur 3.20). Dit garandeert echter geen goede correlatie. Slechts enkele grensvlakken (waaronder basis en top van de Nederweert zandsteen) kunnen met enige zekerheid geïdentificeerd worden.

3.3.3.5 Rijsbergen-01 (RSB-01)

RSB-01 (Figuur 3.21) is gelegen op het Kempen Blok (zie voor locatie Figuur 3.15) en is één van de weinige boringen die het gehele Westfalen aangeboord heeft en eindigt diep in de Formatie van Epen (TD = 4644,5 m), vlak boven de top van de Formatie van Zeeland. De put heeft goede GR en DT-logs; de density is gebaseerd op Gardner's equation (default waarden). Voor de TD-relatie wordt gebruik gemaakt van een bestaande TZ-file (op dit moment is niet bekend waar deze op gebaseerd is, maar het vermoeden bestaat dat dit een afgeleide is van de originele sonic log). Lithostratigrafische grenzen zijn moeilijk te plaatsen

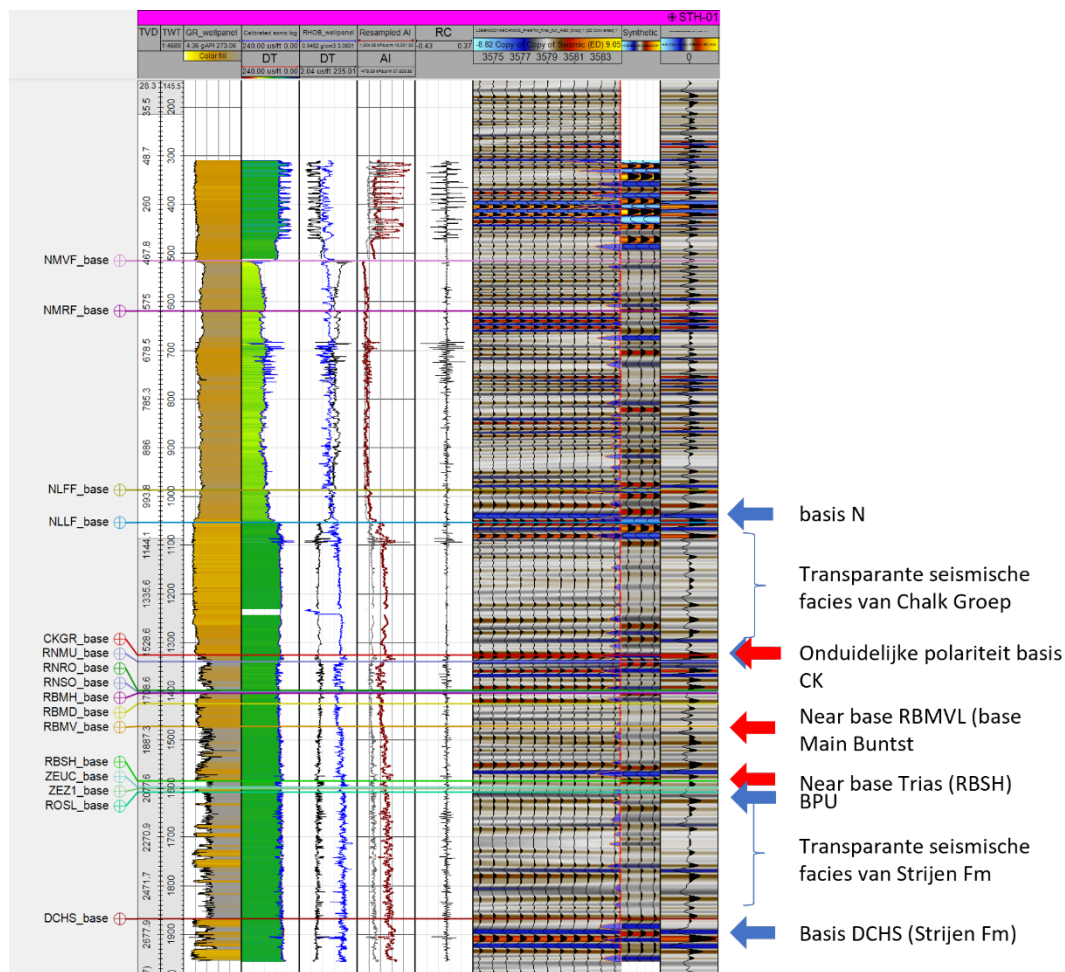
in de synthetische seismiek, maar er zijn wel seismische facies te identificeren zodat voor het interpreteren van lithostratigrafische eenheden deze seismic-to-well tie enigszins bruikbaar is. De put bevat een breuk die ervoor zorgt dat de Formatie van Maurits een te geringe dikte vertoont (fault in Figuur 3.21); dit is niet eerder opgemerkt.



Figuur 3.21 Synthetisch seismogram van boring Rijsbergen-01 (NLOG-nr. RSB-01, DINO-nr. B50A0182). De gamma-ray log geeft een goed beeld van de klei (grijs)/zand (geel) ratio en de competentie van het gesteente. De akoestische impedantie (productdichtheid en snelheid) en reflectiecoëfficiënt vormen de input voor de synthetische seismische log die gebruikt kan worden om een voorspelling te doen waar belangrijke reflecties optreden. Rechts van de log is de seismische signatuur (trog = blauw; piek = rood) van de voor dit project belangrijke lithostratigrafische overgangen weergegeven (well tops zijn uiterst links weergegeven). Zie Tabel 3.2 voor de betekenis van lithostratigrafische codes.

3.3.3.6 Steelhoven-01 (STH-01)

STH-01 (Figuur 3.22) is gelegen in de meest zuidoostelijke hoek van het West-Nederlands Bekken, net ten noorden van de zuidelijke randbreuk van dit bekken (zie voor locatie Figuur 3.15). De boring is gelegen op een composite seismische lijn van SCAN lijn 32 en 33. Checkshots zijn gebruikt voor de tijd-diepte relatie. Ze zorgen voor een goede plaatsing van markante well-tops zoals de basis Chalk die in de seismiek ook te zien is als een duidelijke unconformity onder het Kenozoïcum. De TD-relatie op basis van Velmod 3.1 is hier niet goed bruikbaar. Ondanks dat individuele reflecties niet perfect oplijnen, is de frequentie nagenoeg gelijk en laat de synthetische seismiek vergelijkbare seismische facies zien, d.w.z. dat voor het interpreteren van lithostratigrafische eenheden deze seismic-to-well tie goed bruikbaar is.

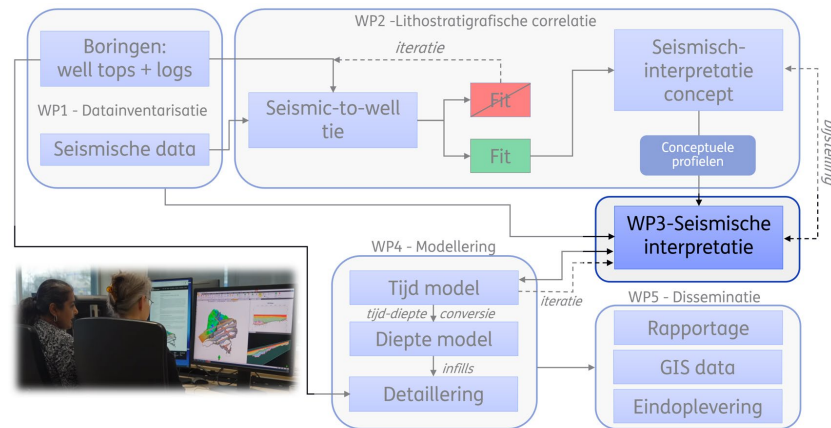


Figuur 3.22 Synthetisch seismogram van boring Steelhoven-01 (NLOG-nr. STH-01, DINO-nr. B44D0541). De gamma-ray log geeft een goed beeld van de klei (grijs)/zand (geel) ratio en de competentie van het gesteente. De akoestische impedantie (productdichtheid en snelheid) en reflectiecoëfficiënt vormen de input voor de synthetische seismische log die gebruikt kan worden om een voorspelling te doen waar belangrijke reflecties optreden. Rechts van de log is de seismische signatuur (trog = blauw; piek = rood) van de voor dit project belangrijke lithostratigrafische overgangen weergegeven (well tops zijn uiterst links weergegeven). Zie Tabel 3.2 voor de betekenis van lithostratigrafische codes.

3.4 De profielen

Voor de lithostratigrafische correlatieprofielen (bijlage 1) zijn initiële seismische interpretaties van zes SCAN seismische lijnen gemaakt die de verbreiding, diepte en structuur van de te interpreteren lithostratigrafische eenheden weergeven. Alle profielen zijn ondersteund door de hier getoonde seismic-to-well tie analyses waarbij reflectiekenmerken aan de te interpreteren grensvlakken zijn toegekend. Bij de seismische interpretatie zijn deze concepten vervolgens op een regionale schaal doorgevoerd en in de regionale geologische context geplaatst.

4 Seismische interpretatie



Dit hoofdstuk presenteert de interpretaties van de geselecteerde seismische lijnen in het modelgebied. Bij de interpretatie van de kenozoïsche (alleen voor Zeeland), mesozoïsche en jongste paleozoïsche eenheden is een zo groot mogelijke dekkingsgraad nagestreefd om de (latere) modellering zo goed mogelijk te kunnen sturen. Alleen als de kwaliteit van de seismische data laag is en dientengevolge de interpretatie een te hoge onzekerheid kent, zijn lijnen uitgesloten van de interpretatie. Ook is een voorlopig breukenmodel samengesteld. Op basis van het voortschrijdend inzicht is de eerste interpretatie van grensvlakken en breuken, zoals getoond in de lithostratigrafische correlatieprofielen, bijgesteld en verbeterd.

4.1 Aanpak

Bij de interpretatie van de seismische data wordt in eerste instantie uitgegaan van de reeds toegekende lithostratigrafische indeling in de boringen. Vanwege de vaak beperkte verticale resolutie (~15-30 m) van de seismische data, de grote verschillen in resolutie tussen de seismische campagnes en het gebrek aan sterke impedantiecontrasten, kunnen niet alle (en niet altijd overal) grensvlakken van hydrogeologische modeleenheden seismisch geïnterpreteerd worden. Daarom is de keuze gemaakt om slechts die grensvlakken te interpreteren die:

- sterke impedantiecontrasten voorstellen, of
- belangrijke discordanties vormen, of
- die gebruikt kunnen worden als stuurvlakken bij de modellering van andere grensvlakken.

Voor de seismic-to-well tie is voornamelijk gekeken naar de karakteristieken van de seismische amplitude (sterkte en polariteit) en de frequentie en continuïteit van de reflecties. Lage amplitude (transparante) intervallen zijn vaak indicatief voor relatief homogene pakketten en hoge amplitude intervallen geven sterk wisselende lithologie aan.

Voor de seismische interpretatie is het verder belangrijk de onderlinge relatie van reflectiepatronen van de verschillende eenheden te beschouwen:

- Truncatie of toplap: indicatief voor hoek- en/of erosiediscordanties;
- Downlap: indicatief voor bijvoorbeeld prograderende clinoforms;
- Baselap: indicatief voor bijvoorbeeld opvulling van hellend substratum.

Op basis van deze criteria kunnen 28 seismische eenheden worden onderscheiden die globaal overeenkomen met lithostratigrafische formaties en laagpakketten. Alleen in geval van grote dikte (>200 m) kan in de seismische data een onderverdeling op laagpakket (member) niveau gemaakt worden (bijvoorbeeld binnen de Krijt Groep of binnen de Breda Subgroep).

De definitieve seismische interpretaties zijn omgezet naar puntensets (in TWT) en voor alle grensvlakken opgeleverd als pdf-kaarten (bijlage 1) en als ArcGIS Pro Project (als geopackage in bijlage 2). Deze puntensets vormen de input voor het modeleren van grensvlakken. De kleurschaal van deze puntensets geeft een goede indicatie van het diepteverloop en de structuur van de grensvlakken.

In de volgende paragrafen zijn de beschrijvingen gegroepeerd naar Paleozoïcum, Mesozoïcum en Kenozoïcum.

4.2 Paleozoïcum

Het Paleozoïcum komt binnen het H30-Diep Zuid-NL modelgebied in twee dieptebereiken voor.

Binnen de Roerdalslenk ligt het Paleozoïcum dieper dan 5 km en is de seismische resolutie op zowel oude seismische lijnen als ook op nieuwe en/of herbewerkte SCAN seismische lijnen erg laag. Dit uit zich in onregelmatige reflectiepatronen en lage seismische amplitudes, waardoor het niet mogelijk is grensvlakken lateraal te vervolgen. Het is onduidelijk of dit komt door kleine breuken in het Carboon die het signaal verstoren of door onregelmatige verbreiding van koollagen (of beide). Ook natuurlijke filtering speelt hier een rol doordat veel akoestische energie wordt geabsorbeerd door kenozoïsche en mesozoïsche lagen (seismic blanketing). Verder hebben de hellende Carboonlagen onder de BPU verschillende diktes, waardoor de interferentie tussen het seismisch golffront en de laagvlakken lateraal sterk kan verschillen.

Binnen de Roerdalslenk is er slechts één boring (NDW-01) die het Carboon (Westfaal) aangeboord heeft en voor deze put is geen goede seismic-to-well tie te maken. Afhankelijk van de kwaliteit van de seismiek en de diepteligging kunnen soms de top van het Dinantien (top Formatie van Zeeland) en de basis van het Westfalien (basis Caumer Subgroep) geïnterpreteerd worden. Al met al vormt dit een te magere basis voor een betrouwbare, systematische kartering van het Paleozoïcum binnen de Roerdalslenk.

In het westelijk deel van het modelgebied ligt het Carboon minder diep begraven. Op dit zogenoemde Kempen Blok (in zowel Noord-Brabant als Zeeland) is het Mesozoïcum onder de Krijt Groep vrijwel afwezig en is het wel mogelijk diverse seismostratigrafische eenheden in het Carboon te onderscheiden, zeker op de nieuwe SCAN lijnen en de herbewerkte SCAN lijnen. Vooral in de Provincie Zeeland is de kwaliteit van de herbewerking zeer hoog en is het Carboon interval door de ondiepe ligging (gemiddeld ~1-3 km) goed gevisualiseerd. Op het Kempen Blok zijn acht boringen (twee in het offshore gebied; zie hoofdstuk 2) die het Carboon (en soms Devoon) hebben aangeboord. Ondanks dat het aantal boringen beperkt is,

helpen deze wel om een koppeling te maken tussen de lithostratigrafische onderverdeling van het Carboon op formatieniveau en de bijbehorende seismische facies (zie seismic-to-well- tie in hoofdstuk 3). Deze seismische facies zijn vaak niet scherp begrensd en het seismische karakter van de grensvlakken (piek of trog) is niet eenduidig. De geïnterpreteerde grensvlakken worden daarom aangeduid met de toevoeging “near”. Ook moet worden opgemerkt dat sommige lithostratigrafische putinterpretaties niet correct zijn en op basis van de seismische interpretatie zijn bijgesteld (zie hoofdstuk 3). Hieronder volgt een beschrijving van de seismische eenheden uit het Carboon (Kolenkalk en Limburg groepen) en de grensvlakken op het Kempen Blok.

Tabel 4.1 Overzicht van geïnterpreteerde Carboon grensvlakken op het Kempen Blok (van jong naar oud). De kleurconventie is geldig voor alle in deze paragraaf getoonde seismische profielen. De kolom “Total length” is indicatief voor de omvang van de verbreiding en/of de mogelijkheid het grensvlak goed te interpreteren. De kolommen Z min en Z max zijn indicatief voor het dieptebereik (in ms).

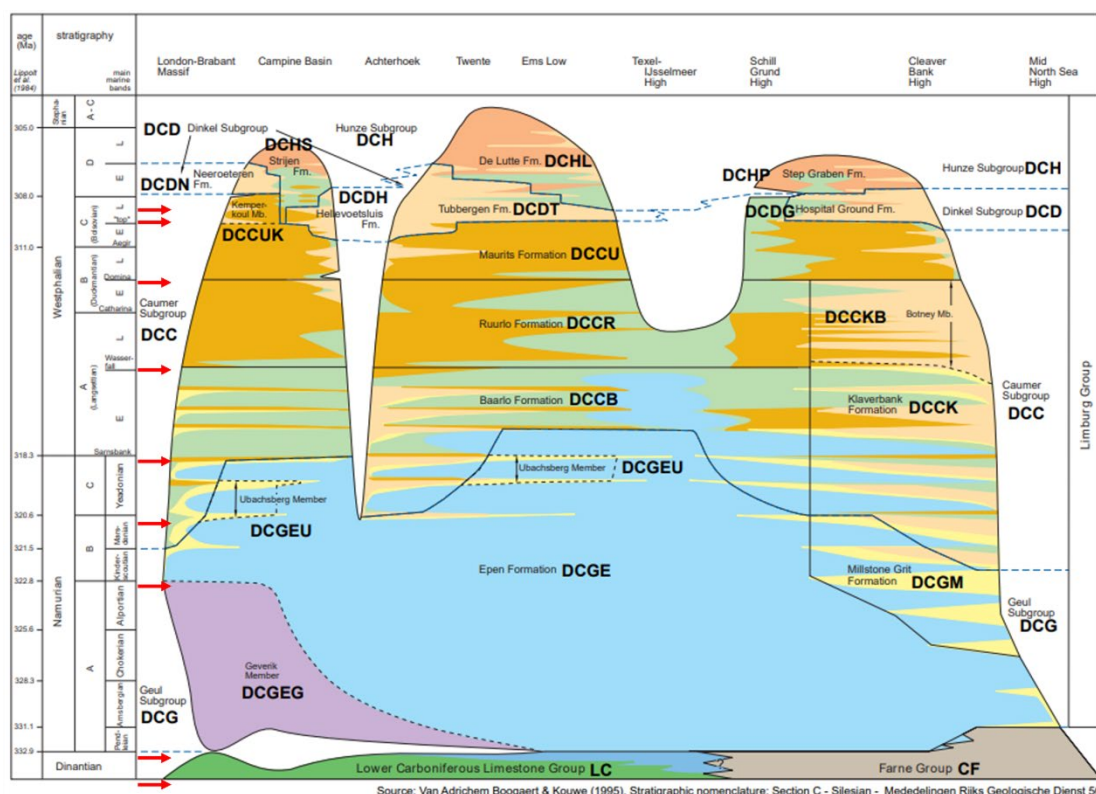
Name	Tracking feature	Total length (km)	Z min	Z max	Horizon type
BPU	Peak or troughs	29	-2758.02	-819.86	Erosional
base DCHS (Strijen)	Peak or troughs	21	-2303.82	-1079.87	Base
base DCDH (Hvsluis)	Peak or troughs	28	-2508.41	-1080.23	Base
base DCDU (Maurtis)	Peak or troughs	34	-2833.55	-755.79	Base
base DCCR(Ruurlo)	Peak or troughs	48	-3231.12	-909.59	Base
base DCCB(Baarlo)	Peak or troughs	55	-3676.37	-864.47	Conformable
intra Namurian Unconf (Namurian1-2)	Troughs	72	-3894.90	-932.47	Erosional
top Geverik (DCGE)	Peak or troughs	45	-3855.17	-1505.12	Conformable
near top CL (top Din)	Troughs	99	-4745.62	-692.94	Conformable
near base CL	Peaks	59	-4875.36	-454.32	Conformable
Basis Devoon	Peak or troughs	12	-4451.63	-944.48	Base

4.2.1 Dinantien (Formatie van Zeeland – CLZL)

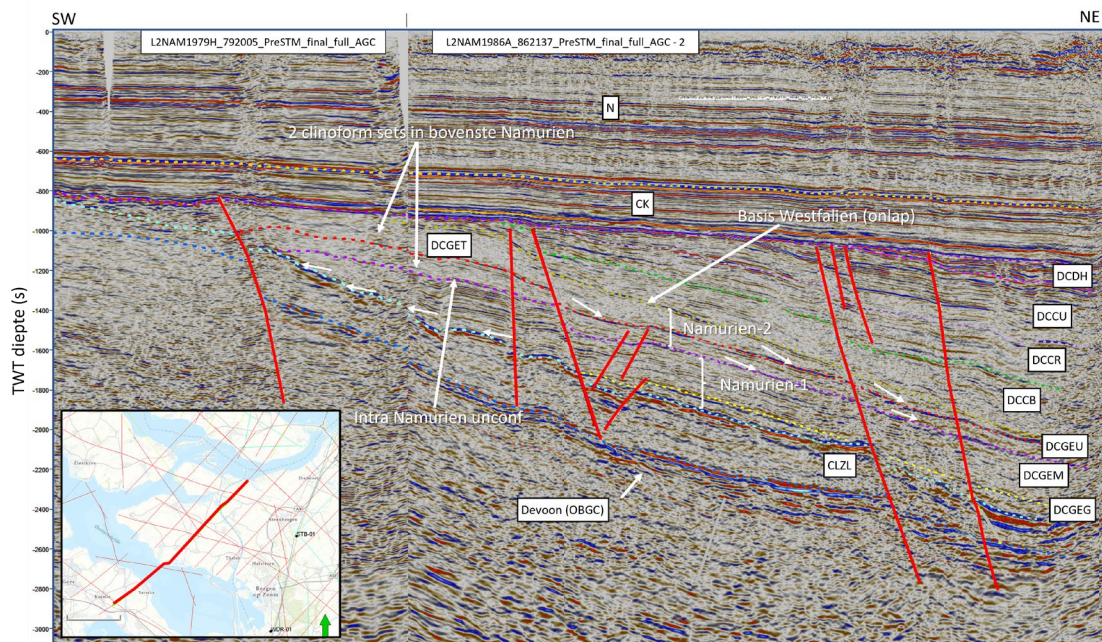
De top van het Dinantien-interval heeft een carbonaat platform geometrie met dikke afzettingen in het zuiden van het Kempen blok en veel dunnere afzettingen naar het noorden. Daar waar het Dinantien dik, is wordt dit gekenmerkt door transparante seismische facies. Dit wordt gezien als een indicatie voor de dikbankige en relatief homogene lithologische opbouw. De interne opbouw van de Zeeland Formatie, d.w.z. opdeling in lithostratigrafische members (cf. Mozafari et al., 2019) is niet verder bestudeerd.

De top van het Dinantien interval is op seismiek te zien als een continue, hoog amplitude trog (blauw). Deze trog wordt bepaald door het positieve impedantiecontrast tussen de bovenliggende klei- en zandstenen van de Formatie van Epen (DCGE) naar de relatief harde Dinantien carbonaatgesteenten. Met name in het zuiden van het Kempen Blok is te zien dat het grensvlak fungeert als onlap surface voor jongere Carboonafzettingen (Namurien en Westfalen). In tegenstelling tot reflectoren in het jongere Carboon is de continuïteit van het top Dinantien vlak hoog en veel breuken eindigen op dit grensvlak. Het onlap contact, het hoge amplitude contrast en de aanwezigheid van karstfenomenen waargenomen in seismiek in het offshore gebied (Reijmer et al, 2017) en in de boringen KTG-01 en BHG-01 (Gutteridge et al., 2024) vermoeden de aanwezigheid van een hiaat tussen het Dinantien en Namurien. De karst heeft mogelijk goede aquifers geproduceerd (Vandenberghe et al., 1986).

Binnen het inventarisatiegebied is de basis van het Dinantien alleen aangetroffen in de offshore put S05-01 en S02-02 en onshore in de boringen BHG-01 en KTG-01. De basis van het Dinantien interval is op seismiek te zien als een semi-continue, hoog-amplitude piek (rood). Deze trog wordt bepaald door het negatieve impedantiecontrast op de overgang van de relatief harde Dinantien carbonaatgesteenten, naar zandstenen van de Formatie van Bosscheveld en/of schalies van de Bollen Kleisteen formatie (OBGC). Daar waar het Dinantien heel dun is, kan door geringe seismische resolutie interferentie van de top- en basis reflectoren optreden, waardoor slechts één hoog amplitude reflectie te zien is. Abrupte sprongen in dikte van het Dinantien zijn vaak aan breuken gerelateerd.



Figuur 4.1 Lithostratigrafisch schema van het Carboon met indicatie van de in dit project geïnterpreteerde grensvlakken (rode pijlen). Bron: Van Adrichem Booqaert & Kouwe (1995).



Figuur 4.2 Seismische sectie door het Paleozoïcum in het westen van het modelgebied, waar de paleozoïsche sequentie tegen het Londen-Brabant Massief aan ligt (Devoon en ouder). Voor lithostratigrafische codes zie Figuur 4.1 en Tabel 3.1.

4.2.2 Namurien (Formatie van Epen – DCGE)

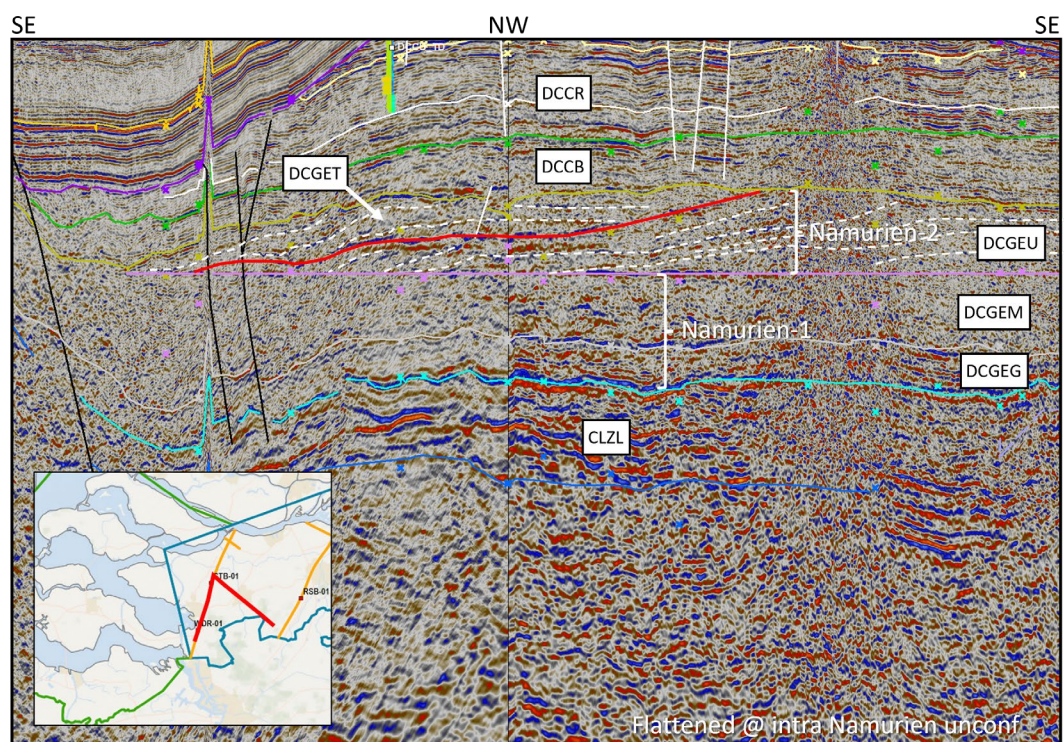
Het Namurien interval kent een complexe opbouw die lateraal sterk kan variëren, met navenante seismische signatuur. Seismische interpretatie wordt extra bemoeilijkt door variatie in kwaliteit en resolutie van de diverse seismische data. De herbewerkte SCAN seismische data in de Provincie Zeeland heeft verreweg de beste kwaliteit.

Afzettingen van Formatie van Epen vertonen zuidwaartse onlap tegen het oudere Dinantien platform (Figuur 4.2). Deze onlap is met name in het zuiden van het gebied goed te zien, terwijl in het noorden van het Kempen Blok de overgang Dinantien-Namurien parallel lijkt. Lokaal is direct op de Dinantien topografie een sterk reflectieve eenheid te herkennen van ongeveer 50 m dik. In geen van de boringen binnen het modelgebied is deze eenheid geïnterpreteerd. Dit interval zou het Laagpakket van Geverik kunnen representeren en is mogelijk equivalent aan de Souvré Formatie. Alternatief is dat dit het equivalent is van de Chokier Formatie in België (M. Duser, pers. comm., 2024).

De top van dit interval is vaak te zien als een trog (blauw) die onlap tegen het top Dinantien grensvlak. Hierop volgt een eenheid die gekenmerkt wordt door meerdere semi-continue reflectoren die, vooral in goede seismische lijnen, een ritmisch patroon van relatief dikke intervallen laat zien. Deze gehele eenheid (Namur 1) vertoont onlap tegen de Dinantien topografie en de top is geïnterpreteerd als een trog. Boven deze trog is de seismische facies van het Namur 2 interval transparanter (lagere amplitude), maar bevat meer interne reflecties die duiden op een clinoforme geometrie met downlap richting het noorden (Figuur 4.2 en Figuur 4.3). De overgang van ritmische seismische facies die naar het zuiden onlap naar transparante clinoforme facies die naar het noorden progradeert, markeert een belangrijke verandering in het opvullingspatroon en is in het gehele Kempenblok als de zogenaamde intra-Namurien unconformity geïnterpreteerd.

Binnen de transparante clinoforme facies zijn ten minste twee clinoforme sets (clinothems) te herkennen, gescheiden door een hoog-amplitude trog die alleen in Zeeland (ten westen van RSB-01) in de seismiek zichtbaar is. Mogelijk representeert dit een kleilaag, al is dat in geen enkele put terug te vinden. Meest waarschijnlijk correspondeert de clinoforme facies met het Laagpakket van Ubachsberg dat beschreven wordt als turbiditische deltafrontafzetting aan de top van de Formatie van Epen. Deze eenheid wordt aangetroffen in S02-02 (108 m), zeer dun (40 m) in BHG-01 en correleert met het naar het zuiden dikker wordende clinoformpakket. In put RSB-01 is het Laagpakket van Ubachsberg voorheen niet als zodanig geïnterpreteerd, maar wordt mogelijk vertegenwoordigd door een pakket met sterk gecementeerde zanden boven een overwegend schalierijk pakket (zie ook paragraaf 3.2.1). Deze zanden worden aangeduid als “Passage Sandstone” en geven de overgang van koolvrij naar koolhoudend Carboon aan. Ook in S02-02 is het Laagpakket van Ubachsberg eerder als Passage Sandstone aangeduid. De (weinige) ouderdomsbepalingen geven hier geen uitsluitsel. Wel laat de seismische interpretatie van SCAN lijn 32 zien dat het geïnterpreteerde Ubachsberg niveau in RSB-01 correspondeert met de clinoforme facies (Figuur 4.4).

De top van het Namurien interval valt samen met de basis van de Formatie van Baarlo. Deze volgt met name in het zuiden van het gebied de top van het naar het noorden afhellende clinoforme complex van het Namur 2 interval (Figuur 4.3, Figuur 4.4).



Figuur 4.3 Namurien sequentie in het westen van de Provincie Noord-Brabant (zie locatiekaartje), geflattened (grensvlak horizontaal gemaakt) op de Intra-Namurien unconformity (in paars). De Formatie van Epen toont hier een duidelijke tweedeling: het Namurien-1 deel bevat vermoedelijk het Laagpakket van Geverik (sterk reflectief, DCGEG) met daarboven een laag-amplitude chaotisch pakket van het hoofd Epen laagpakket (DCGEM). Het Namurien-2 deel ligt boven de Intra-Namurien unconformity en bestaat uit een interval met duidelijke hellende reflectoren die toegeschreven worden aan clinoforme sets van het Laagpakket van Ubachsberg (DCGEU) bovenin de Formatie van Epen. Hierbinnen is ook een tweedeling zichtbaar (gemarkeerd door de rode lijn) die zou kunnen duiden op het regressieve karakter van deze Namurien-2 eenheid. De

basis van het Westfalien (DCCB) valt samen met de top van het clinoforme complex. Voor lithostratigrafische codes zie Figuur 4.1 en Tabel 3.1.

4.2.3 Westfalien – Caumer en Dinkel subgroepen (DCC, DCD)

Op het Kempen Blok representeert het Westfalien het interval tussen de basis Baarlo Fm en de basis Chalk Group (Figuur 4.2). Op enkele breukblokken nabij de Roerdalslenk wordt ook de Basis Permian Unconformity (BPU) aangetroffen die daar de top van het Westfalien vormt. Het Westfalien is seismisch te herkennen als een dik (tot ~1,5 km) pakket met veel interne reflectoren (vaak klei of koollagen). Individuele eenheden (formaties) zijn op goede seismische lijnen te onderscheiden aan de hand van hun seismische karakteristieken. Exacte top en basis grensvlakken zijn moeilijk te interpreteren en er zijn weinig boringen die het gehele Westfalien interval aangeboord hebben. Daarom is de resulterende seismische interpretatie slechts indicatief voor de verbreiding en dikte van de diverse eenheden. De boringen RSB-01 en STH-01 zijn belangrijke kapstokboringen binnen het gebied en liggen op SCAN lijn 32. De seismische interpretatie van het Westfalien op het Kempen Blok leunt zwaar op de seismic-to-well tie van deze seismiek en boringen en wordt verder ondersteund door aannames over de relatie tussen seismische expressie en algemene lithologische karakteristieken (zie Stratigrafische Nomenclator). Daarbij valt te denken aan dikke zandsteenbanken en de aanwezigheid van markante klei en steenkoollagen.

Binnen de Limburg Groep worden de volgende eenheden onderscheiden (van oud naar jong):

4.2.3.1 Formatie van Baarlo (DCCB)

In het zuiden van het Kempen Blok is de basis van de Formatie van Baarlo te zien als onlap surface op de clinoforme geometrie van het Namur 2 interval. Naar het noorden is de basis te zien als de eerste hoog-amplitude reflector boven een transparanter Namur-2 interval. Dit correleert met de eerste dikke zandsteenbanken zoals in boringen aangetroffen. Het Baarlo interval kent een chaotisch seismisch karakter met discontinue reflectoren. Deze reflectoren verdelen het interval in sequenties die het meest waarschijnlijk corresponderen met ‘coarsening upward’ sequenties, die in de literatuur worden toegekend aan Milankovitch cycliciteit (bijv. Huis in 't Veld & Den Hartog Jager, 2025). In het zuiden (zuid van bijvoorbeeld RSB-01) vertoont de Baarlo Fm ook scheve gelaagdheid. Hierdoor is de grens met het onderliggende Laagpakket van Ubachsberg moeilijk te bepalen (zie Figuur 4.4).

4.2.3.2 Formatie van Ruurlo (DCCR)

De Formatie van Ruurlo bedekt concordant de Formatie van Baarlo. Op de overgang gaat het patroon van dikke, opeengestapelde ‘coarsening upward’ sequenties van de Formatie van Baarlo over naar dunnere ‘fining upward’ en ‘coarsening upward’ opeenvolgingen in de Formatie van Ruurlo. In het Belgische Kempen kolenbekken wordt de overgang van Baarlo naar Ruurlo geïnterpreteerd als overgang van Lower naar Upper Delta Plain afzettingsmilieu (pers. comm. Michiel Duser, 2024). De ondergrens wordt gelegd aan de basis van de zandsteen die de bovenste dikke ‘coarsening upward’ opeenvolging afsnijdt. Vaak wordt op boorgatmetingen een algehele verschuiving in loguitslagen gezien, wat het meer siltige karakter van de Formatie van Ruurlo weergeeft. Boven de grens wordt vaak een toename in het aantal steenkoollagen aangetroffen. Regionaal is de Formatie van Ruurlo de eenheid met de meeste koollagen. Seismisch wordt de Formatie van Ruurlo herkend aan een hoog-

frequent en hoog-amplitude reflectie patroon (Figuur 4.4). De reflectorcontinuïteit is laag, maar duidelijk hoger dan die van de Formatie van Baarlo.

4.2.3.3 Formatie van Maurits (DCCU)

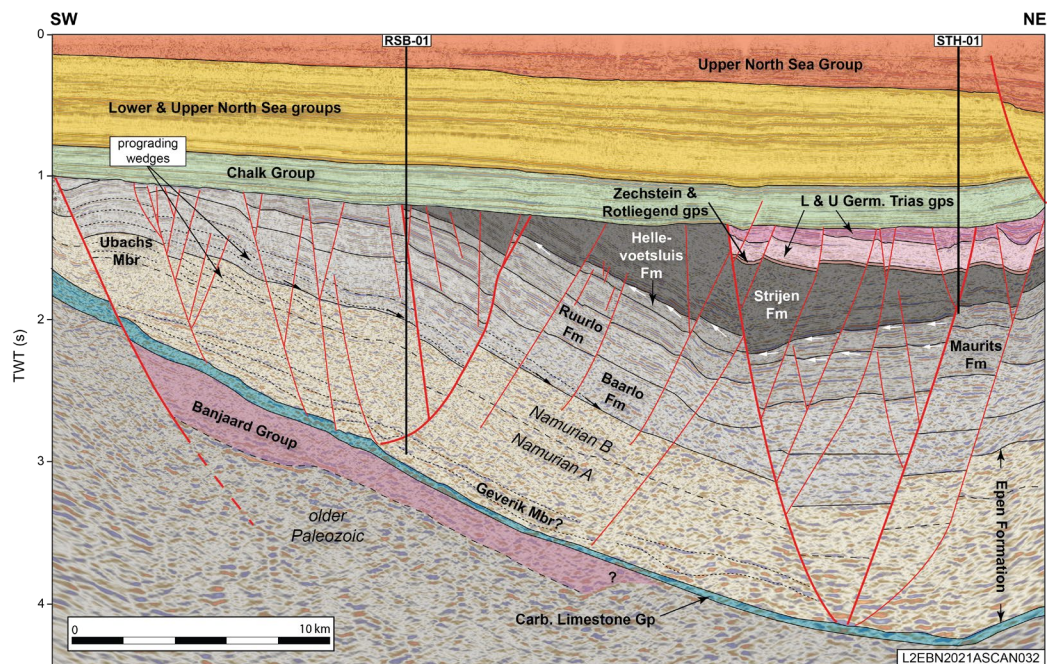
De Formatie van Maurits ligt concordant op de Formatie van Ruurlo; het contact wordt gekenmerkt door een, naar boven toe, abrupte toename in het klei- en steenkoolgehalte. Dit niveau markeert de top van de algehele 'coarsening upward' trend in het onderste deel van de Limburg Groep. In de seismische data wordt de basis Formatie van Maurits boven dit sterk reflectieve interval geïnterpreteerd. Het onderste deel van de formatie bevat relatief weinig klei- en steenkoollagen en heeft een transparant seismisch karakter (lage amplitude, lage continuïteit; Figuur 4.4). Hoger in de Formatie van Maurits neemt het aantal klei- en steenkoollagen weer toe. Deze hebben een hoge amplitude, soms goede continuïteit en zijn gegroepeerd in een aantal duidelijke cycli. De top van het interval wordt gemarkeerd door de overgang naar opnieuw transparantere seismische facies aan de basis van de Formatie van Hellevoetsluis.

4.2.3.4 Formatie van Hellevoetsluis (DCDH)

Deze formatie bestaat uit een opeenvolging van 1 tot 15 m dikke zandsteenlagen en siltige tot zandige, kalkhoudende kleistenen die zo nu en dan steenkoollagen bevatten. De zandstenen komen voor in dunne lagen en geulopvullingen met lokaal tot 30 m dikke opeenstapelingen. Steenkoollagen zijn zeldzaam en komen voor in grijze kleisteen als intervallen van 5 tot 55 m dik. De seismische signatuur van deze eenheid wordt gekenmerkt door een transparante basis en daarboven een toename van hoge amplitude reflectoren met een hoge continuïteit. Lokaal is er een gering hoekverschil met de onderliggende Formatie van Maurits te zien (Figuur 4.4). Met name onder de BPU is de amplitude opvallend hoog. In het gebied is de dikte beperkt tot hooguit ~100 m.

4.2.3.5 Formatie van Strijen (DCHS)

Deze eenheid bestaat voornamelijk uit siltige tot zeer fijnkorrelige zandige kleistenen met ingeschakelde zandsteenlagen van 2 tot 30 m dik. De kleisteenintervallen zijn tussen de 10 en 70 m dik, gemiddeld 40 m. Kalkhoudende deeltjes komen in de grijze kleistenen voor, met name in het onderste deel. Steenkoollagen zijn zeldzaam tot afwezig. De ondergrens wordt getrokken aan de basis van het eerste meer dan 60 m dikke kleisteen interval, welke de bovenste massieve zandsteenlaag van de Formatie van Hellevoetsluis bedekt. Dit is te zien als een transparant seismische facies waarin nog wel enkele medium amplitude reflectoren te zien zijn. Deze worden waarschijnlijk veroorzaakt door de kalkhoudende kleistenen in de top van het kleisteen interval. Het onderste kalkhoudende interval geeft een duidelijke reflectie die een goede seismische karakteristiek is voor de Formatie van Strijen en daarom ter ondersteuning van de seismische interpretatie is meegenomen.



Figuur 4.4 Seismische lijn L2EBN2021ASCAN032 tussen de kapstokboringen RSB-01 en STH-01 met de interpretatie van de Westfalien eenheden. Opvallend hier is dat zowel de basis Hellevoetsluis Fm (DCDH) en de basis Strijen Fm (DCHS) de onderliggende eenheden onder een hoek afsnijden (aangegeven met witte pijlen). Dit heeft tot gevolg dat de Maurits en Hellevoetsluis formaties in dikte afnemen in zuidelijke richting. De breuken die later in de breukmodellering zijn meegenomen zijn dik weergegeven. De dunner ingetekende breuken zijn kleinere breuken met gering verzet en worden in de modellering niet gebruikt. Voor lithostratigrafische codes zie Figuur 4.1 en Tabel 3.1.

Deze reflector ligt ~120 ms boven de basis van de formatie, hetgeen goed correspondeert met de eerdergenoemde 60 m voor het dikke transparante kleiige interval (gerekend met 4000 m/s seismische snelheid in het Carboon interval). Lokaal is het basiscontact erosief en vertoont een duidelijk hoekverschil met onderliggende eenheden (Figuur 4.4).

4.2.3.6 Formatie van Neeroeteren (DCDN)

In de seismiek karakteriseert de Formatie van Neeroeteren zich hetzelfde als de Formatie van Strijen (transparante seismische facies). Of het hier twee verschillende eenheden betreft is op basis van de seismische interpretatie niet op te maken en daarom worden deze formaties als seismostratigrafisch equivalent beschouwd. Op de verbreidingskaart van de Formatie van Strijen is wel duidelijk te zien dat er twee voorkomens gebieden zijn (zie Bijlage 2).

4.2.3.7 Base Permian Unconformity (BPU)

De afzettingen van de Limburg Groep worden afgesneden door de Base Permian Unconformity (BPU). Op het Kempen Blok is de BPU alleen aangetroffen in boring STH-01. Oorspronkelijk werd deze ook in boring RSB-01 beschreven, maar reeds tijdens de data-inventarisatie van dit project is vastgesteld dat dit een onjuiste interpretatie is. De BPU is beperkt tot het noordelijke deel van het Kempisch Blok en alleen te vinden in breukblokken

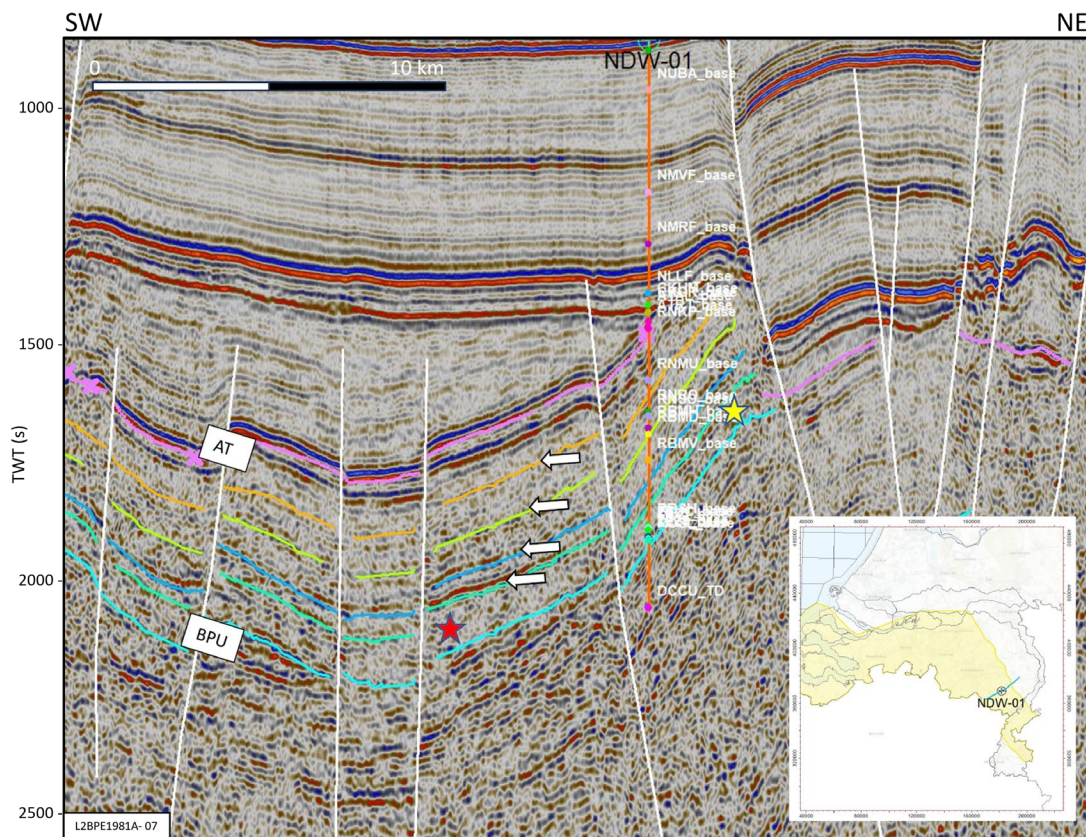
aan de rand van de Roerdalslenk, d.w.z. geassocieerd met het randbreuksysteem. Dit geldt ook voor het randbreuksysteem van de Peelrandbreuk. De BPU is zeer duidelijk als er sprake is van een hoekverschil met het Carboon (Figuur 4.4), maar is moeilijk te onderscheiden als de reflectoren in de seismiek parallel verlopen (er is dan sprake van een disconformiteit). Daardoor is de BPU in de Roerdalslenk niet altijd goed zichtbaar. Ook het grote verschil in seismische kwaliteit bemoeilijkt een eenduidige interpretatie van de BPU, evenals de eenheden binnen de Trias. Het onderscheid met de Zechstein- en Rotliegend formaties is vanwege de beperkte dikte van deze eenheden in de seismiek niet goed te maken. Het betreft dan slechts een enkele reflector.

4.3 Mesozoïcum

Het Mesozoïcum wordt binnen het modelgebied opgedeeld in twee delen: 1) de Trias tot Rijnland groepen, die vooral in de Roerdalslenk aanwezig zijn en daarbuiten (bijna) niet voorkomen en 2) de Krijtkalk Groep, die vooral buiten de Roerdalslenk op het Kempen Blok goed ontwikkeld is en daar diktes tot 500 m kan bereiken, maar in de Roerdalslenk juist zeer dun of afwezig is.

4.3.1 Germaanse Trias groepen (RB en RN)

Alleen in het zuidoosten van de Roerdalslenk is de Onder Germaanse Trias Groep (RB), inclusief de Nederweert Zandsteen Formatie, aangeboord (in NDW-01, LBR-01, RAA-01 en enkele oude steenkool exploratie (DM) boringen). De opeenvolging van seismische facies toont in de basis een hoog reflectief interval met een hoge mate van reflectie continuïteit dat op basis van put NDW-01 correspondeert met de Muschelkalk Formatie (Figuur 4.5). Vervolgens komt een interval voor waar een aantal semi-continue reflecties worden afgewisseld met meer transparante en chaotische seismische facies (met pijlen gemarkeerd in Figuur 4.5). Zowel de continuïteit als afwisseling met meer transparante facies kan lateraal sterk variëren (vergelijk rode en gele ster in Figuur 4.5), waardoor de combinatie van de seismische facies trends leidend is in de kartering van de BPU. Bij de seismische interpretatie is ervoor gekozen te prioriteren op de BPU en de breuken en geen interne eenheden te interpreteren. Interne Trias eenheden zijn bij de modellering aan het model toegevoegd op basis van putgegevens.

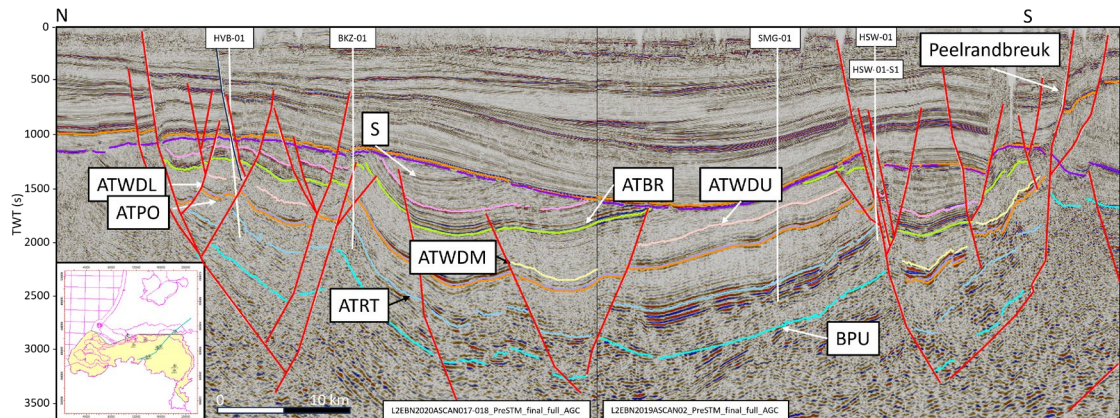


Figuur 4.5 Seismische sectie (L2BPE1981A- 07) over de kapstokboring NDW-01 (verticale overdrijving x8). De seismische extractie van deze lijn wordt in de seismic-to-well tie getoond in kolom 2 (Figuur 3.20). De figuur toont de basis Altena Groep (AT) en de Base Permian Unconformity (BPU) en een viertal interne semi-continue reflectoren (witte pijlen). De oranje en donkerblauwe interpretaties markeren respectievelijk reflectoren nabij de basis Boven-Trias groep en nabij de top van de Nederweert Zandsteen. De dip van de lagen en de matige seismiek op de locatie van de put beperkt een meer specifieke correlatie. De rode en gele ster markeren verschillen in seismische reflectie karakteristieken, respectievelijk meer transparante en continue seismische facies voor hetzelfde interval.

4.3.2 Basis Altena Groep (AT)

In de Roerdalslenk wordt de basis van de Alتنا Groep gekenmerkt door enkele sterke reflectoren rond de overgang van het Trias naar de Formatie van Sleen (ATRT). De basis van deze formatie laat geen duidelijke discordantie met de onderliggende Trias Groep zien; volgens dateringen uit boringen ligt er wel een hiaat tussen de groepen. De afzettingen van de Formatie van Sleen bestaan uit donkere kleisteen met een dun zandsteen pakket en zijn in het modelgebied minder dan 50 m dik. Door de geringe dikte is de formatie niet apart uitgekarteerd.

De overliggende Formatie van Aalburg (ATAL) ligt concordant op de Formatie van Sleen en is in de seismiek gekarakteriseerd door een zeer transparant interval met enkele harde reflectoren. De afzettingen van deze formatie bestaan grotendeels uit donkergrijze, soms kalkhoudende kleisteen. De top van de formatie wordt concordant bedekt door de afzettingen van de Posidonia Schalie Formatie (ATPO). De dikte van de formatie kan door synsedimentaire breukactiviteit sterk verschillen. In het zuiden van het gebied en langs de Peelrandbreuk wordt de top van deze formatie afgesneden door de basis van de Krijt-kalk Groep (CK).



Figuur 4.6 Samengestelde seismische sectie (SCAN lijnen L2EBN2020CUOBR017, L2EBN2020ASCAN018 en L2EBN2019ASCAN002) over boringen (van west naar oost) HVB-01, BKZ-01, SMG-01 en HSW-01 (verticale overdrijving x5). De lijn toont de hele Altena Groep en Schieland Groep, evenals de meest relevante reflectiepatronen, zoals ze voor dit project geïnterpreteerd zijn.

4.3.3 Top Posidonia Schalie Formatie (ATPO)

De Posidonia Schalie Formatie is in meerdere boringen in het modelgebied aangetroffen. De verbreiding is gelimiteerd tot het gebied van de noordelijke Roerdalslenk. Ze ligt concordant op de afzettingen van de Formatie van Aalburg en wordt concordant bedekt door de afzettingen van de Formatie van Werkendam. In het zuiden van het gebied en langs de Peelrandbreuk wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijtcalc Groep. De Posidonia Schalie Formatie is de belangrijkste (potentiële) source rock voor olie in de Nederlandse ondergrond. De formatie bestaat uit meerdere, zeer opvallende cyclische sequenties van donkergrijze kleistenen met carbonaat intercalaties. Deze sequenties zijn over het algemeen maar enkele meters dik, de hele formatie is meestal rond de 30 m dik. Gezien de geringe dikte en grote onzekerheid over welk exact niveau wordt geïnterpreteerd (zie hoofdstuk 3), wordt de Posidonia Schalie Formatie als één niveau in het model ingebouwd.

4.3.4 Basis Formatie van Werkendam (ATWD)

De basis van de Formatie van Werkendam is herkenbaar als een sterke reflectie (trog) die correspondeert met de top van de Posidonia Schalie Formatie. De bovengrens wordt gevormd door het concordante contact met de Formatie van Brabant. In het midden en zuiden van het gebied en langs de grote breuken is de formatie door de Basis Krijtcalc Groep afgesneden. De formatie is vooral te herkennen als een transparant interval met enkele sterke reflectoren langs de basis en soms een set sterkere reflectoren in het midden. Alleen op de SCAN-seismiek is mogelijk een verder onderscheid te maken tussen de Onder-, Midden- en Boven-Werkendam laagpakketten:

- Boven-Werkendam Laagpakket (ATWDU) - bestaande uit grijze mergelige kleisteen. De basis is te herkennen als de bovenkant van een set van twee sterke reflectoren halverwege de verder zeer transparante seismische facies;
- Midden-Werkendam Laagpakket (ATWDM) – bestaande uit een afwisseling van kalkige silt- en zandstenen. Samen met de hogere sonic en weerstand van deze afzettingen is het pakket op seismiek te herkennen door een set sterkere reflectoren;
- Onder-Werkendam Laagpakket (ATWDL) – bestaande uit donkere, soms siltige kleisteen met duidelijk minder kalk in vergelijking met de bovenliggende laagpakketten. Op sommige niveaus zijn inschakelingen van ijzeroölieten te zien, deze zijn in de seismiek niet te herkennen.

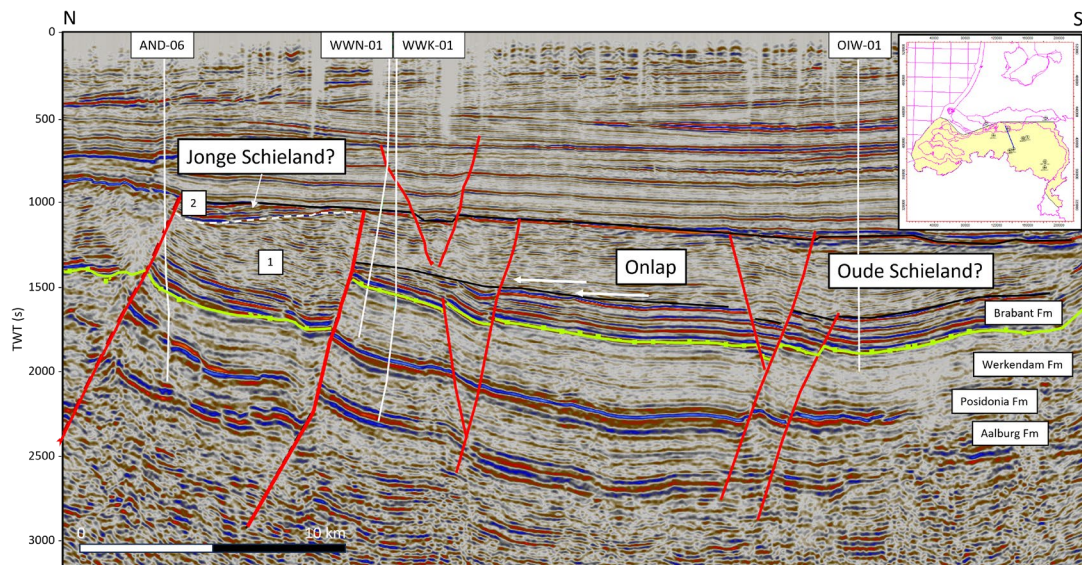
4.3.5 Basis Formatie van Brabant (ATBR)

De Formatie van Brabant is bekend als een opvolging van klei, mergel en kalkige zandsteen intervallen met wisselend kalkgehalte. De formatie is onderverdeeld in zeven laagpakketten (mergel of kalksteen) gebaseerd op variatie in kalkgehalte. De jongste afzettingen van de formatie zijn aangetroffen in de boring OIW-01 en bestaan uit oölitische kalkstenen met onduidelijke reservoir eigenschappen. De basis ligt concordant op de Formatie van Werkendam. Buiten het gebied van de Laat-Krijt inversie ligt de formatie bijna overal vermoedelijk concordant (met of zonder hiaat) onder de Schieland Groep. Alleen in het noordwesten, richting het West-Nederlands Bekken en langs grote breuken in het noordoosten van de Roerdalslenk is een hoekrelatie met de Schieland Groep te zien die duidt op een discordantie tussen deze twee formaties. In geïnverteerde gebieden wordt de top gevormd door de Basis Krijtkalk Groep. Op seismische profielen is deze formatie goed te herkennen door een uniforme dikte en een set van goed te volgen sterke reflectoren. De eenheid is seismisch niet verder onderverdeeld in laagpakketten, omdat de individuele eenheden overal minder dan 100 m dik zijn, meestal zelfs minder dan 50 m, en daarom in de seismische data niet goed te onderscheiden zijn.

4.3.6 Basis Schieland Groep (SL)

De Schieland Groep wordt binnen het modelgebied vooral in het noorden en langs het noordwestelijke gedeelte van de Roerdalslenk aangetroffen, maar ook in de buurt van boring HSW-01 gelegen in een graben systeem in het noordoosten van de Roerdalslenk. In het modelgebied behoren bijna alle afzettingen bij het Laagpakket van Alblasterdam, dat uit klei- en siltsteen bestaat met enkele zandsteenlagen. De zandsteenlagen zijn over het algemeen niet dikker dan een paar meter met een geringe laterale continuïteit. Bijna overal in het modelgebied wordt de bovengrens van de Schieland Group gevormd door een erosief contact met de bovenliggende groepen (Rijnland-, Krijt- of Noordzee groepen).

Binnen de Schieland Groep zijn twee seismische facies te herkennen. In het algemeen is het seismische karakter laag in amplitude met enkele sterkere reflectoren. In het noorden, langs de grens met het West-Nederlands Bekken, is een erosief contact met de onderliggende Brabant Formatie te herkennen (Figuur 4.7). Biostratigrafische analyses van boormonsters tonen een Berriasian tot Valanginian ouderdom aan, wat overeenkomt met het Laagpakket van Alblasterdam. Verder in het zuiden, langs de randen van de Roerdalslenk is het karakter duidelijk gelaagd. Verder is geen of nauwelijks erosief contact met de onderliggende Formatie van Brabant te herkennen. Biostratigrafische data van boring OIW-01 geeft voor dit gedeelte een Onder-Kimmeridgian ouderdom aan. Het seismische karakter van de Schieland Groep aan de oostelijke kant van de Roerdalslenk laat een vergelijkbaar beeld met het oudere deel zien. Er zijn geen boringen in dit gedeelte van het modelgebied en het is daarom niet mogelijk om deze interpretatie te verifiëren.



Figuur 4.7 Random lijn door 3D Waalwijk seismische survey over de boringen AND-06, WWN-01, WWK-01 en OIW-01 (van noord naar zuid, verticale overdrijving x5). In deze seismiek is de erosieve basis van de Schieland Groep (roze) met de Formatie van Brabant (groen) te zien. Biostratigrafische analyses tonen aan dat de Schieland Groep ten noorden (links) van de gemarkeerde breuk duidelijk jonger is dan in put OIW-01.

4.3.7 Basis Rijnland Groep (KN)

De Rijnland Groep (Holland Formatie) wordt alleen in het uiterste noorden in boringen buiten het modelgebied aangetroffen. In het gebied is de verbreiding van de formatie vooral tot het noordwesten (WNB) beperkt. De afzettingen bestaan uit mergels en mergelige kleistenen. Boring DRT-01 en SCAN-lijn32 tonen aan dat de Rijnland Groep de ondergrens vormt van het hoog-reflectieve interval onder de basis van de Krijtkalk Groep. In de seismische data is te zien dat de bovengrens van de Rijnland Group begrensd wordt door een erosiediscordantie. De dikte van minder dan 100 m en de beperkte verbreiding maken dat de eenheid in het modelgebied niet verder onder te verdelen is. De eenheid wigt uit in zuidoostelijke richting of wordt afgesneden door de basis van de Krijtkalk Groep. De Rijnland Groep ligt discordant op oudere eenheden van de Schieland-, Altena-, Trias groepen.

4.3.8 Basis Krijtkalk Groep (CK)

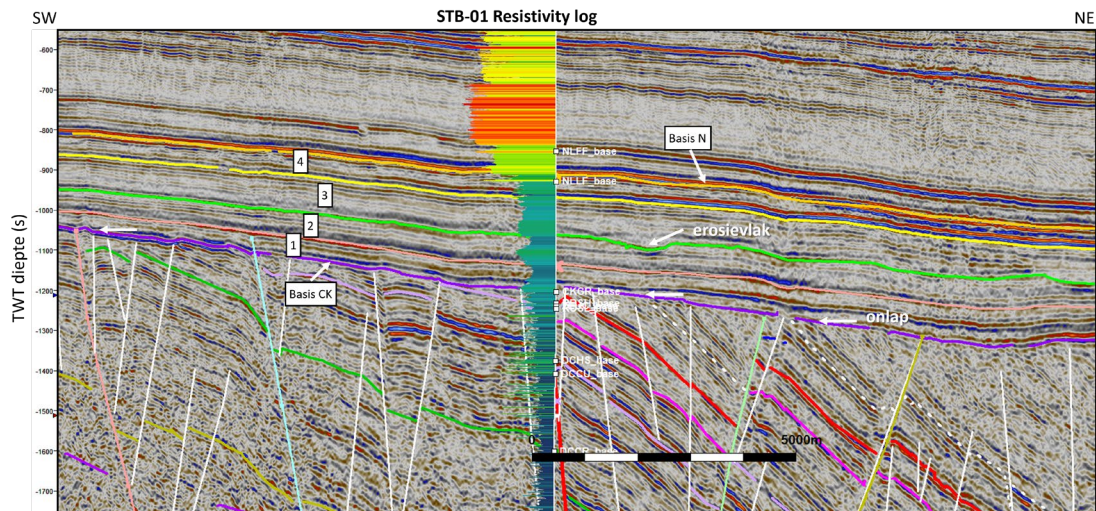
De basis van de Krijtkalk Groep toont een wisselend contact met onderliggende eenheden (Rijnland, Schieland, Altena- Trias of Carboon groepen) en kan daardoor op seismische secties een sterk wisselend karakter hebben (zowel als piek en als trog te zien). Binnen het projectgebied kan de Krijtkalk Groep stratigrafisch onderverdeeld worden in de formaties van Houthem en Ommelanden.

De Krijtkalk Groep bestaat voornamelijk uit fijnkorrelige, bioklastische of mergelige carbonaat-gesteenten. Langs grote inversiestructuren (zoals de Peelrandbreuk) kunnen lokaal zandafzettingen voorkomen. Tijdens de afzetting van de Krijtkalk Groep is door inversie van de bekkens een groot deel van het onderste deel van de groep en de onderliggende groepen geërodeerd. De afzettingen van de Krijtkalk Groep in de Roerdalslenk horen daardoor vermoedelijk alleen bij jongere “post-inversie” afzettingen (bovenste gedeelte van de formaties van Ommelanden Formatie en Houthem). In Zeeland zijn er geen boringen met stratigrafische ouderdomsbepalingen waardoor een inschatting van de

ouderdom van de Krijtkalk afzettingen niet mogelijk is. Laterale correlaties wijzen echter op een post-Subhercynische inversie ouderdom. Intra-Krijtkalk reflecties zijn duidelijk aanwezig maar niet systematisch gekarteerd, omdat het op dit moment niet geheel duidelijk is of dit ook duidelijke lithologisch overgangen betreft. Wel zijn bij de interpretatie de volgende bevindingen genoteerd:

- Formatie van Texel – deze is binnen het modelgebied alléén in boring HVB-01 beschreven. Biostratigrafische analyse, uitgevoerd binnen dit project, toont aan dat deze interpretatie sequentie-stratigrafisch niet logisch is. Deze interpretatie is waarschijnlijk gemaakt op basis van de groene kleur (glauconiet). Deze kan echter ook in andere eenheden of gesteenten voorkomen. Op basis van analyse wordt dit interval nu als de Formatie van Ommelanden geïnterpreteerd (zie paragraaf 3.2.6).
- Formatie van Ommelanden – is in de Roerdalslenk misschien plaatselijk nog onder de Formatie van Houthem te vinden, maar niet te zien in de seismiek. In Zeeland en op het Kempen Blok kan deze formatie tot 450 m dik zijn. In deze gebieden is het mogelijk om een verdere onderverdeling (en mogelijk herinterpretatie) te maken door uitkartering van interne reflectoren (Figuur 4.8).
- Eenheid 1: de SP-log van boring STB-01 laat een duidelijk ander karakter zien vergeleken met de jongere eenheden binnen de Krijtkalk Groep. Ook is de reflectie-intensiteit in dit deel veel hoger. De putbeschrijving spreekt van “overwegend groene klei met soms vuursteen knolletjes en pyriet”. Mogelijke is hier sprake van siliciclastische inschakelingen vergelijkbaar met het Laagpakket van Benzenrade, van de Formatie van Gulpen en de Formatie van Dorne in België. In de gamma-ray log van boring RSB-01 is deze eenheid niet duidelijk te herkennen, maar wel in de seismiek. Daarin is te zien dat de eenheid in noordelijke richting verdikt en richting het zuiden onlap vertoont. De topreflector (overeenkomend met de basis van eenheid 2) is over grote afstanden naar het westen te vervolgen (tot in boring BHG-01).
- Eenheid 2: dit pakket heeft intern iets lagere amplitude reflectoren, maar deze zijn wel sterk continue, het pakket vertoont minder duidelijk onlap en is in dikte minder variabel. Naar alle waarschijnlijkheid komt dit overeen met afzetting gevormd tijdens de maximale transgressie van het Krijt tijdens het Campanien (Zeven Wegen Member van de Formatie van Gulpen, pers. comm. Michiel Duser).
- Eenheid 3: de basis wordt gevormd door een erosievlak (discordantie) dat duidelijk geulinsnijdingen vertoont. Boven het erosievlak hebben de reflectoren een lagere amplitude en een minder goede laterale continuïteit. Dit komt overeen met het Laagpakket van Vijlen van de Formatie van Gulpen zoals gepubliceerd door onder andere Felder (1997) en Keutgen et al. (2010), dat gevormd is na een zeespiegeldaling (waardoor erosie en geulinsnijdingen ontstaan) en stijging waarbij vooral veel herwerkte krijtsedimenten zijn afgezet (pers. comm. Michiel Duser).
- Eenheid 4: hoge-amplitude reflectoren met hoge continuïteit. Deze eenheid vertegenwoordigt meest waarschijnlijk de Formatie van Houthem (mogelijk in combinatie met de Formatie van Maastricht). In seismische data van het Belgische deel van de Roerdalslenk en het aangrenzende Kempen blok zijn ook twee sterk continue reflectoren te zien die kunnen overeenkomen met de formaties van Maastricht en Houthem. Mogelijk is echter ook sprake van interferentie met de eenheden in de basis van de Noordzee Groep (Orp-Gelinden mergels) waardoor het sterk reflectieve interval veel dikker is dan alleen de Formatie van Houthem. De daadwerkelijke dikte, zoals aangetroffen in Zeeland en de Roerdalslenk, is zeer gering en vertegenwoordigt hooguit één reflector. Een exacte seismic-to-well tie is in dit top Krijtkalk/basis Noordzee interval moeilijk te realiseren door eerdergenoemde seismische interferentie.

Deze onderverdeling van de Krijtkalk Groep toont aan dat - in tegenspraak met verschillende putinterpretaties - voornamelijk de formatie van Gulpen, Maastricht en Houthem aanwezig zijn en niet de Formatie van Ommelanden.



Figuur 4.8 Onderverdeling van de Krijtkalk Groep in vier verschillende seismische facies zoals beschreven in de tekst. De sonic log van boring STB-01 laat een duidelijke correlatie zien met de reflectiekenarakteristieken van de vier eenheden.

4.4 Kenozoïcum

Het Kenozoïcum (de afgelopen 66 miljoen jaar) wordt lithostratigrafisch tot de Noordzee Supergroep (N) gerekend. Uitzondering hierop is het oudste Paleoceen, dat door haar lithologische karakter tot de Formatie van Houthem binnen de Krijtkalk (CK) groep wordt gerekend. De Noordzee Supergroep is opgedeeld in de Onder-Noordzee Groep (NL, Paleoceen – Midden Eoceen), de Midden-Noordzee Groep (NM, Boven Eoceen – Onder Mioceen) en de Boven-Noordzee Groep (NU, Midden Mioceen – tot heden).

Het Paleogeen en miocene deel van het Kenozoïcum is en/of wordt in verschillende H3O projecten seismisch geïnterpreteerd. Dit was echter in de Provincie Zeeland nog niet het geval. Voor deze studie zijn SCAN-lijn 32 in het westen van Noord-Brabant en 56 door het SCAN-programma herbewerkte 2D-lijnen (L2NAM-Zeeland) in Zeeland, Zuid-Holland en West-Brabant geïnterpreteerd. Omdat de opbouw van de ondergrond van Zeeland goed te vervolgen is tot in het gebied de Voorkempen, is gekozen om zoveel mogelijk de criteria voor geïnterpreteerde seismische eenheden van het project H3O-De Voorkempen aan te houden. Dit is goed mogelijk omdat de rol van (inversie)tektoniek en erosie tijdens en na het Paleogeen beperkt is en veel afzettingen over een grote regio aanwezig zijn. Wel valt te verwachten dat het Kenozoïcum, en dan met name het Paleogeen (Paleoceen tot Oligoceen), een grotere dikte bereikt onder Zeeland dan in het Voorkempen gebied. De ondergrond van Zeeland vormt namelijk een groot dalingsgebied (de Voorne Trog) ten zuiden van het geïnverteerde West-Nederlands Bekken.

In Zeeland zijn er weinig diepe boringen die inzicht verschaffen in de opbouw van het Neogeen en Paleogeen. Slechts twee diepe olie- en gasexploratie boringen bevinden zich in

de provincie (KTG-01 en BHG-01). Daarnaast zijn er in de nabije offshore nog boringen S05-01, S02-01 en S02-02. Veel ondiepe (Dino) boringen - met een geringere einddiepte - geven in Zeeuws Vlaanderen wel inzicht in de opbouw van het Paleogeen en Mioceen, dat daar op (zeer) geringe diepte voorkomt.

Op Goeree Overflakkee bevindt zich nog boring OVE-01. Verder naar het noorden passeert men de randbreuk van het West-Nederlands Bekken en is de stratigrafische opbouw dusdanig anders dat de boringen hier niet meer inzicht verschaffen. In het westen van Noord-Brabant bevinden zich boring Woensdrecht (WDR-01) uit 1914 en boring Steenberg (STB-01). Boring Rijsbergen (RSB-01) is een belangrijke referentieborings voor de interpretaties van het H3O-De Voorkemp project. Deze boringen zijn meegenomen in het passend maken van de seismische interpretatie. Ook is relevante informatie uit boring ZVB-GT-01 en de SCAN onderzoeksborings ORO-01 meegenomen. Opgemerkt dient te worden dat boring WDR-1 niet gebruikt is voor het H3O-De Voorkemp model, omdat met het voor dat project gebruikte grensoverschrijdende snelheidsmodel (een afgeleide van Velmod 3.0) geen goede fit met de seismiek te maken was. In het onderhavige project is Velmod 3.2 gebruikt en is deze fit met de seismiek wel goed en is de boring ook gebruikt voor de modellering. Dit heeft tot gevolg dat een aantal grensvlakken rond boring WDR-01 afwijken van hun tegenhanger in het H3O-De Voorkemp model. Omdat het onderhavige model een groter gebied beslaat en de lithostratigrafische informatie uit boring WDR-01 consistent lijkt binnen dit gebied, is er voor gekozen dit verschil voor nu te accepteren.

In het zuiden van Zeeland (Walcheren, Zeeuws Vlaanderen) neemt de dikte en diepteligging van de Noordzee Supergroep sterk af. Bovendien is hier geen (herbewerkte) seismische data voorhanden. Daarom is de modellering in dit deelgebied vooral gestuurd door Dino boringen zoals die zijn gebruikt voor het REGIS II v2.2 model.

Op basis van de criteria voor seismische interpretatie (zie 4.1) zijn in het kenozoïsche bereik acht grensvlakken geïnterpreteerd, waarvan de basis van de Breda Subgroep de jongste is. In onderstaande beschrijving worden ook de Belgische stratigrafische equivalenten genoemd (scheefgedrukt) om vergelijking met het model H3O-de Voorkemp te kunnen maken.

4.4.1 Basis Laagpakket van Liessel van de Formatie van Landen

(BE: Formatie van Hannut)

In het Belgisch deel van H3O-De Voorkemp komt de basis van de Formatie van Hannut overeen met de overgang van klei naar de mergels en zanden van de relatief dunne (10-20 m) Formatie van Heers. Deze overgang wordt gekenmerkt door een sterk positief impedantiecontrast. In Nederland wordt een vergelijkbaar contrast tussen de kleien van het Laagpakket van Liessel en de mergelige zanden van het Laagpakket van Gelinden (Oosteind Fm) verwacht. Door de beperkte dikte van de Formatie van Oosteind en de hoge interferentie van de sterke reflectoren rond het Krijt – Paleogeen contact, is het lastig om een eenduidig seismisch criterium voor iedere afzonderlijke seismische lijn te hanteren (zie bijvoorbeeld Figuur 4.10). Hier is gekozen een prominente ‘trog’ te vervolgen. Bovendien neemt het mergelgehalte in het Laagpakket van Gelinden af naar het noorden en zal er minder impedantiecontrast te verwachten zijn met het Laagpakket van Liessel.

4.4.2 Basis Laagpakket van Ieper van Formatie van Dongen

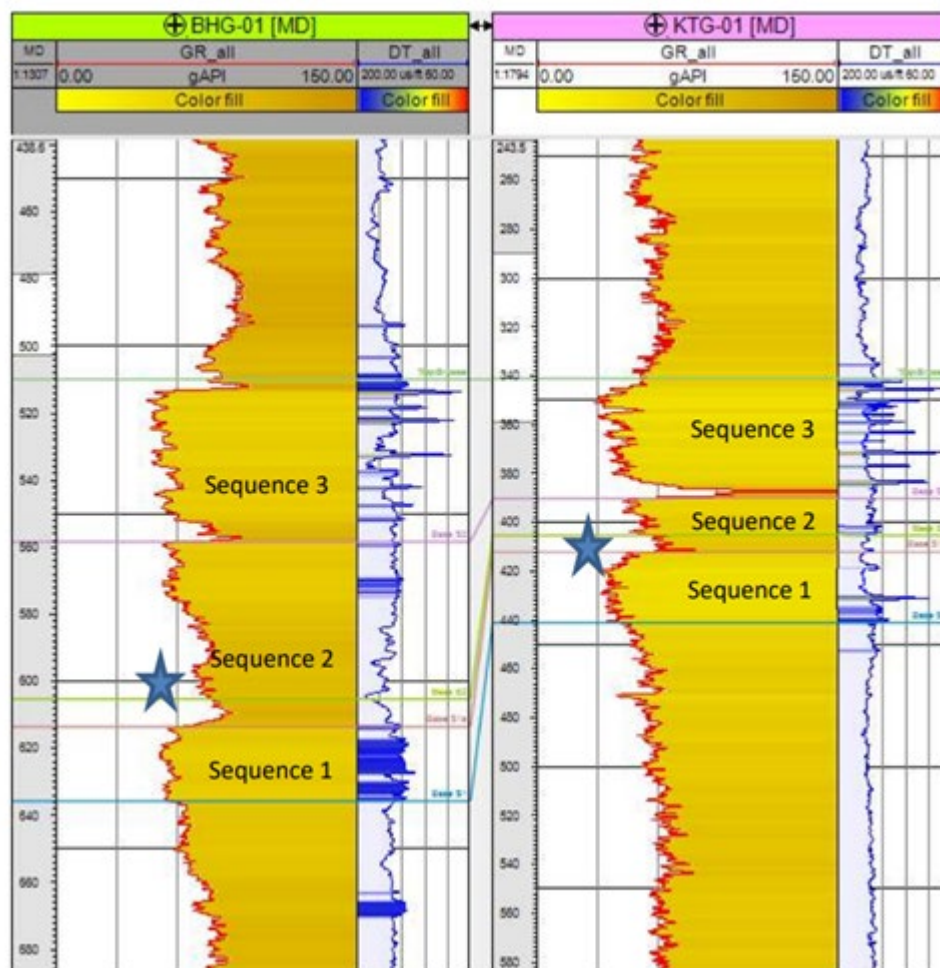
(BE: Basis Formatie van Kortrijk)

Binnen het Laagpakket van Ieper is een chaotisch seismisch karakter te zien, dat samen kan hangen met polygonale verbreuking als gevolg van vloeistofonttrekking. De basis van het Laagpakket van Ieper is een contact tussen compacte kleilagen en de onderliggende zanden en kleien van het Laagpakket van Oosteind. Deze overgang wordt gekenmerkt door een positief impedantie contrast ('[trog](#)'). Omdat de onderliggende Formatie van Landen erg dun is, en het contact met de daaronder liggende Krijtkalk Groep een sterk impedantiecontrast geeft, is interpretatie niet altijd eenduidig. Er is hier gekozen om de best vervolgbare trog te interpreteren, namelijk het hoog-reflectieve deel onder het relatief transparante seismische facieskarakter dat voor het Laagpakket van Ieper te verwachten valt.

4.4.3 Basis nabij Laagpakket van Brussel van de Formatie van Dongen

(BE: lid van Wemmel (Maldegem Fm) en formaties van Lede, Brussel en Aalter, en leden van Vlierzele en Pittem van de Formatie van Gentbrugge)

De overgang van het Laagpakket van Brussel naar het onderliggende Laagpakket van Ieper wordt gekenmerkt door een graduele verfijning van zand naar klei. Een landelijke kartering van het Laagpakket van Brussel laat zien dat in Zuid-Nederland een basaal zandig interval (sequentie S1 *sensu* de Haan et al, 2020; Figuur 4.9) voorkomt onder de formele basis van het laagpakket, dus bovenin het Laagpakket van Ieper. De Haan et al. (2020) hanteren de basis van het S1 zand als basis voor het door hen gekarteerde Laagpakket van Brussel. In het Belgisch deel van het H3O-De Voorkempen gebied wordt een vergelijkbaar zandig niveau waargenomen, te weten het Lid van Pittem van de Formatie van Gentbrugge. De basis van Sequentie S1 (danwel Pittem) vormt een sterk positief impedantiecontrast ([trog](#)) met onderliggende, compacte Ieper klei. De interpretatie van deze seismische overgang is consistent met die van de Haan et al. (2020).



Figuur 4.9 Gamma-ray log (GR) en sonic log (DT) van boringen Brouwershavensgat (BHG-01) en Kortgene (KTG-01) in Zeeland. De basis van het Laagpakket van Brussel met kenmerkende signatuur is aangegeven met de ster. Sequentie S1 is een dieper gelegen, zandig niveau dat met het Belgische Lid van Pittem correleert. Opvallend is daarnaast dat in het bovenste deel van het Laagpakket van Brussel intervallen met hogere seismische snelheden voorkomen (blauwe pieken in de sonic log (DT)). Deze zijn geïnterpreteerd als calciëc-gecementeerde banken en hebben een effect op de seismische expressie van dit interval. Figuur is afkomstig uit De Haan et al. (2020).

4.4.4 Basis Laagpakket van Asse van de Formatie van Dongen

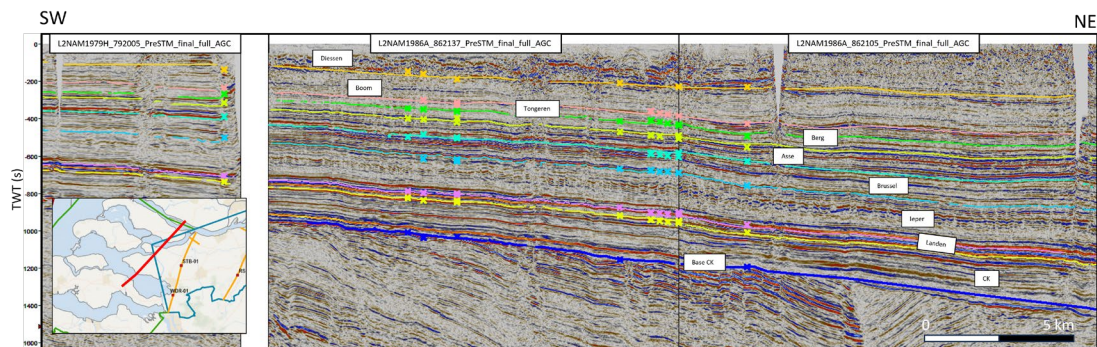
(BE: *Formatie van Maldegem exclusief lid van Wesel*)

De overgang van het kleine Laagpakket van Asse naar de ondergelegen zandlagen en zandsteenbanken van het Laagpakket van Brussel is over het algemeen goed herkenbaar op de seismische profielen door een sterk positief impedantie contrast ('trog') (Figuur 4.10). Omdat in het bovenste deel van het Laagpakket van Brussel sterk carbonaat-gecementeerde lagen voorkomen (zie Figuur 4.9), is het bovenste deel van het Laagpakket van Brussel sterk reflectief, hetgeen in veel gevallen tot een complex impedantiepatroon leidt. In die gevallen is ervoor gekozen, de hoogste prominente trog te vervolgen.

4.4.5 Basis Formatie van Tongeren

(BE: *Formatie van Zelzate*)

In het Belgisch deel van het H30-De Voorkempen gebied ligt de Formatie van Tongeren (NL) / Zelzate (B) hoekdiscordant op het Laagpakket van Asse (NL)/Formatie van Maldegem (BE). Door de hoekdiscordantie is het onderliggende sediment, en daarmee het reflectieve karakter van dit grensvlak, variabel. Lokaal is deze hoekdiscordantie daarom moeilijk te vervolgen. In Nederland - en dan met name in het noordelijker deel van het West Brabantse en Zeelandse modelgebied - is deze hoekdiscordantie minder uitgesproken of zelfs afwezig. De basis van de Formatie van Tongeren wordt gekenmerkt door een duidelijk te vervolgen impedantie afname ('**piek**'), Figuur 4.10).



Figuur 4.10 Samengestelde lijn van herbewerkte (SCAN) NAM-lijnen door Walcheren, Tholen en Goeree-Overflakkee (rode lijn in het kaartje). Deze lijn toont de parallelle subhorizontale gelaagdheid van de onderscheiden kenozoïsche eenheden. Ook hier is geen duidelijke hoekdiscordantie nabij de basis van Formatie van Tongeren en/of het Laagpakket van Berg te zien. In noordoostelijke richting neemt de dikte van Oligocene afzettingen toe. Binnen het Laagpakket van Ieper is een chaotisch seismisch karakter te zien. De basis van de Breda Subgroep is geïnterpreteerd op basis van het bovenliggende meer chaotische reflectiepatroon en de lokaal zichtbare insnijdingsrelatie met de onderliggende Formatie van Boom. Er is ook voor het Midden-Mioceen en jonger een verdikking in noordwaartse richting waarneembaar.

4.4.6 Basis nabij Laagpakket van Berg van de Formatie van Rupel

(BE: *Lid van Belsele-Waas van de Formatie van Boom*)

Het basale deel van de Formatie van Rupel is het Laagpakket van Berg welke uit zand bestaat. Deze eenheid op veel seismische lijnen in Zeeland is goed te herkennen als een meer reflectief interval onder de transparante kleien van het Laagpakket van Boom. Hoewel de lithostratigrafische onderverdeling tussen het Laagpakket van Berg en de hieronder gelegen Formatie van Tongeren voornamelijk bepaald is op basis van ouderdom (Vroeg Oligoceen vs. Laat Eoceen), lijkt de formatie van Tongeren seismisch gezien homogener van karakter (Figuur 4.11). Beide eenheden worden verondersteld voornamelijk uit erosieproducten van Pyreneese inversie te bestaan. In België wordt dan ook vaak gesproken van een 'complex van Oligocene zanden'. Er wordt hier aangenomen dat de overgang Berg - Tongeren een toename in impedantie ('**trog**') is.

4.4.7 Basis nabij Laagpakket van Boom van de Formatie van Rupel

(BE: *Formatie van Boom, excl. Lid van Belsele-Waas*)

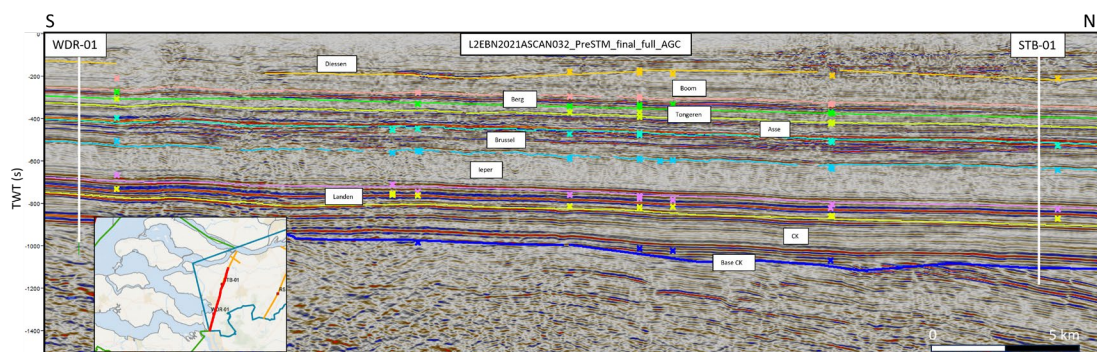
Het Laagpakket van Boom (bestaande uit klei) wordt onderscheiden binnen de Formatie van Rupel en rust stratigrafisch op het Laagpakket van Berg (zand). In België onderkent men de Formatie van Boom met als basis het Lid (*i.e.* laagpakket) van Belsele-Waas. Dit lid correspondeert met het Nederlandse Laagpakket van Berg.

Een duidelijk akoestisch contrast, namelijk een toename in impedantie ('trog'), vormt de seismische basis van het Laagpakket van Boom. Een additioneel seismisch kenmerk is het seismisch transparante karakter (Figuur 4.11), hetgeen het gevolg is van de homogene lithologische samenstelling van het Laagpakket van Boom (massieve klei).

4.4.8 Basis Breda Subgroep

(BE: *Formatie van Diest*)

In het Belgisch deel van het H3O-De Voorkempen gebied wordt de basis van de formatie van Diest gekenmerkt door een sterk negatief impedantiecontrast ('piek') dat wordt gevormd door de overgang van grof zand naar fijner zand. In het Nederlandse deel is deze reflectie duidelijk vervolgbaar en toont soms een duidelijke hoek- en/of insnijdingsrelatie met de onderliggende Rupel Formatie. Deze discordantie is te vervolgen naar het noordoostelijke Belgische deel van het H3O-De Voorkempen gebied, maar wordt minder duidelijk naarmate de basis van de formatie ondieper komt te liggen (richting het zuidwesten). Hierdoor is het in Zeeland lastig dit impedantiecontrast als criterium te gebruiken. Er is hier gekozen om een discordantie te vervolgen, waarbij boven dit niveau een meer chaotisch seismisch facies patroon wordt herkend. De interpretatie van dit niveau kent een lage betrouwbaarheid gezien de geringe diepte en beperkte seismische resolutie in dit ondiepe bereik (Figuur 4.11).



Figuur 4.11 Deel van SCAN-Lijn 32 tussen WDR-01 en STB-01 (rode lijn in het kaartje). De labels verwijzen naar de basis van de respectievelijke eenheden. Deze lijn toont de relatieve subhorizontale gelaagdheid van de zichtbare kenozoïsche eenheden. De kruisjes tonen de diepte van de grensvlak interpretatie op kruisende seismische lijnen en laten zien dat m.n. voor het Laagpakket van Liessel de offset betrekkelijk groot is. Dit is terug te voeren op het hoogfrequente reflectieve karakter nabij de Krijt-Paleogeen-grens. Het is daarom moeilijk om op alle lijnen exact het corresponderende niveau te interpreteren. Opvallend is dat er geen duidelijke hoekdiscordantie te zien is nabij de basis van de Formatie van Tongeren en/of het Laagpakket van Berg. Wel valt op dat boven de basis van laatstgenoemde een meer reflectief interval aanwezig is. De basis van de Breda Subgroep is handmatig geïnterpreteerd op basis van het bovenliggende meer chaotische reflectiepatroon en de lokaal zichtbare insnijdingsrelatie met de onderliggende Formatie van Boom.

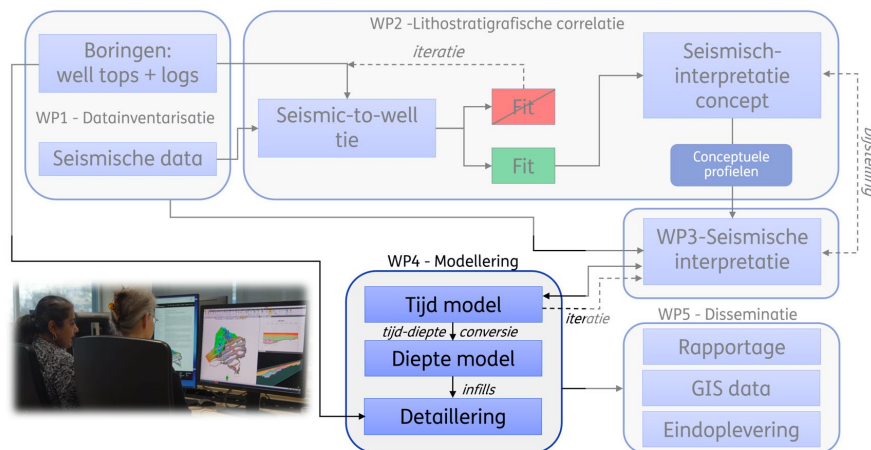
Chronostratigrafisch correspondeert de basis van de Formatie van Diessen met de *Mid Miocene Unconformity* (MMU), zie Munsterman et al., 2019, maar omdat de aanwezigheid van de Formatie van Groote Heide niet eenduidig aan te tonen is (dun of afwezig) valt de basis ook samen met de EMU. Het geïnterpreteerde grensvlak komt dus overeen met de basis van de Breda Subgroep. De interne opbouw van de Breda Subgroep wordt in het kader van dit project niet verder bestudeerd en/of gekarteerd.

4.5 (Her)interpretatie breuken

Op de SCAN-lijnen is een aanzienlijk groter aantal breuken te herkennen dan tijdens oudere interpretaties binnen het modelgebied zijn vastgesteld en gemodelleerd. Uitgangspunt voor de (her)modellering van de breuken zijn de in eerdere H3O-projecten opgenomen breuksystemen. Hieruit is een selectie samengesteld die als basis diende voor de verdere interpretatie en voor aanvulling met de nieuwe inzichten.

Er zijn zoveel mogelijk breukobservaties gemarkeerd om een zo goed mogelijk beeld van de structurele complexiteit te krijgen. Het markeren van breuken in 2D seismische lijnen wordt gedaan door de breuk in te tekenen. De ingetekende breuk wordt fault stick (UK) of breukstick (NL) genoemd. In totaal zijn in het modelgebied ruim 2500 breuksticks gemarkeerd; niet al deze sticks zijn meegenomen in de breukenmodellering (zie hoofdstuk 5).

5 Modelling



Als onderdeel van het werkpakket modellering (WP4) zijn de seismische interpretaties en breuken verwerkt tot tijd-grensvlakken, tijd-dikte grids en breukaansnijdingen (de aansnijding van grensvlakken met de breuken). Vervolgens is ook aandacht geschonken aan het uitwerken van onderlinge relaties van eenheden (o.a. uitwiggen, erosieve contacten, breuk-grensvlak contacten, verbreidingsgrenzen) en waar nodig het sturen van de interpolatie met “hulpdata”. Hierna zijn de resultaten van tijd naar diepte geconverteerd en gekalibreerd aan de werkelijke diepte zoals in boringen geobserveerd. Tot slot is het grensvlakken dieptemodel aangevuld met de niet-seismisch geïnterpreteerde grensvlakken. De volgende paragrafen behandelen de diverse modelleerstappen en de resultaten ervan.

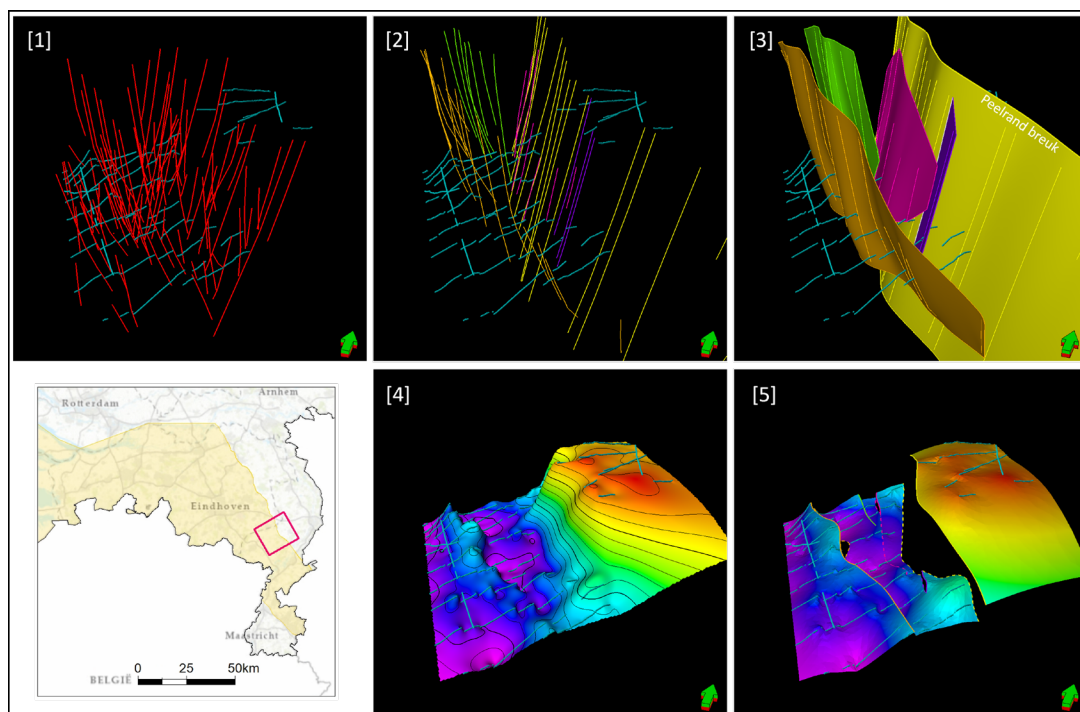
5.1 Modelling breukvlakken

De methode om een breukmodel op basis van 2D seismische breukinterpretaties (de breuksticks) op te stellen kent beperkingen. Enerzijds vanwege de grote hoeveelheid breuksticks en anderzijds omdat zeer complexe breukrelaties niet goed te modelleren zijn. Ook is de balans tussen de dichtheid van de seismische interpretatie en de breukdichtheid belangrijk. Als er tussen breuken onvoldoende seismische datapunten zijn, wordt het problematisch om de geometrie van het tussenliggende breukblok goed te construeren. Een vereenvoudiging is dan wenselijk. Dit betekent dat het uiteindelijke breukmodel altijd een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid is.

Het construeren van een breukmodel op basis van 2D-seismiek vormt een extra uitdaging door de (soms grote) afstanden tussen de individuele lijnen. Om een 3D-breuk of breukvlak te definiëren tussen 2D seismische lijnen is het noodzakelijk om ten minste twee, maar bij voorkeur meer sticks als deel van een breuk te kunnen identificeren. Alleen als er genoeg overtuiging is dat breuksticks van aangrenzende seismische lijnen deel uitmaken van dezelfde breuk, worden deze samengevoegd tot een set van breukinterpretaties. Deze breukinterpretaties worden vervolgens geïnterpoleerd tot een breukvlak en de individuele breukvlakken worden samengevoegd tot een breukenmodel. Het aantal gemodelleerde breukvlakken in het modelgebied is 355. Dit aantal bevat ook breuken die buiten het gebied doorlopen.

Om tot een definitief 3D-breukenmodel te komen volgt een iteratief proces. In dit proces wordt de definitieve selectie bepaald, de vorm en het laterale verloop van breuken gemodelleerd en breukrelaties voor kruisende breuken vastgesteld. “Hulp-sticks” kunnen worden toegevoegd om breuken te sturen op basis van informatie uit boringen, ondiepe- of oppervlakte gegevens, of om breuken te verlengen. In het laatste geval voorkomt dit onrealistische abrupte breukbeëindiging of kan het contact met een andere breuk beter geconstrueerd worden. Bovendien is het noodzakelijk dat alles in overeenstemming wordt gebracht met de herinterpretatie en de nieuw geïnterpreteerde grensvlakken.

Voor het juiste verloop van de breukvlakken is het ook belangrijk de aansnijdingen van de breuken met de grensvlakken van de modelleenheden (zie paragraaf 5.2) te evalueren en, indien nodig, aan te passen. Dit is dus ook (een sterk iteratief) onderdeel van het modelleringsproces. Figuur 5.1 illustreert de stappen van dit proces en het resultaat dat dit in het ideale geval oplevert.

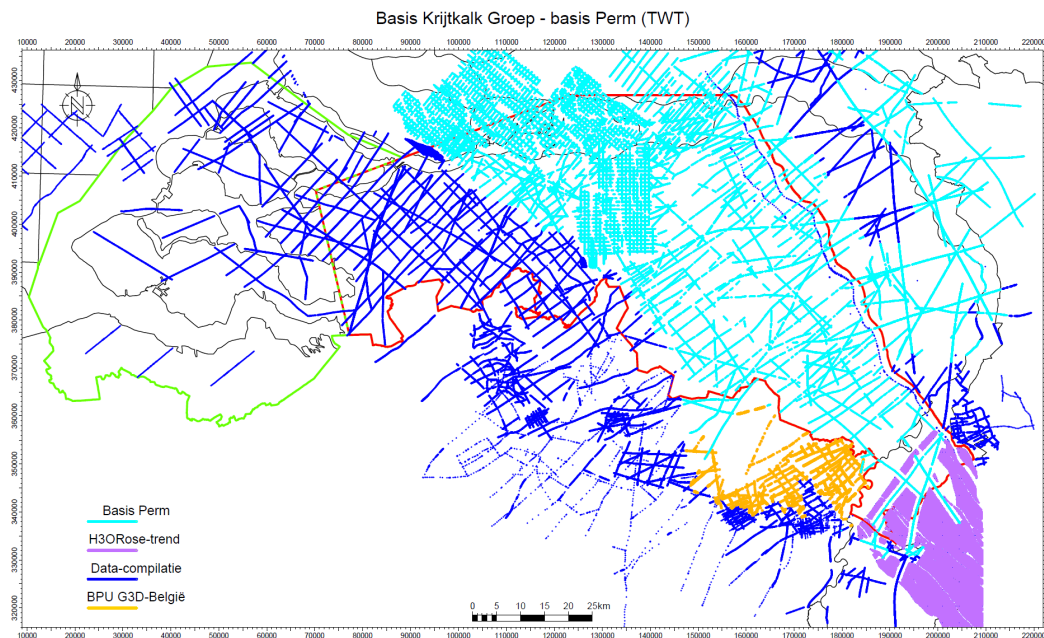


Figuur 5.1 Illustratie van stappen in de modellering van breukvlakken en breukaansnijdingen. 3D-illustraties 1 t/m 3 tonen [1] de seismische interpretatie van het grensvlak (blauw) en alle gemarkeerde breuksticks (rode lijnen), [2] de seismische interpretatie en geselecteerde breuksticks gegroepeerd per breuk, en [3] de seismische interpretatie en breuksticks geïnterpoleerd tot breukvlak. Illustraties 4 en 5 tonen respectievelijk het resultaat van interpolatie van het geïnterpreteerde grensvlak indien er geen breuken [4] of wel breuken [5] in het interpolatie proces zijn meegenomen. In het laatste geval wordt een scherp gedefinieerde aansnijding met het breukvlak gemodelleerd. De topografische kaart toont de locatie van dit voorbeeldgebied.

5.2 Modellering grensvlakken

Basisdata voor de modellering zijn puntensets van de seismische interpretaties en het breukenmodel. Tevens zijn gegevens uit België, Duitsland, het project H3O-Peelhorst & Venloslenk en eerdere H3O-projecten gebruikt om de te modelleren eenheden bij de grens van het modelgebied te kunnen sturen en zo ook een meer regionaal beeld te krijgen van de

structurele setting. De aanvullende data betroffen seismische interpretaties, breuken, trend-data, informatie uit boringen en steunpunten. Om de juiste sturing te kunnen geven werd een samengestelde puntensets in het tijddomein gemaakt (zie voorbeeld in Figuur 5.2), die als basis diende bij de interpolatie van het grensvlak.



Figuur 5.2 Kaartbeeld van de ruimtelijke verdeling van diverse gegevens, welke – in dit geval – zijn gebruikt voor de interpolatie van het gecombineerde referentievlak basis Krijt kalk Groep en basis Perm (BPU). De gegevens bestaan uit seismische interpretatiepunten van de basis Perm in het centrale deel van de Roerdalslenk (l-blauw), punten van een trendvlak afgeleid van de basis van het H3O-ROSE model gecombineerd met een diktetrend van het aanwezige mesozoïsche interval (roze), een gecompileerde puntenset van de afdekkende eenheid van het Carboon (voornamelijk basis Krijt kalk Gp en Rijnland Gp. van België en Nederland, d-blauw), en de interpretatie punten van de BPU van het G3D model van België (oranje).

5.3 Tijd-diepteconversie

Na de modellering van de tijd-grensvlakken is het coherent gestapelde model van het tijdsdomein omgezet naar het dieptedomein. De grensvlakken en breukvlakken van het model zijn naar het dieptedomein geconverteerd door gebruik te maken van een zogenaamd layer-cake snelheidsmodel van het type:

$$V(x,y,z)=V_0(x,y) + k \cdot z$$

met:

$V(x,y,z)$: de snelheid (m/s) van de laag op locatie x,y en diepte z

$V_0(x,y)$: de snelheid (m/s) van de laag op locatie x,y aan de oppervlakte bij $z = 0$ m

k : de factor (1/s) die de lineaire toename van de snelheid met de diepte bepaalt

z : de diepte (m).

De conversie is uitgevoerd met het snelheidsmodel VELMOD-3.2 (Paap et al., 2024). Dit model (en voorgaande versies van VELMOD) is gebaseerd op snelheidsinformatie van diepe

boringen van het Nederlands Continentaal Plat en het vasteland. Voor een tiental lithostratigrafische intervallen is een coëfficiënt k bepaald, die de toename van de snelheid weergeeft met de diepte. Per lithostratigrafisch interval zijn vervolgens lateraal variërende snelheidskaarten (v_0) gemaakt.

Het modelgebied is opgedeeld in acht snelheidsintervallen met elk hun eigen k -factor, v_0 -vlak, of v_0 constante of constante interval snelheid (zie Tabel 5.1). Voor het interval Germaanse Trias Groepen en Perm is een pragmatische keuze gemaakt, omdat in de seismische interpretatie geen onderverdeling is gemaakt tussen de Boven-, en Onder-Germaanse Trias Groep, Zechstein- en Rotliegend groepen. Aangezien boringen aangeven dat deze laatste twee eenheden beperkt in dikte zijn en de lithologische samenstelling niet substantieel anders is (geen zoutdiapieren) is het snelheidsinterval voor de Germaanse Trias Groepen gebruikt voor de diepteconversie van het gehele interval.

Het Carboon is opgedeeld in twee snelheidsintervallen. Voor de Limburg Groep zijn de constante v_0 en k -waarde gebruikt uit het SCAN-Dinatie project (Ten Veen et al., 2019) en een constante intervalsnelheid (V_{int}) voor de Kolenkalk Groep.

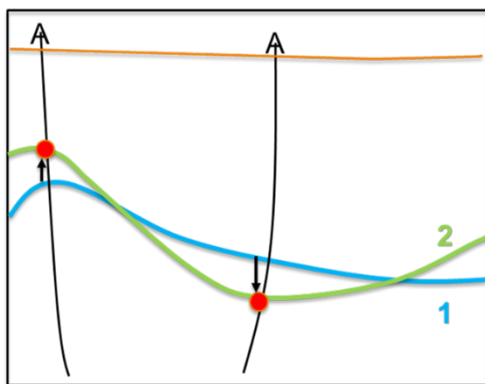
Tabel 5.1 Snelheidsintervallen van het snelheidsmodel VELMOD-3.2 (Paap et al., 2024) gebruikt voor tijd-diepte conversie binnen het modelgebied H3O-Diep Zuid-NL.

Referentievlaak	Vint\ v_0	k-waarde
1_B_Breda Subgp.		
2_B_Rupel Fm.		
3_B_Tongeren Fm.		
4_B_Asse Mb.		
5_B_Brussel Zand Mb.		
6_B_Dongen Fm.		
7_B_Landen Fm.	v_0 -Noordzee Supergp.	0.31
8_B_Krijtkalk Gp.	v_0 -Krijtkalk Gp.	0.93
9_B_Rijnland Gp.	v_0 -Rijnland Gp.	0.5
10_B_Schieland Gp.	v_0 -Boven Jura Supergp.	0.26
11_B_Brabant Fm.	v_0 -Altena Gp.	0.45
12_B_Posidonia Schalie Fm.		
13_B_Sleen Fm.		
14_B_Perm	v_0 -Germaanse Trias Gp.	0.38
15_B_Strijen Fm.		
16_B_Hellevoetsluis Fm.		
17_B_Maurits Fm.		
18_B_Ruurlo Fm.		
19_B_Baarlo Fm.		
20_Nabij T_Kolenkalk Gp.	$v_0=3448$	0.25
21_Nabij B_Kolenkalk Gp.	$V_{int}=6000$	

5.4 Modelleren in diepte

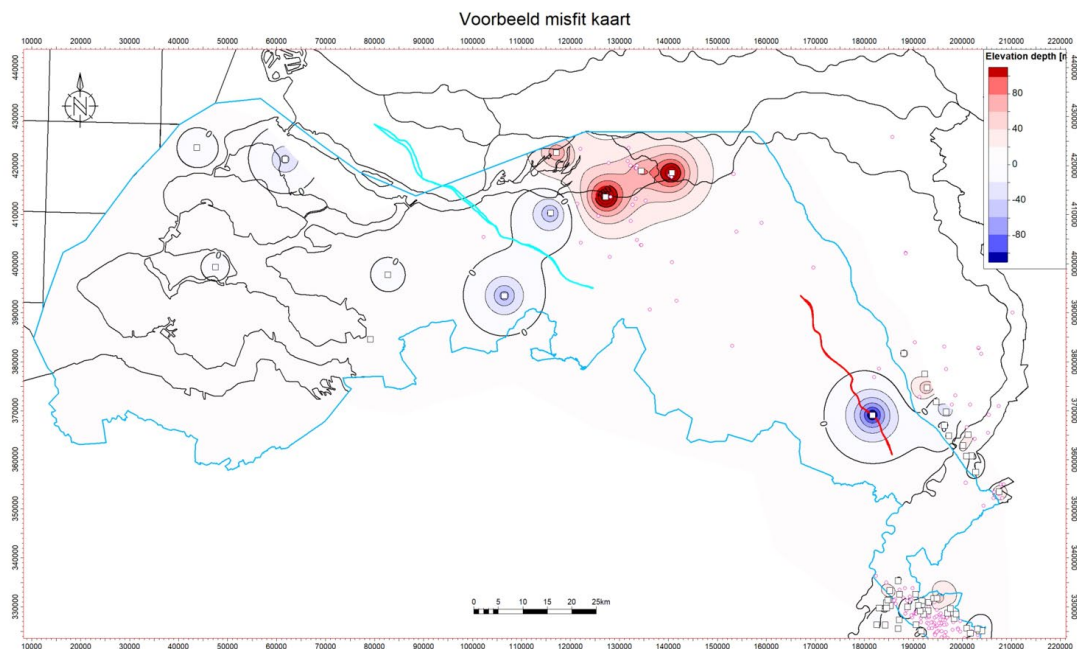
Na de tijd-diepteconversie volgen enkele iteraties waarbij de coherente stapeling van de grensvlakken gecontroleerd wordt met stratigrafische informatie uit boringen en (idealiter) ook met breukaansnijdingen. Ook kunnen op de locatie van de boringen nog verschillen optreden tussen de diepte-interpretaties in de boringen en de naar diepte geconverteerde seismische grensvlakken. Dit doordat er een verschil bestaat tussen het aantal boringen met snelheidsdata en verwerkt in VELMOD, versus het aantal boringen geschikt voor correctie in diepte.

Om de mogelijk aanwezige verschillen te evalueren en te corrigeren worden in het dieptedomein de verschillen tussen de dieptes van de eenheden in de boringen en grensvlakken berekend (Figuur 5.3). Vervolgens worden deze verschillen tot een vlak geïnterpoleerd dat opgeteld wordt bij de initiële grensvlakken (zie Figuur 5.3).



Figuur 5.3 Schematische weergave van een grensvlak (1) en een grensvlak (2) gecorrigeerd voor de diepte in de boring.

Het is mogelijk dat boringen vanwege hoge verschilwaarden niet gecorrigeerd kunnen worden en verwijderd worden uit de selectie voor interpolatie. De oorzaak is vaak terug te voeren op de mate van detail in de geometrie van een grensvlak in relatie tot complexe structuren zoals breuken, maar kan ook sterk gerelateerd zijn aan de tijd diepte-conversie. De variatie aan oorzaken maakt dat de aanpak maatwerk is en dat deze bij aanvang van de evaluatie en interpolatie van verschilwaarden niet vaststaat. Verschillende algoritmen (bijvoorbeeld kriging, convergent gridding) kunnen worden ingezet voor de interpolatie van de verschilwaarden en afhankelijk van het gekozen algoritme kan meer of minder aanvullende sturing worden toegevoegd. Figuur 5.4 toont een voorbeeld van de interpolatie van verschilwaarden met het kriging algoritme waarbij de keuze is gemaakt om de invloedssfeer rondom de locatie van de boring beperkt te houden. Bij hoge waarden kan dit pieken in het gecorrigeerde grensvlak opleveren. Nabij breuken rijst de vraag of en hoe een breuk in de correctie wordt meegenomen en bijvoorbeeld een harde grens vertegenwoordigd. De uiteindelijke keuzes zijn sterk bepalend voor het correctievlak en het gecorrigeerde grensvlak (Figuur 5.4).



Figuur 5.4 Voorbeeld van geïnterpoleerde verschillen tussen de diepte van gemodelleerde grensvlakken en de diepte in boringen bij het gebruik van het algoritme kriging. Deze zogenaamde “misfit” kaart wordt gebruikt om het grensvlak te corrigeren.

Op basis van de dieptegrids van de seismische grensvlakken, worden eventueel vlakken van de overige, niet seismisch geïnterpreteerde eenheden gemaakt, de zogenaamde “invullingen”. Een invulling wordt gemaakt op basis van informatie van dieptes en diktes van de modelleenheden uit de (diepe) boringen en wordt verder gestuurd door geologische concepten. Deze geologische concepten omvatten bijvoorbeeld regionale kennis van diktetrends (verdikking/ verdunning in bepaalde richtingen), effecten van breukwerking op diktes of kennis van erosieve contacten.

5.5 Modelling geologische en hydrogeologische eenheden

Vanwege de sterke verschillen in structurele opbouw binnen het modelgebied en de verschillen in de te modelleren stratigrafische intervallen binnen de deelmodelgebieden Noord-Brabant en Zeeland is de modellering opgesplitst in drie submodellen. Als gevolg van deze verschillen zijn per submodel de algemene modelleerstappen (zoals hiervoor beschreven) verder toegespitst. Belangrijke details worden hieronder per submodel toegelicht. Bij de opsplitsing is rekening gehouden met de laterale en verticale onderlinge relaties via de grensvlakken die over (vrijwel) het gehele modelgebied aanwezig zijn en/of belangrijke unconformities vormen (zoals de basis Formatie van Landen, basis Krijtkalk Groep en de basis Perm). De submodellen betreffen:

1. Zeeland – basis Breda Subgroep-basis Formatie van Landen (= basis Noordzee Supergroep). Submodel 1 bevat modelleenheden 1 t/m 7 (zie Tabel 5.2). Dit submodel omvat een relatief eenvoudige stapeling van grensvlakken en heeft vrijwel geen breuken. De paar breuken die aanwezig zijn, laten geen duidelijk verticaal verzet zien en worden

als niet significant verondersteld. Eventueel lateraal verzet wordt door deze aanname ook als niet significant verondersteld. Aandachtspunten voor de modellering zijn 1) de aansluiting op Belgische ondergrondmodellen en -data en 2) consistentie met het Nederlandse ondergrondmodel DGM v2.2. Om dit te waarborgen zijn de stratigrafische markers in boringen aan Belgische zijde meegenomen in de interpolatie van de grensvlakken en is de relatie met DGM v2.2. geverifieerd.

2. *Zeeland, Voorkempen en de Roerdalslenk - basis Formatie v. Landen-basis Perm.*
Submodel 2 bevat modelleenheden 8 t/ 14 (Tabel 5.2), beslaat het hele modelgebied en omvat het Mesozoïcum en bovenste Paleozoïcum (Perm). Het submodel kenmerkt zich door complexe breuksystemen en meerdere erosieve en discontinue grensvlakken. In dit submodel zijn de belangrijke grensvlakken opgenomen die de overgang naar andere submodellen vertegenwoordigen.
3. *Zeeland en de Voorkempen - basis Formatie v. Landen-Nabij basis Kolenkalk Groep.*
Submodel 3 is gericht op de modellering van Carboon eenheden ten zuiden van de Veldhoven breukzone op het Kempen Blok. In de Roerdalslenk is het niet mogelijk gebleken de Carboon grensvlakken op seismische data te interpreteren en deze zijn dan ook niet gemodelleerd. Kenmerkend voor dit submodel is dat de meeste breuken beperkt zijn tot het Carboon, d.w.z. de breuken lopen niet door in jongere eenheden. In het noordelijk deel van het submodel, nabij de zuidelijke randbreuken van de Roerdalslenk, snijden de breuken ook jongere eenheden. Dit submodel bevat de modelleenheden 8 en 15 t/m 21 (Tabel 5.2).

Tabel 5.2 Overzicht van gemodelleerde grensvlakken, diktegrids en breukaansnijdingen en de submodellen waartoe deze behoren.

Lithostratigrafische eenheden	Seismische puntensets	Referentievlakken diepte	Dikte eenheden	Breuk aansnijdingen	Sub model
Noordzee Supergroep	1_B_Breda SubGp.	1_B_Breda SubGp.			1
	2_B_Rupel Fm.	2_B_Rupel Fm.	2 dikte_Rupel Fm.		
	3_B_Tongeren Fm.	3_B_Tongeren Fm.	3 dikte_Tongeren Fm.		
	4_B_Asse Lp.	4_B_Asse Lp.	4 dikte_Asse Lp.		
	5_B_Brussel Zand Lp.	5_B_Brussel Zand Lp.	5 dikte_Brussel Zand Lp.		
	6_B_Dongen Fm.	6_B_Dongen Fm.	6 dikte_Leper_Oosteind Lp.		
		7.1_B_Liessel Lp.	7.1 dikte_Liessel Lp.		
Krijtkalk Groep		7.2 dikte_Gelinden_Orp Lp.			3
	7_B_Landen Fm.	7_B_Landen Fm.	7 dikte_Landen Fm.	7_B_Landen Fm.	
Rijnland Groep		8.1_B_Houtem Fm.	8.1 dikte_Houtem Fm.		2
	8_B_Krijtkalk Gp.	8_B_Krijtkalk Gp.	8 dikte_Krijtkalk Gp.	8_B_Krijtkalk Gp.	
Schieland Groep	9_B_Rijnland Gp.	9_B_Rijnland Gp.	9 dikte_Rijnland Gp.	9_B_Rijnland Gp.	2
Altena Groep	10_B_Schieland Gp.	10_B_Schieland Gp.	10 dikte_Schieland Gp.	10_B_Schieland Gp.	
Boven-Germaanse Trias Groep	11_B_Brabant Fm.	11_B_Brabant Fm.	11 dikte_Brabant Fm.	11_B_Brabant Fm.	2
	12_B_Posidonia Schalie Fm.	12_B_Posidonia Schalie Fm.	12 dikte_Werkendam_Posidonia Schalie Fm.	12_B_Posidonia Schalie	
Onder-Germaanse Trias Groep	13_B_Sleen Fm.	13_B_Sleen Fm.	13 dikte_Aalburg_Sleen Fm.	13_B_Sleen Fm.	2
Zechstein Groep		14.1_B_Muschelkalk Fm.	14.1 dikte_Muschelkalk_Keuper Fm.		
Boven RotLiegend Groep		14.2_B_Röt Randzandsteen Lp.	14.2 dikte_Röt Randkleisteen_Röt Randzandsteen		3
		14.3_B_Solling Fm.	14.3 dikte_Onder Röt Randkleisteen Lp_Solling Fm.		
Limburg Groep		14.4_B_Hoofd Bontzandsteen SubGp.	14.4 dikte_Hoofd Bontzandsteen SubGp.		3
		14.5_B_Onder Bontzandsteen SubGp.	14.5 dikte_Onder Bontzandsteen SubGp.		
Kolenkalk Groep		14.6_B_Zechstein Gp.	14.6 dikte_Zechstein Gp.		3
		14.7 dikte_Boven RotLiegend Gp.			
	14_B_Perm	14_B_Perm	14 dikte_Perm_Germaanse Trias Gp.	14_B_Perm	3
	15_B_Strijen Fm.	15_B_Strijen Fm.	15 dikte_Strijen Fm.	15_B_Strijen Fm.	
	16_B_Hellevoetsluis Fm.	16_B_Hellevoetsluis Fm.	16 dikte_Hellevoetsluis Fm.	16_B_Hellevoetsluis Fm.	3
	17_B_Maurits Fm.	17_B_Maurits Fm.	17 dikte_Maurits Fm.	17_B_Maurits Fm.	
	18_B_Ruurlo Fm.	18_B_Ruurlo Fm.	18 dikte_Ruurlo Fm.	18_B_Ruurlo Fm.	3
	19_B_Baarlo Fm.	19_B_Baarlo Fm.	19 dikte_Baarlo Fm.	19_B_Baarlo Fm.	
	20_Nabij T_Kolenkalk Gp.	20_Nabij T_Kolenkalk Gp.	20 dikte_Epen Fm.	20_Nabij T_Kolenkalk Gp.	3
	21_Nabij B_Kolenkalk Gp.	21_Nabij B_Kolenkalk Gp.	21 dikte_Kolenkalk Gp.	21_Nabij B_Kolenkalk Gp.	

5.5.1 Methodiek en bevindingen per submodel

5.5.1.1 Submodel 1 Zeeland - basis Breda Subgroep-basis Formatie v. Landen

De modellering van submodel 1 betrof een aantal opeenvolgende stappen (Figuur 5.5) die hieronder worden toegelicht.



Figuur 5.5 Modellerestappen van submodel 1.

Maken grensvlakken

De seismische interpretatie van de grensvlakken van het Kenozoïcum zijn in Petrel via het 'make surface'-proces omgezet in TWT grid (Two-Way Travel Time) met gridcellen van 100 m. Hierbij is het 'Convergent Interpolation' algoritme toegepast. Doordat de seismische interpretaties gemaakt zijn met verschillende seismische 2D surveys die niet altijd exact verticaal oplijnen, kunnen er op kruispunten van seismische lijnen soms artefacten (steilranden en bullseyes) ontstaan in de gegenereerde grensvlakken. Om deze verstoringen te minimaliseren, is rond elk snijpunt een polygoon gecreëerd waarbinnen de seismische interpretatie is weggesneden. De interpolatie van seismische interpretatiepunten buiten deze polygoon leidt dan tot een geologisch plausibeler grensvlak binnen de polygoon. Voor het maken van de grensvlakken voor submodel 1 worden geen breuken gebruikt, omdat deze in het kenozoïsche dieptebereik niet voorkomen.

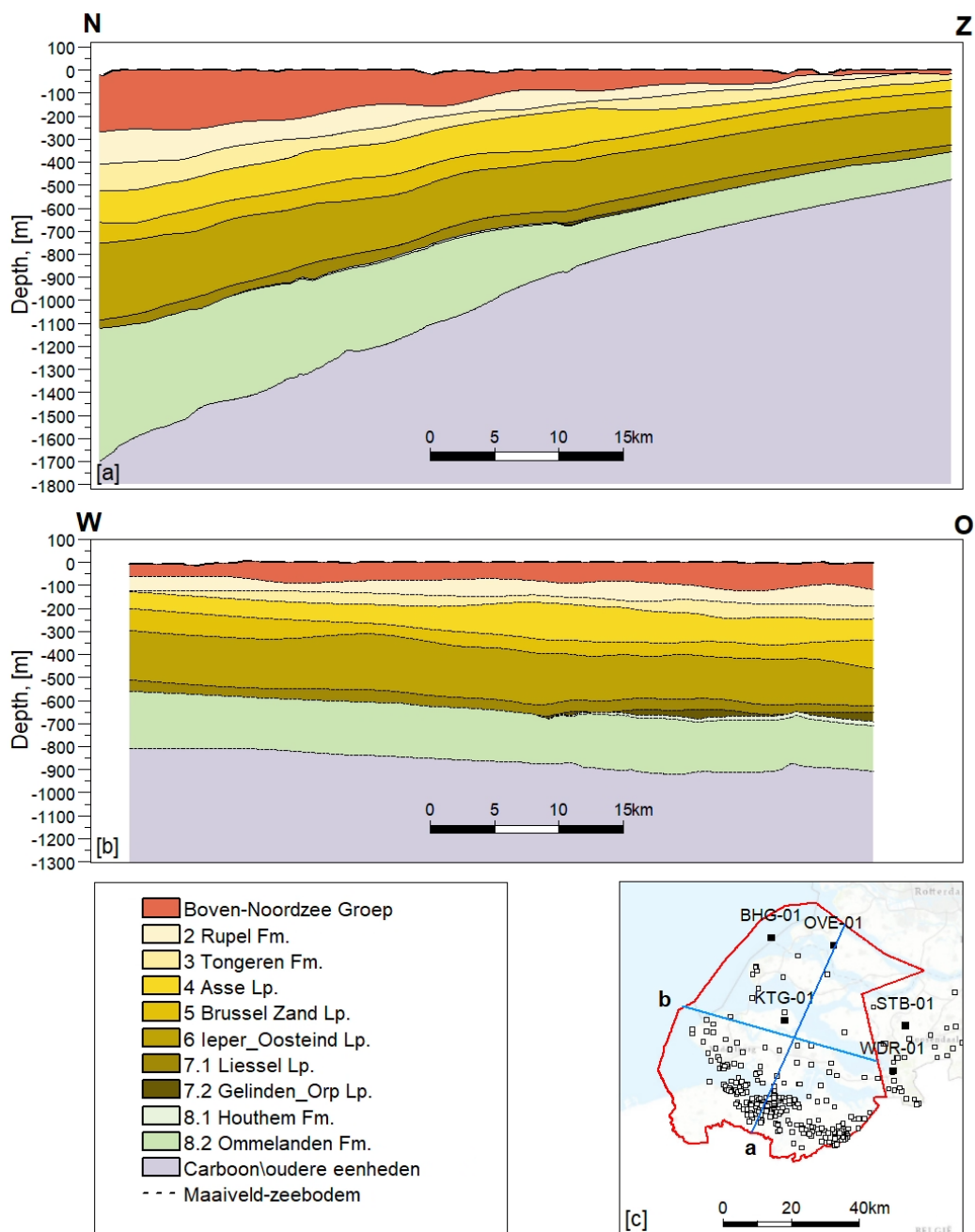
Tijd-diepte conversie

De tijd-diepte conversie van de grensvlakken in TWT is uitgevoerd met het snelheidsmodel VELMOD-3.2, in overeenstemming met de andere deelgebieden (zie 5.3). Dit levert grensvlakken in diepte. De diepte wordt aangeduid als “True Vertical Depth” (TVD in meters).

Correctie grensvlakken

In deze stap zijn de grensvlakken in diepte allereerst gecorrigeerd met boorstratigrafische data uit ondiepe (Dino) en diepe boringen (www.nlog.nl). De ondiepe boringen zijn gefilterd uit de DGMplus-database met behulp van een Python-script. Vervolgens is een kwaliteitscontrole op de data uitgevoerd. In sommige gevallen bleek het eindpunt van de boring te zijn ingevoerd als de basis van de onderste eenheid waardoor het grensvlak te hoog komt te liggen. Deze datapunten zijn in de modellering niet verder meegenomen. Daarnaast zijn Belgische stratigrafische markers in boringen binnen het inventarisatiegebied gebruikt voor het modelleren van grensvlakken. Er is een correctie toegepast om de Belgische hoogtes in TAW (Tweede Algemene Waterpassing) om te zetten naar NAP (Normaal Amsterdams Peil). De correctiefactor is gebaseerd op de waterhoogte ten opzichte van NAP volgens gegevens van Rijkswaterstaat Waterinfo (rws.nl).

De Tongeren Formatie, de Rupel Formatie en de Breda Subgroep worden in het zuiden van het submodel afgesneden door het grensvlak van de basis van het Kwartair (Figuur 5.6). Dit vlak moet dus in de modellering worden betrokken, maar bestaat niet als individueel grensvlak in het DGM v2.2 model. Het basis Kwartair grensvlak is daarom geconstrueerd aan de hand van de basissen van de formaties van Naaldwijk, Koewacht, Kreftenheye en Boxtel en de Eem Formatie. Vervolgens is de verbreiding van de diepere (pre-Kwartair) eenheden afgesneden op dit vlak.



Figuur 5.6 Dwarsdoorsneden [a en b] door het submodel 1 in Zeeland. Kaartbeeld [c] toont de locatie van de doorsnede, het deelmodelgebied H30-Diepe Zeeland en de diepe boringen.

Toevoegen H3O-De Voorkempen modeldata

Een deel van de modelleenheden komt overeen met de modelleenheden uit het H3O-De Voorkempen model. Om de aansluiting op dit model te waarborgen zijn deze eenheden als extra gegevens toegevoegd. Op deze manier worden randeffecten (diepte- en dikteverschillen) op de grens van het submodel en het Voorkempen gebied voorkomen.

Smoothing en afknippen

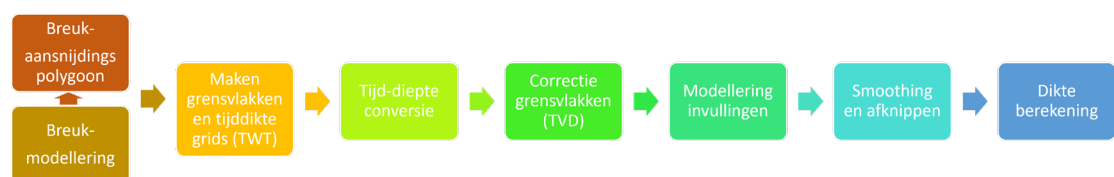
De gemodelleerde grensvlakken zijn vervolgens bewerkt om kleine oneffenheden te verwijderen. Na deze stap zijn de Belgische en H3O-de Voorkempen gebieden van het submodel afgeknipt, zodat het submodel alleen het modelgebied binnen de Provincie Zeeland beslaat.

Dikteberekening

De dikte van eenheden tussen de grensvlakken is berekend aan de hand van de diepteligging van twee grensvlakken (top minus basis).

5.5.1.2 Submodel 2 Zeeland, Voorkempen en de Roerdalslenk – Basis Formatie v. Landen – basis Perm

De Roerdalslenk wordt gekenmerkt door een zeer complexe structurele stijl. Deze complexiteit brengt grote uitdagingen met zich mee voor veel stappen van de modellering, zoals het definiëren van verbreidingen en onderlinge contacten, breukmodellering, TD-conversie, de “well-tie” en de toevoeging van een invulling. Met name het grote aantal breuken en de onderlinge relaties tussen de breuken zijn een complicerende factor (zie ook paragraaf 4.5). Door deze structurele complexiteit bleek het voor dit deelgebied niet haalbaar te zijn om met de standaard functionaliteit van de gebruikte software binnen het tijdsbestek van het project een gewenst resultaat (zie Figuur 5.1) op te leveren en is een alternatieve methode opgezet. De modellering van submodel 2 betrof een aantal opeenvolgende stappen (Figuur 5.7) die hier onder worden toegelicht.



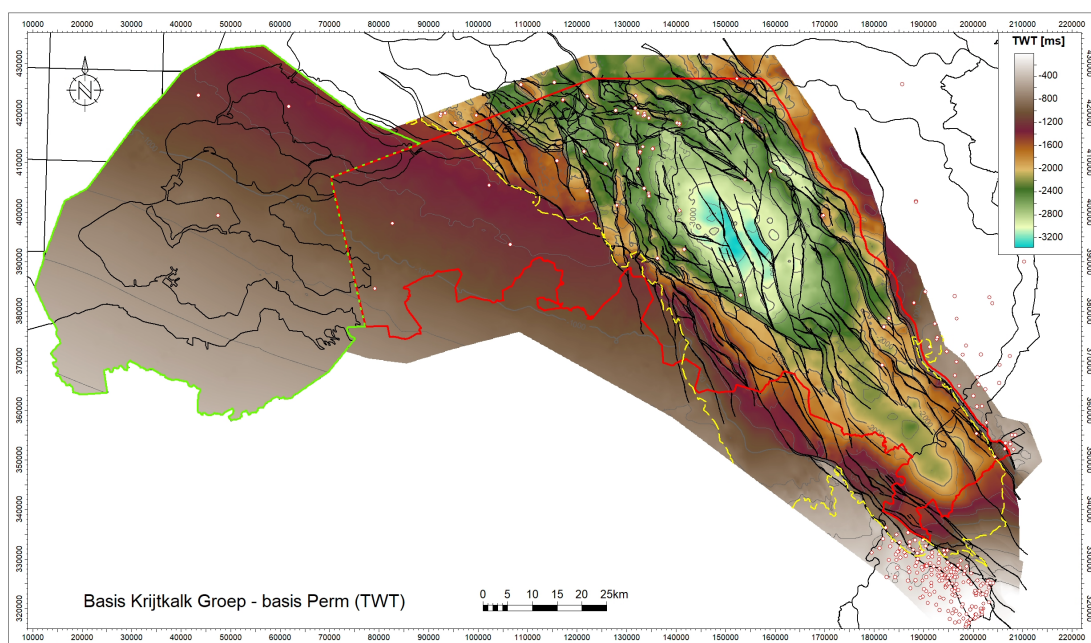
Figuur 5.7 Modelleerstappen van submodel 2.

Modellering in tijd

Een belangrijke eerste stap in de modellering van dit deelgebied is het combineren van de seismische punten voor het raamwerk van grensvlakken en discordanties (paragraaf 5.2). Zo toont Figuur 5.2 de samenstelling van data inclusief gegevens buiten de grenzen van het modelgebied voor het combinatievlak basis Krijtkalk Groep en basis Perm. Op vergelijkbare wijze zijn ook de overige grensvlakken, inclusief die met een beperkte verbreiding (bijvoorbeeld basis Schieland Groep), gecombineerd met data buiten de verbreiding van aangrenzende of erosieve eenheden, om na stapeling van de geïnterpoleerde vlakken de onderlinge contacten en afsnijdingen goed te kunnen definiëren.

Met de alternatieve methode wordt met een beperkt aantal seismische punten rondom het breukvlak, per eenheid en per breuk een breuk(aansnijdings)polygoon gemaakt. Dit proces is meerdere keren herhaald zodat interpretaties rond breuken aangepast konden worden om het resultaat in een aantal iteraties te verbeteren. Per eenheid zijn vervolgens alle breukpolygoonen samengevoegd en meegenomen in de interpolatie van het betreffende grensvlak. Op deze manier wordt het breukverzet langs het breukvlak onderdeel van het gemodelleerde grensvlak.

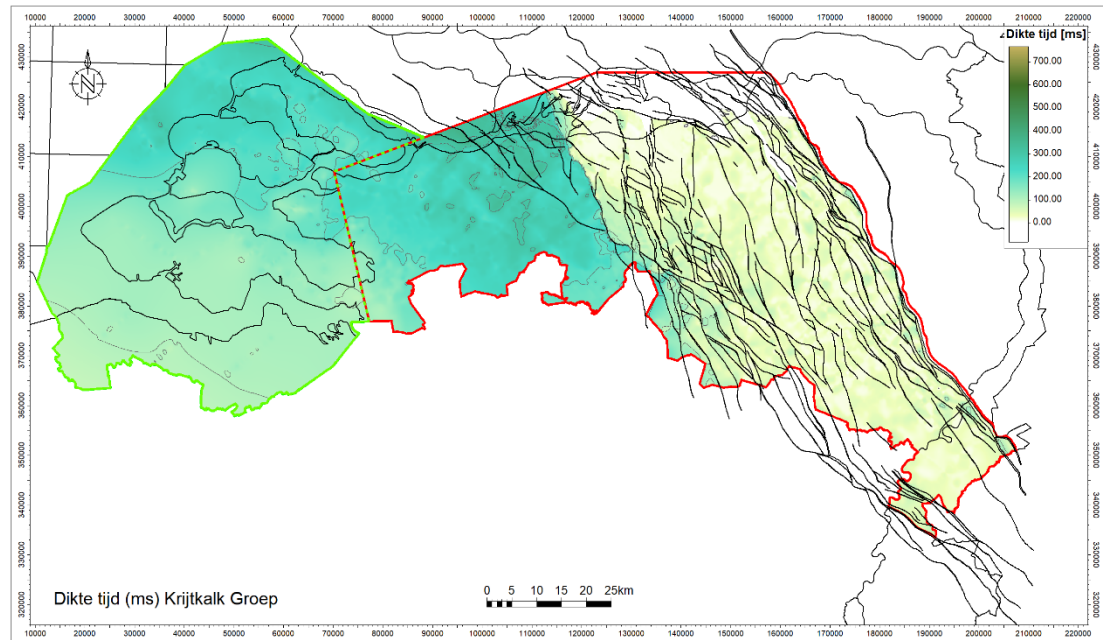
De modelleerresultaten geven een goed regionaal beeld van de complexe structurele stijl in het modelgebied (Figuur 5.8), al worden er door de gehanteerde methode ook oneffenheden geïntroduceerd. De methode is gevoelig voor inconsequenties in de seismische interpretatie, bereik van dataselectie rondom het breukvlak, datadichtheid en grote variaties in het dieptebereik van de geselecteerde interpretatie. Het gevolg is dat in de grensvlakken onrealistische pieken kunnen voorkomen en de breukaansnijdingspolygoonen een wat onregelmatig verloop laten zien. Door de genoemde iteraties zijn een deel van de onregelmatigheden opgelost. Inconsequenties in de interpretatie als gevolg van verticale verschillen in seismische data ("time-shifts") zijn niet eenvoudig op te lossen en vragen idealiter om aanpassing van de onderliggende seismische data. Net als bij submodel 1 is de seismische interpretatie op het snijpunt van seismische lijnen weggesneden om verstoringen op kruisingen van seismische lijnen te beperken. Desalniettemin laten deze time-shifts op bijvoorbeeld de basis Krijtkalk Groep een duidelijke footprint achter (Figuur 5.9). De Krijtkalk Groep is relatief vlak en in de Roerdalslenk erg dun waardoor time-shifts al snel binnen het bereik van de variatie in dikte en diepte vallen. Deze fouten zijn er dan moeilijk uit te filteren.



Figuur 5.8 Kaartbeeld van het gecombineerde grensvlak (in TWT) van de basis Krijtkalk Groep (buiten de gele stippellijn) en basis Perm (binnen de gele stippellijn) die samen de top van het Carbooninterval vormen.

Een belangrijk grensvlak is het combinatievlak van de basis Krijtkalk Groep en basis Perm (Figuur 5.8) dat de top van het Carbooninterval voorstelt. Dit grensvlak scheidt de submodellen 2 en 3 en laat goed de structurele complexiteit en stapsgewijze overgang van het centrale diepe deel van de Roerdalslenk richting het Kempen Blok in het zuidwesten zien.

De Perm eenheden en de mesozoïsche eenheden (exclusief de Krijtkalk Groep) zijn vrijwel uitsluitend aanwezig in het sterk verbreukte gebied.



Figuur 5.9 Tijddikte kaart van de Krijtkalk Groep. De variatie in dikte binnen de Roerdalslenk is met name toe te kennen aan time-shift tussen de geïnterpreteerde seismische lijnen.

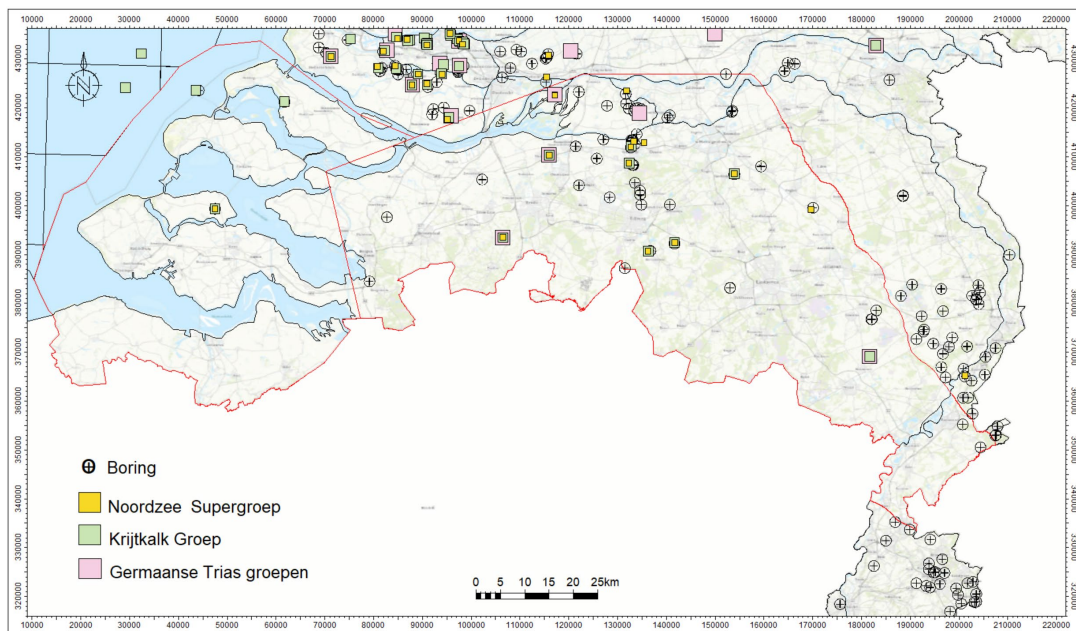
Tijd-diepte conversie en well-tie

Voor tijd-diepte conversie met VELMOD-3.2 staat de keuze van grensvlakken grotendeels vast (Tabel 5.1). De snelheidsintervallen corresponderen voor het grootste deel met de lithostratigrafische indeling op groepsniveau (Paap et al., 2024, Stratigrafische Nomenclator). Voor een aantal stratigrafische intervallen zijn in VELMOD de snelheidsintervallen ook samengenomen (supergroep) of juist verder onderverdeeld (subgroep). Omdat de basis Formatie van Landen de top is van submodel 2, is voor de diepte conversie van dit eerste interval de v_0 -kaart van de Noordzee Supergroep gebruikt. Ook voor het gehele interval van de Boven- en Onder-Trias Groepen is in VELMOD een v_0 -kaart beschikbaar die voor de tijd-diepte conversie van submodel 2 is gebruikt. Voor de Zechstein Groep en Boven Rotliegend Groep is een pragmatische keuze gemaakt die beschreven is in paragraaf 5.3. Het is verder belangrijk op te merken dat een layer-cake snelheidsmodellering een sequentieel proces is en dat eventuele fouten in ondiepere grensvlakken progressief kunnen doorwerken naar diepere grensvlakken. Voor de tijd-diepte conversie langs de randen van het modelgebied zijn de VELMOD- v_0 kaarten geëxtrapoleerd over de landsgrenzen.

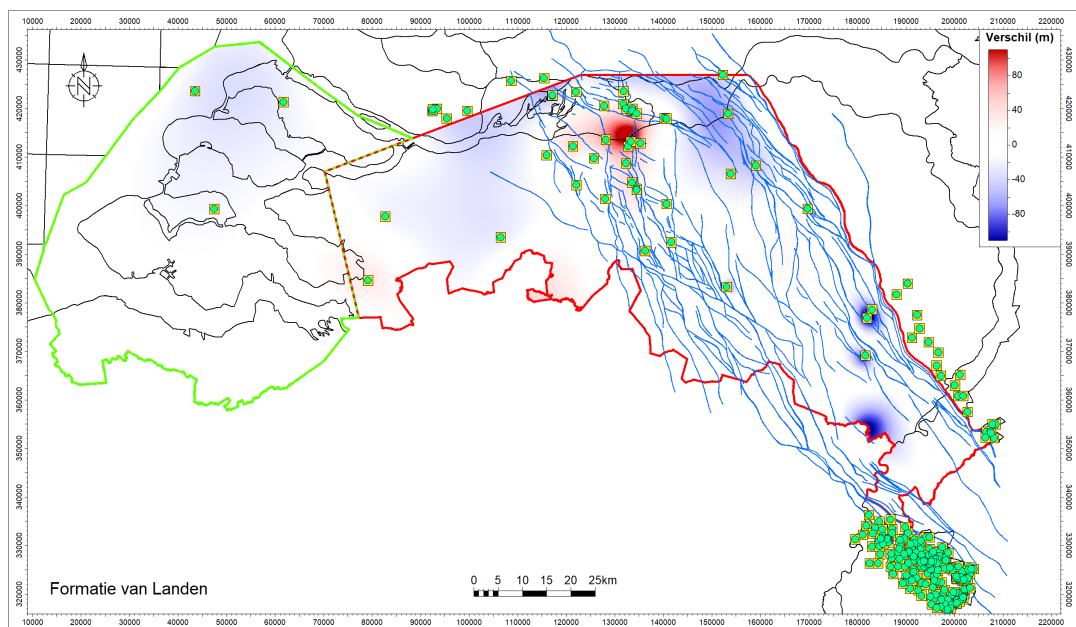
Correctie grensvlakken

Het aantal boringen waar de v_0 -kaarten van VELMOD op gebaseerd is, verschilt per versie van het model en per stratigrafische eenheid (Figuur 5.10). Voor VELMOD 3.2 zijn andere selectiecriteria gehanteerd dan voor VELMOD 3.1 en dit heeft soms negatieve consequenties voor dit submodel. Zo is bijvoorbeeld boring NDW-01 niet meegenomen in de interpolatie van het v_0 -vlak van de Noordzee Supergroep. In het oostelijk deel van de Roerdalslenk resulteert dit in substantiële verschillen tussen de diepte in de boringen (NDW-01, SMG-01 en de Belgische boring MLB-01) en het naar diepte geconverteerde grensvlak basis Formatie van Landen. Deze verschilwaarden worden geïnterpoleerd en gevisualiseerd als vlak (Figuur

5.10) dat vervolgens gebruikt kan worden om het grensvlak te corrigeren. Om te voorkomen dat er hele grote pieken (“bullseyes”) ontstaan in het correctievlak kan de regionale invloed van de verschilwaarden zo ingesteld worden zodat het resultaat plausibeler wordt (Figuur 5.11) zonder dat er lokaal een overcorrectie ontstaat.

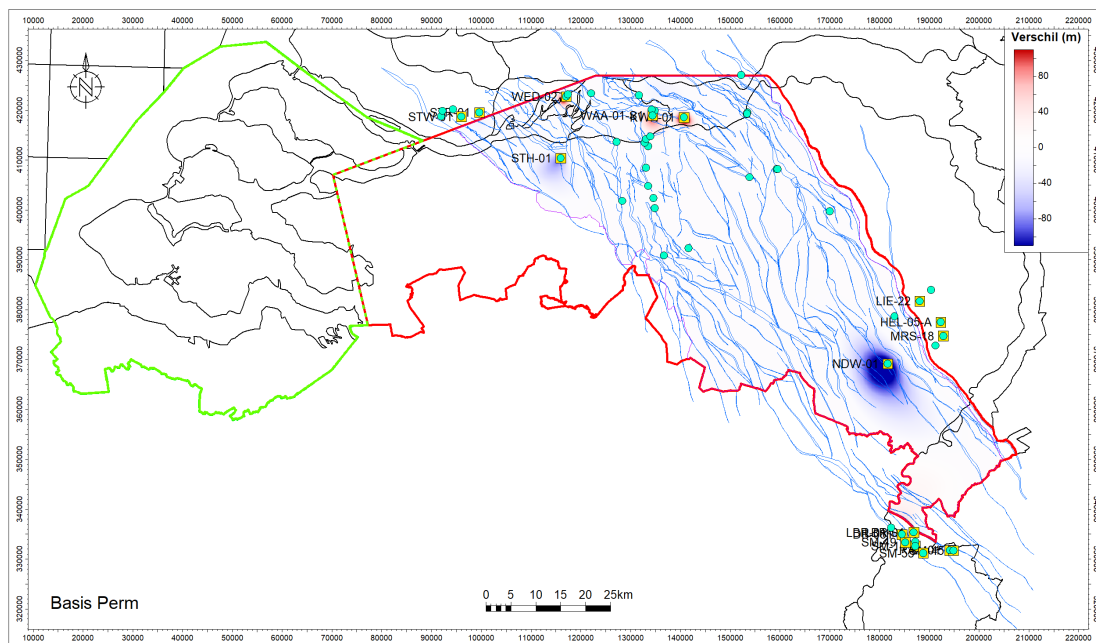


Figuur 5.10 Boringen gebruikt in Velmod 3.2 binnen het datainventarisatiegebied voor de lithostratigrafische eenheden Noordzee Supergroep, Krijt-kalk Groep en Germaanse Trias Groepen.



Figuur 5.11 Verschilwaarden Formatie van Landen. De groene cirkels markeren de voor deze eenheid beschikbare boringen. De boringen aangeduid met een vierkant geven de voor well-tie geselecteerde boringen. In dit geval zijn alle beschikbare boringen voor de well-tie meegenomen (in tegenstelling tot andere eenheden).

Het aantal boringen dat reikt tot onder de basis Perm is zeer beperkt (Figuur 5.12). Veel boringen eindigen in het Laat Perm-Trias interval. Dit leidt frequent tot een situatie waarbij de basis van bovenliggende eenheden wel is bijgesteld op basis van de diepte in de boring, maar die van de basis Perm niet. Dit kan ertoe leiden dat nabij deze boringen de diepte en dikte van het Laat Perm-Trias interval verkeerd ingeschat wordt. Deze onzekerheid is nog groter in de diepste delen van de Roerdalslenk, waar helemaal geen boringen en snelheidsdata beschikbaar zijn.



Figuur 5.12 Verschilwaarden Basis Perm. De groene cirkels markeren de voor deze eenheid beschikbare boringen. De boringen aangeduid met een vierkant betreffen de voor de well-tie geselecteerde boringen.

Modellering van de invullingen

In de Krijtkalk Groep en het Perm-Trias interval is een extra onderverdeling gemaakt van de gemodelleerde eenheden die op basis van seismische interpretaties zijn gemaakt. Deze onderverdeling is uitgevoerd met de functionaliteit van de gebruikte software (Petrel, v2023) waarin op basis van een keuze uit verschillende instellingen een zonering aangebracht kan worden tussen twee grensvlakken van het model. Het model betreft een “simple model” waarin alleen de grensvlakken als brondata worden gebruikt.

Om de basis Houthem Formatie in het model te brengen zijn de dieptewaarden in de boringen ten opzichte van de basis Formatie van Landen geïnterpoleerd. In het resulterende diktegrid zijn geen breuken meegenomen (hierbij wordt impliciet verondersteld dat er geen dikteverschillen zijn over breuken heen). Gezien de beperkte dikte van de betreffende eenheid en alle onzekerheden in de basis en dikte grid van de Krijtkalk groep als geheel, is geconcludeerd dat deze omissie aanvaardbaar is. De algemene dikte trend toont dat de eenheid in westelijke richting dunner wordt en uiteindelijk afwezig is (zie Bijlage 3).

Het Perm-Trias interval is opgedeeld in zeven intervallen (Tabel 5.3). De onderverdeling is uitgevoerd in twee stappen. De eerste stap betrof een lagenstapeling vanaf de basis Perm door het toekennen van percentages voor de dikte van de Boven- en Onder-Germaanse Trias groepen. De percentages en dikte zijn gekozen op basis van een gemiddelde best fit

met de dieptes en diktes in de boringen. Vanwege het beperkte aantal boorgegevens zijn voor de Zechstein- en de Boven-Rotliegend groepen constante diktes aangenomen. Deze aannames worden ook gestaafd door de overwegend parallelle reflectiepatronen in de seismiek. De tweede stap betrof een well-tie om op de locatie van de boringen eventuele verschilwaarden te corrigeren, zoals eerder ook voor de op seismiek gebaseerde grensvlakken is gedaan. Deze werkwijze levert, de beperkte hoeveelheid boordata in ogenschouw genomen, een zeer plausibel resultaat op. Wel geeft de proportionele opbouw vanaf de basis Perm een wat grillig beeld langs de randen van de slenk (Figuur 5.13). Het werken met verticale, betrekkelijk constante diktes leidt ertoe dat bij steile laagstanden (bijvoorbeeld onder het erosieve contact met de basis Krijtkalk Groep) hele dunne lagen niet altijd goed tot uiting komen (Figuur 5.13, dwarsdoorsnede a). Aan de zuidrand en meer naar het oosten van de Roerdalslenk is het erosieve contact van de Onder- en Hoofd Bontzandsteen subgroepen met de basis Krijtkalk Groep wel zoals beoogd (Figuur 5.13, dwarsdoorsnede b).

Tabel 5.3 Overzicht van invullingen binnen het Perm-Trias interval binnen submodel 2.

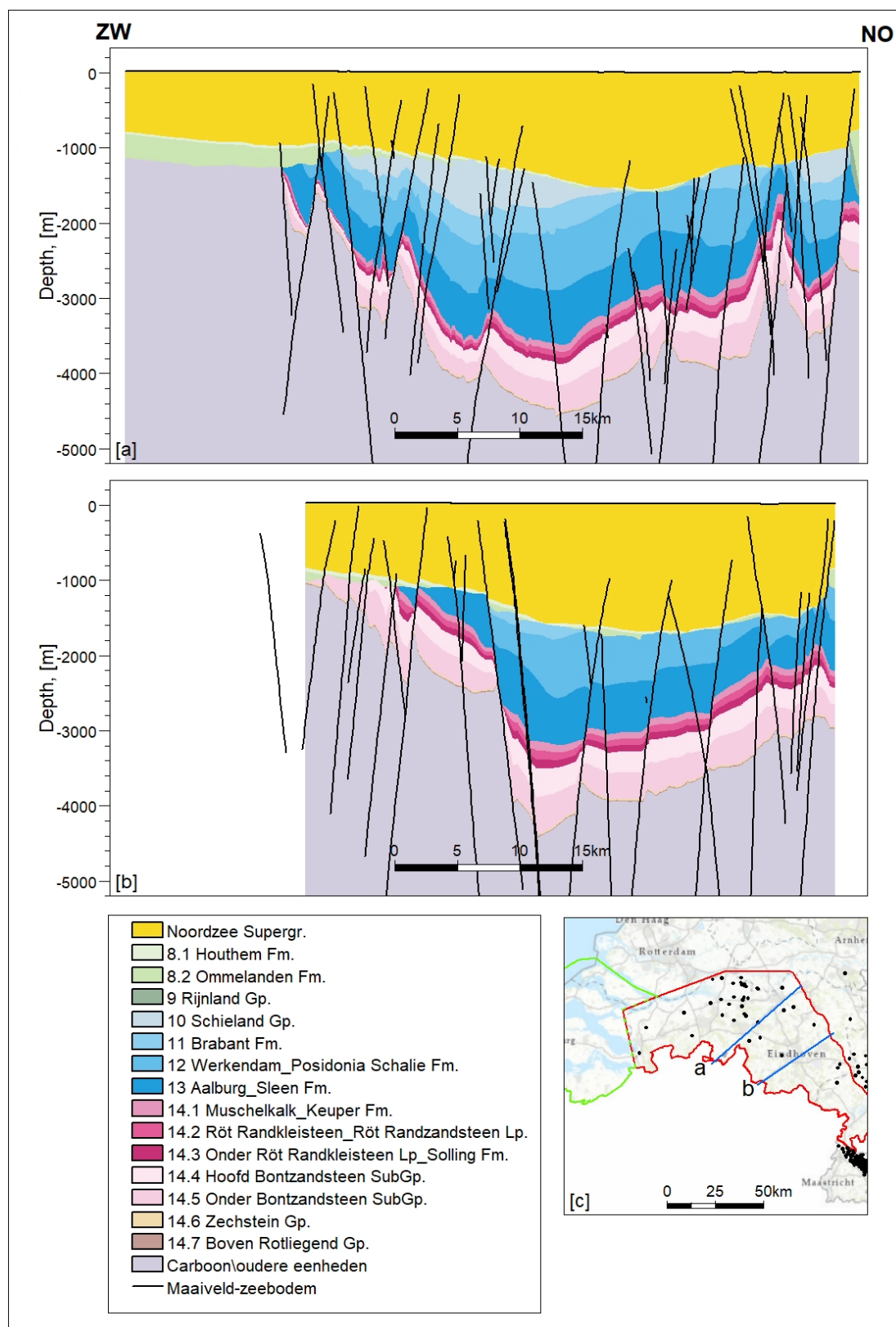
Lithostratigrafische eenheden	Grensvlakken	Invulling vlakken	Zones	Zonering
Altena Groep	13_B_Sleen Fm.			
Boven-Germaanse Trias Groep		14.1_B_Muschelkalk Fm.	14.1_dikte_Muschelkalk_Keuper Fm.	10%
		14.2_B_Röt Randzandsteen Lp.	14.2_dikte_Röt Randkleisteen_Röt Randzandsteen Lp.	10%
		14.3_B_Solling Fm.	14.3_dikte_Onder Röt Randkleisteen Lp_Solling Fm.	10%
Onder-Germaanse Trias Groep		14.4_B_Hoofd Bontzandsteen SubGp.	14.4_dikte_Hoofd Bontzandsteen SubGp.	30%
		14.5_B_Onder Bontzandsteen SubGp.	14.5_dikte_Onder Bontzandsteen SubGp.	40%
Zechstein Groep		14.6_B_Zechstein Gp.	14.6_dikte_Zechstein Gp.	20 m
Boven RotLiegend Groep			14.7_dikte_Boven Rotliegend Gp.	15 m
	14_B_Perm			

Smoothing en bijsnijden

De gemodelleerde grensvlakken zijn vervolgens bewerkt om kleine oneffenheden te verwijderen. Na deze stap is het Belgische gebied van het submodel afgeknipt.

Dikteberekening

De dikte van eenheden tussen de grensvlakken is berekend aan de hand van de diepteligging van twee grensvlakken (top minus basis).



Figuur 5.13 Dwarsdoorsneden door submodel 2 (a, b). Het kaartbeeld (c) toont de locatie van de doorsneden, de H30-diepe deelmodelgebieden en de diepe boringen.

5.5.1.3 Submodel 3 Zeeland en de Voorkempen - basis Formatie van Landen-Nabij basis Kolenkalk Groep



Figuur 5.14 Modelleerstappen van submodel 3.

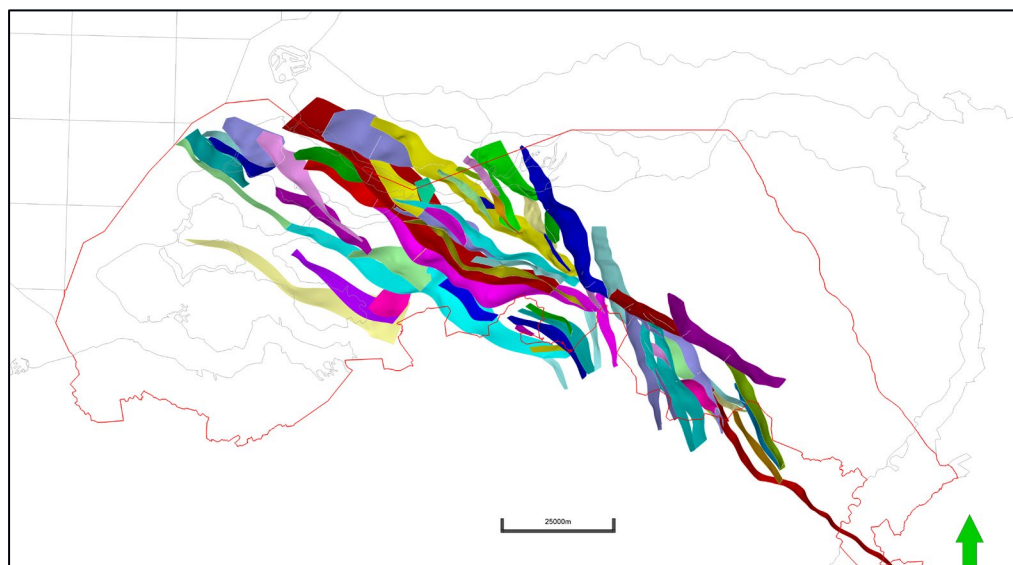
Voor het Carboon submodel ten zuiden van de Veldhoven breukzone is de structural modeling workflow van Petrel gebruikt. Deze is gekozen omdat het gebied structureel minder complex is (minder breuken bevat) in vergelijking met de Roerdalslenk, maar de interpretatie van de diverse grensvlakken (met name de exacte diepteligging) minder nauwkeurig is. Deze workflow geeft additionele sturing aan het modelleren van grensvlakken door bijvoorbeeld te sturen met de gemiddelde dikte van een laag en te zorgen dat de grensvlakken elkaar niet kruisen.

Voor deze workflow (Figuur 5.14) wordt een selectie van de belangrijkste breuken gemaakt die vervolgens geïnterpreteerd worden als “major” en “minor”, afhankelijk van hun onderlinge relaties (welke breuk snijdt welke) en om te zorgen dat de breuken elkaar niet kruisen (Figuur 5.15). Verder wordt binnen deze workflow gecontroleerd of de richting van het breukverzet langs het breukvlak overal consistent is. Voor het uiteindelijke breukenmodel zijn 67 breuken gebruikt; 43 breuken lopen door tot aan de basis Noordzee Groep, 24 breuken lopen ook daarboven door.

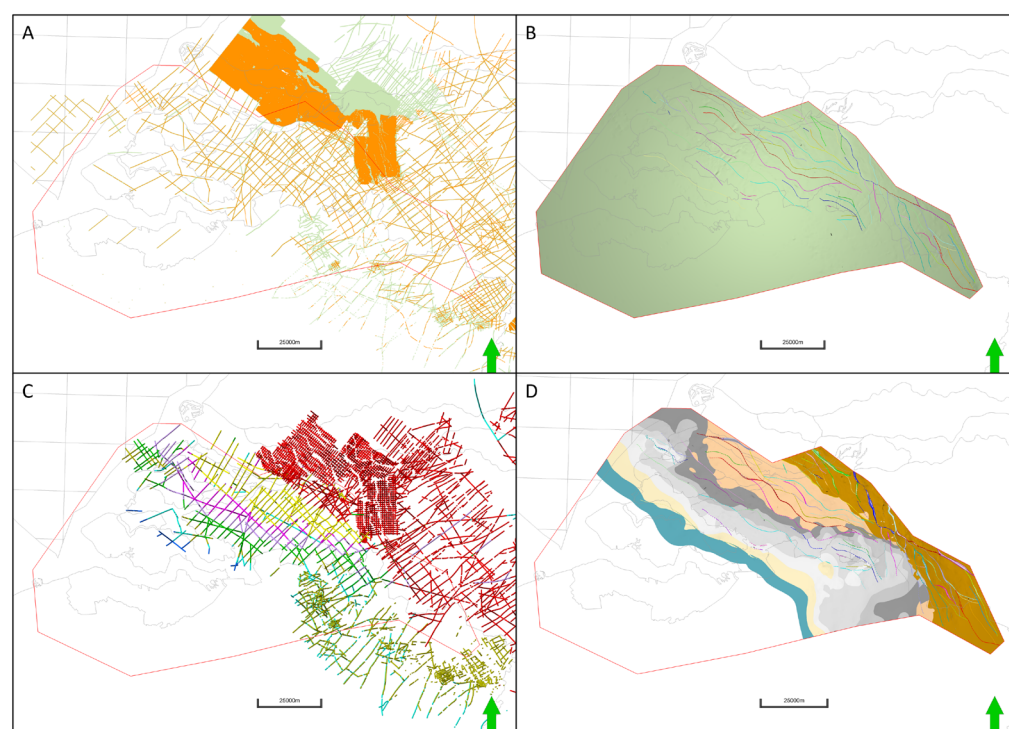
Voor de modellering zijn de interpretatiepunten van de basis Formatie van Landen, basis Krijtkalk Groep, basis Perm, basis Formatie van Strijen, basis Formatie van Hellevoetsluis, basis Formatie van Maurits, basis Formatie van Ruurlo, basis Formatie van Baarlo, basis Formatie van Epen en nabij basis en top Kolenkalk Groep gebruikt. De Carbooneenheden zijn concordant gemodelleerd, de basis Formatie van Landen, basis Krijtkalk Groep en basis Perm eenheden zijn belangrijke discordanties (zie doorsnede in Figuur 5.17).

Voor de grensvlakken basis Formatie van Landen en basis Krijtkalk Groep zijn interpretatiepunten van het Belgisch model en gegevens van ondiepe Belgische boringen meegenomen. Voor de eenheden basis Perm, basis Formatie van Baarlo en basis Formatie van Epen zijn alleen de interpretatiepunten uit het Belgisch model meegenomen (Figuur 5.16).

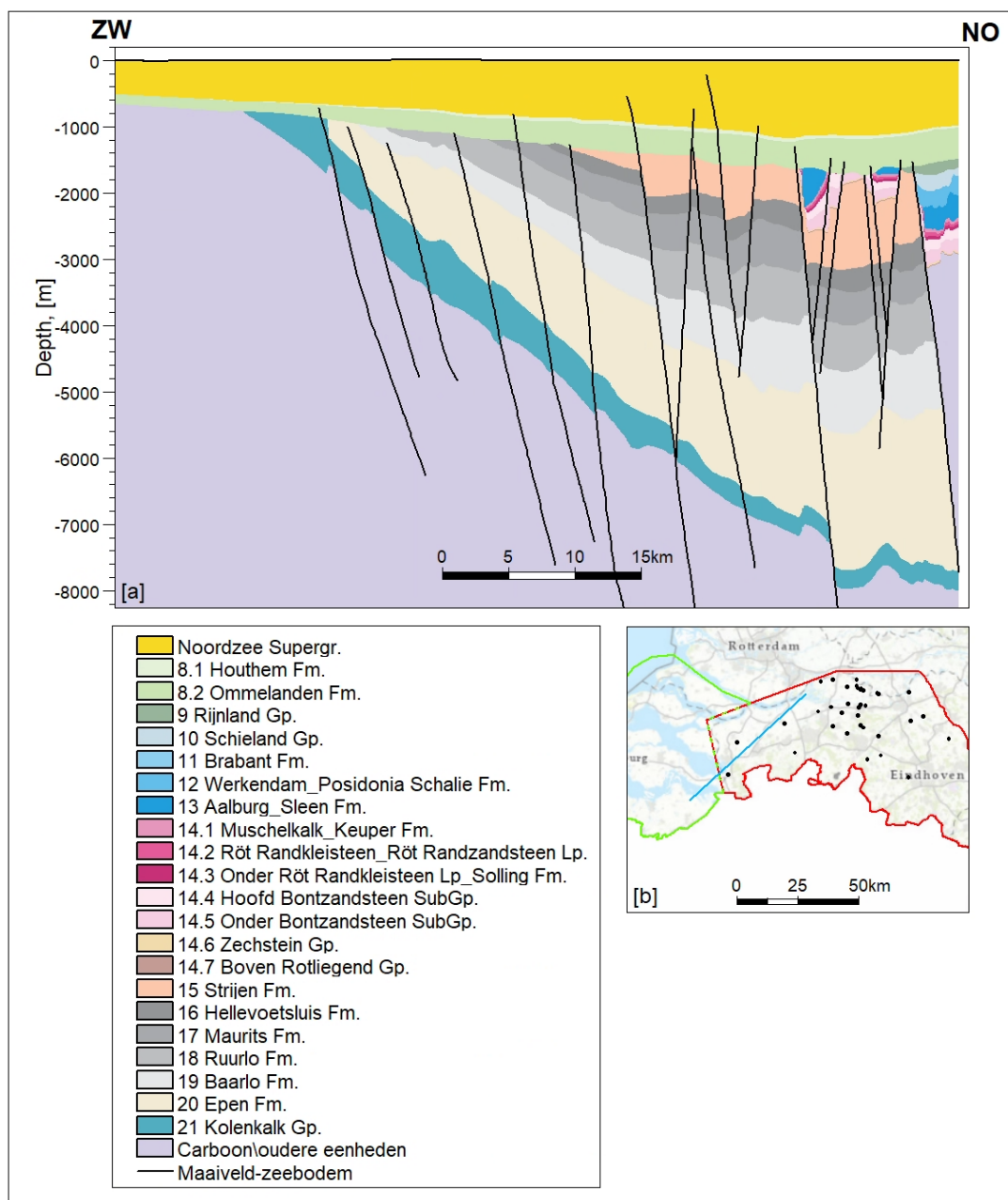
De vervolgstappen van de modellering van submodel 3 zijn identiek aan die van submodel 2 behalve dat er geen invullingen gemodelleerd zijn.



Figuur 5.15 Breukenmodel voor het Carboon van submodel 3. De kaart toont een bovenaanzicht van de driedimensionale breukvlakken. De witte lijnen op de breukvlakken tonen de door Petrel berekende intersecties van breukvlakken op basis van de opgelegde hiërarchische classificatie van breuken.



Figuur 5.16 Overzicht van de seismische data en het resulterende model van submodel 3: a) Interpretatie van puntensets van de basis Formatie van Landen en basis Krijtkalk Groep. Hierbij zijn ook Belgische interpretaties en boorgegevens meegenomen (losse punten in het zuidwesten). b) Breukaansnijdingen met het basis Krijtkalk Groep grensvlak, deze worden meegenomen in de modellering. c) seismische interpretatie punten in Nederland en België voor basis Perm, basis Formatie van Baarlo en basis Formatie van Epen en basis Kolenkalk Groep. d) Subcropkaart van de basis Krijtkalk Groep laat zien hoe de Carbooneenheden worden afgesneden. De gekleurde lijnen tonen de breukaansneden met de basis Krijtkalk Groep.



Figuur 5.17 (a) Dwarsdoorsnede door submodel 3 op de grens van de provincies Zeeland en Noord-Brabant. Het kaartbeeld (b) toont de locatie van de doorsnede, de H30-diep deelmodelgebieden en de diepe boringen.

5.6 Beschrijving van de modeleenheden

De 21 modeleenheden uit Tabel 5.2 worden hieronder beschreven. De eenheden 1 tot en met 7 zijn alleen voor submodel 1 gemodelleerd binnen het deelmodelgebied H3O-Diep Zeeland. De eenheden 8 tot en met 14 behoren tot submodel 2. De eenheden 8 en 15 tot en met 21 zijn alleen voor submodel 3 gemodelleerd. De submodellen 2 en 3 zijn zowel in deelgebieden Zeeland en Brabant aanwezig.

Basis Breda Subgroep (1)

De basis van de Breda Subgroep vormt de top van submodel 1 in Zeeland dat het paleogene interval van de basis Breda Subgroep tot aan de basis van de Formatie van Landen omvat. De basis van de Breda Subgroep is gebaseerd op seismische kartering. De Boven-Noordzee Groep boven de basis van de Breda Subgroep (het Neogeen en Kwartair) is geen modeleenheid binnen dit project. De Breda Subgroep is in het midden en noorden van het deelmodelgebied aanwezig en verdiept in noordelijke richting. In het zuiden wordt deze afgesneden door jongere eenheden (o.a. Formatie van Naaldwijk, Formatie van Koewacht & Formatie van Eem). Afgezien van de algemene trend van verdieping in noordelijke richting toont de basis van de Breda Subgroep een lateraal wat variabel diepte patroon dat overeenkomt met in de seismiek geobserveerde insnijdingen in de Rupel Formatie. De diepte van de basis Breda Subgroep — en daarmee ook de bovenkant van het deelmodel 1 — varieert van ~10 tot ~350 m onder NAP.

Rupel Formatie (NURU) (2)

De Rupel Formatie is niet verder onderverdeeld in het model. Deze modeleenheid is evenals de Breda Subgroep aanwezig in het midden en noorden van het deelmodelgebied en wordt in het zuiden door jongere eenheden afgesneden. De lijn van afsnijding ligt zuidelijker dan die van de basis Breda Subgroep. De top van de Rupel Formatie wordt dus gevormd door een combinatievlak van de basis Breda Subgroep en Kwartaire eenheden. De basis van de Rupel Formatie is gebaseerd op seismische kartering. Van zuid naar noord neemt de dikte van de eenheid toe van 0 tot ~190 m. De diepte van de basis neemt toe van ~10 tot ~450 m onder NAP.

Formatie van Tongeren (3)

De basis van de Formatie van Tongeren wordt in het meest zuidelijk deel van het deelmodelgebied, evenals bovenbeschreven eenheden, afgesneden door Kwartaire eenheden van de Boven-Noordzee Groep en in het zuidwesten door de basis Rupel Formatie. In tegenstelling tot bovengenoemde eenheden is voor deze eenheid zeer weinig informatie uit boringen beschikbaar om een goede “well-tie” in diepte te kunnen maken. Binnen het gebied geeft alleen boring KTG-01 informatie en is de aanwezigheid in noordelijke richting gebaseerd op het verloop van reflectoren in de seismiek die een min of meer conforme stapeling met onder- en bovenliggende eenheden laat zien. Van zuid naar noord neemt de dikte van de eenheid toe van 0 tot ~180 m. De diepteligging van de basis neemt toe van ~15 tot ~650 m onder NAP.

Laagpakket van Asse (4)

Het Laagpakket van Asse is over het gehele gebied aanwezig. Het betreft de jongste eenheid in de Formatie van Dongen. De basis van de het laagpakket is gebaseerd op seismische kartering en representeert een concordante overgang naar het onderliggende Brussel Zand Laagpakket. Ook deze eenheid toont een algemene trend van verdieping richting het noorden. Dieptes variëren van ~35 tot ~730 m onder NAP. Maximale diktes zijn aanwezig

aan de westrand van het modelgebied en in het centrale deel. In het zuiden en zuidoosten heeft de eenheid minimale diktes. De diktes variëren van ~20 tot ~130 m.

Brussel Zand Laagpakket (5)

Het Brussel Zand laagpakket is het tweede laagpakket dat wordt onderscheiden binnen de Formatie van Dongen en is in het gehele deelmodelgebied aanwezig. De basis van laagpakket is gebaseerd op seismische kartering. In het deelmodelgebied ligt de eenheid concordant op de onderliggende en oudere Formatie van Dongen. De eenheid volgt de algemene verdiepende trend met minimale diepte van ~100 in het zuiden tot ~860 m onder NAP in het noorden. De dikte van dit laagpakket varieert tussen ~40 en ~150 m. De maximale dikte wordt bereikt in het noordoosten.

Formatie van Dongen – Laagpakketten van Ieper en Oosteind (6)

De oudste eenheid binnen de formatie van Dongen omvat de gecombineerde Ieper en Oosteind laagpakketten. Hier is geen nader onderscheid aangebracht. De basis van de eenheid is gebaseerd op seismische kartering. Ook deze modelleenheid is in het gehele deelmodelgebied aanwezig en volgt de algemene verdiepende trend. Het diepteverloop van de basis varieert van ~280 in het zuiden tot ~1110 meter onder NAP. De dikte varieert tussen ~110 en 380 m en toont een toename van zuidoost naar noordwest.

Formatie van Landen - Laagpakket van Liessel (7.1)

De basis van het Laagpakket van Liessel betreft een invulling binnen de Formatie van Landen en is bepaald met behulp van diktes uit boringen van het onderliggende Gelinde-Orp laagpakket. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart die bij het dieptegrid van de Basis Formatie van Landen zijn afgetrokken om zodoende het basis grensvlak van het Laagpakket van Liessel te berekenen. Ook deze modelleenheid is in het gehele deelmodelgebied aanwezig en volgt de algemene verdiepende trend. Dieptes variëren tussen ~280 en ~1150 m onder NAP. De diktevariatie van deze eenheid en het onderliggende Gelinden-Orp laagpakket is op vijf Nederlandse diepe boringen gebaseerd en op de afwezigheid van het Gelinde-Orp laagpakket in Belgische boringen aan de zuidostrand van het gebied. De maximale dikte is ~100 m.

Formatie van Landen - Laagpakketten van Gelinden en Orp (7.2)

De Basis Formatie van Landen is de basis van submodel 1 en is tevens een van de gecombineerde grensvlakken met de andere submodellen. De basis van het laagpakket is gebaseerd op seismische kartering. De top correspondeert met de basis van het Laagpakket van Liessel (zie uitleg hierboven). De Formatie van Landen is in het gehele deelmodelgebied aanwezig en volgt ook de algehele diepte trend. Dieptes variëren tussen ~280 en ~1150 m. Echter het Gelinde-Orp laagpakket is alleen aanwezig in het zuidoosten van het deelgebied. Dit is een modelmatig resultaat, gebaseerd op interpolatie met het beperkte aantal diepe boringen binnen het dikte bereik van de Formatie van Landen. De maximale dikte is ~75 m.

Formatie van Houthem (CKGR) (8.1)

De Formatie van Houthem is een krijtkalkachtige kalksteen in de Krijtkalk Groep uit het Vroeg Paleoceen (Danien). Deze modelleenheid is in het gehele modelgebied aanwezig met uitzondering van de meest westelijke en zuidelijke delen van Zeeland waar de formatie wordt afgesneden door de basis van de Noordzee Supergroep. De basis van dit laagpakket is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart. De basis van de Formatie van Houthem is vervolgens bepaald door de diktekaart af te trekken van het grensvlak Basis Formatie van Landen (in Zeeland) / Basis Kenozoïcum. De Formatie

van Houthem ligt discordant op de onderliggende eenheden van de Krijtkalk Groep en wordt discordant bedekt door het Kenozoïcum. De dikte van dit laagpakket is maximaal ~60 m.

Formatie van Ommelanden (CKGR) (8.2)

De Formatie van Ommelanden bestaat uit een opeenvolging van witte, geelwitte of lichtgrijze fijnkorrelige kalkstenen. Lagen met vuursteenknollen kunnen over grote intervallen veelvuldig voorkomen. In boringen op het Kempen Blok komen ook grove, bioklastische kalkstenen en glauconiethoudende zandlagen voor; deze zijn mogelijk te duiden als eenheden binnen de lateraal equivalente Formatie van Gulpen. Deze eenheid is afgezet tijdens het Laat Krijt (Turonien-Maastrichtien). Deze modeleenheid is niet in het gehele modelgebied aanwezig; in de Roerdalslenk is de formatie afwezig of zeer dun (dikte ~0 m). De basis van deze formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Krijtkalk Groep. De dikte is verkregen door de dikte van de Formatie van Houthem van de totale dikte van de Krijtkalk Groep af te trekken. De Formatie van Ommelanden ligt discordant op onderliggende Mesozoïsche eenheden (in de Roerdalslenk) of paleozoïsche eenheden (buiten de Roerdalslenk op het Kempen Blok). De formatie wordt discordant bedekt door de Formatie van Houthem of door kenozoïsche eenheden. Deze eenheid heeft een maximale dikte van ~670 m op het Kempen Blok.

Rijnland Groep (KN) (9)

De Rijnland Groep (Hauterivien - Albien) bevat mergelige formaties, afgewisseld met kleisteen en groenzand laagpakketten. Deze modeleenheid is alleen in het uiterste noordwesten van het modelgebied lokaal aanwezig. De basis van deze groep is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Rijnland Groep. De Rijnland Groep ligt discordant op de onderliggende oudere eenheden (Altena-, Trias Groep en Paleozoïsche eenheden) en wordt discordant bedekt door de Krijtkalk Groep. De dikte van deze eenheid is maximaal ~140 m.

Schieland Groep (SL) (10)

De Schieland Groep (Berriasian tot Valanginian) is alleen aanwezig in het noordwestelijke deel van de Roerdalslenk en op breukblokken langs de Peelrandbreuk. In dit gebied behoren alle afzettingen tot het Laagpakket van Alblasterdam, dat uit klei- en siltsteen en enkele zandsteenlagen bestaat. De basis van deze groep is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Schieland Groep. Langs de grens met het West-Nederlands Bekken kan de eenheid een dikte bereiken van ruim 1400 m. Hier is een erosief contact met de onderliggende Formatie van Brabant te herkennen. In de rest van de Roerdalslenk is dit erosieve contact niet waargenomen. De Schieland Groep wordt discordant bedekt door de Rijnland Groep, de Krijtkalk Groep of de Onder-Noordzee Groep.

Formatie van Brabant (ATBR) (11)

De Formatie van Brabant bestaat uit een opvolging van klei, mergel en kalkige zandsteen intervallen en is alleen aanwezig in het noordwestelijke deel van de Roerdalslenk en op breukblokken langs de Peelrandbreuk. De jongste afzettingen van de Formatie van Brabant bestaan uit oölitische kalkstenen. De basis van deze eenheid is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Formatie van Brabant en wordt concordant (lokaal discordant) bedekt door de Schieland Groep. In gebieden die beïnvloed zijn door de Laat-Krijt inversie wordt de top gevormd door de Basis Krijtkalk Groep. De formatie heeft een redelijk uniforme dikte die in het centrale deel van de slenk tot ~860 m kan reiken.

Formatie van Werkendam (ATWD) (12)

De Formatie van Werkendam (laat Toarcien - vroeg Bathonien) bestaat uit meerdere pakketten van mergelige kleisteen en enkele afwisselingen van silt- en zandstenen. De basis van deze eenheid is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Top Posidonia Schalie Formatie. De bovengrens wordt gevormd door het concordante contact met de Formatie van Brabant. In het midden en zuiden van het gebied en langs de grote breuken is de formatie door de Basis Krijtkalk Groep afgesneden. In het centrale deel van de Roerdalslenk bereikt de eenheid een dikte van ~1300 m.

Posidonia Schalie Formatie (ATPO)

De Posidonia Schalie Formatie (Toarcien) bestaat uit organisch-rijke kleistenen met carbonaat intercalaties. Het voorkomen van de eenheid is beperkt tot het gebied van de noordwestelijke Roerdalslenk. Vanwege de geringe dikte maar constante dikte (< 30 m) is deze eenheid als een enkel vlak gemodelleerd en is geen diktegrid gemaakt. De formatie ligt concordant op de afzettingen van de Formatie van Aalburg en wordt concordant bedekt door de afzettingen van de Formatie van Werkendam. In het zuiden van het gebied en langs de Peelrandbreuk wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijtkalk Groep.

Formatie van Sleen (ATRT) en Aalburg (ATAL) (13)

De Formatie van Sleen bestaat uit donkere kleisteen met een enkel dun zandsteen pakket. De Formatie van Aalburg bestaat uit donkergrijze, soms kalkhoudende kleisteen. De overgang tussen de formaties is op seismische data niet te onderscheiden, waardoor de formaties als één modeleenheid worden samengevoegd. De basis van deze eenheid is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis van de Altena Groep. Deze modeleenheid wordt concordant bedekt door de afzettingen van de Posidonia Schalie Formatie (ATPO). In het zuiden van het gebied en langs de Peelrandbreuk wordt de top van deze formatie afgesneden door de basis van de Krijtkalk Groep (CK). De dikte van de formatie kan door synsedimentaire breukactiviteit sterk verschillen en heeft een maximale dikte van ~1150 m in het centrale deel van de Roerdalslenk.

Muschelkalk (RNMU) & Keuper formaties (RNKP) (14.1)

Deze modeleenheid omvat de Muschelkalk en Keuper formaties (onderdeel van de Boven-Germaanse Trias Groep; Anisien - Ladinien) en is in de gehele Roerdalslenk aanwezig, maar niet daarbuiten. De basis van deze modeleenheid is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart. De basis van deze eenheid is gelijk aan het gemodelleerde grensvlak Basis Muschelkalk & Keuper formaties. De top van deze groep is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Altena Groep. Deze laatste ligt concordant op de Trias Groep. Langs de randen van de Roerdalslenk wordt de eenheid bedekt door de Krijtkalk Groep. De dikte van deze eenheid is maximaal ~228 m.

Röt Randkleisteen (RNROY) & Röt Randzandsteen (RNROF) (14.2)

Deze modeleenheid (vroeg Anisien) bestaat uit een afwisseling van kleiige en zandige eenheden en is in de hele Roerdalslenk aanwezig, maar niet daarbuiten. De basis van deze eenheid is gelijk aan het gemodelleerde grensvlak Basis Hoofd Röt Randkleisteen & Röt Randzandsteen. De Onder Röt Randkleisteen & Sollingen eenheid ligt concordant op de onderliggende Hoofd Bontzandsteen Subgroep en wordt discordant bedekt door de Muschelkalk & Keuper modeleenheid. De top van deze modeleenheid is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart die gebruikt is om het Basis

Muschelkalk & Keuper formaties grensvlak te berekenen. De dikte van deze eenheid is maximaal ~224 m.

Onder Röt Randkleisteen (RNROL) & Sollingen (RNSO) (14.3)

Deze modeleenheid (laatste Olenekien - vroeg Anisien) bestaat uit een afwisseling van kleiige en zandige eenheden en is in de hele Roerdalslenk aanwezig, maar niet daarbuiten. De basis van deze groep is gelijk aan het gemodelleerde grensvlak Top Hoofd Bontzandsteen Subgroep. De Onder Röt Randkleisteen & Sollingen eenheid ligt concordant op de onderliggende Hoofd Bontzandsteen Subgroep en wordt discordant bedekt door de Röt Randkleisteen & Röt Randzandsteen modeleenheid. De top van deze modeleenheid is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart die gebruikt is om het Basis Hoofd Röt Randkleisteen & Röt Randzandsteen grensvlak te berekenen. De dikte van deze eenheid is maximaal ~224 m.

Hoofd Bontzandsteen Subgroep (RBM) (14.4)

De Hoofd Bontzandsteen Subgroep (Olenekien) bestaat uit een afwisseling van kleiige en zandige eenheden en is in de hele Roerdalslenk aanwezig, maar niet daarbuiten. De basis van deze groep is gelijk aan het gemodelleerde grensvlak Top Onder Bontzandsteen Subgroep. In het modelgebied vormt dit een concordant contact. De Hoofd Bontzandsteen Subgroep ligt concordant op de onderliggende Onder Bontzandsteen Subgroep en wordt discordant bedekt door de Röt Randkleisteen & Sollingen modeleenheid. De top van deze modeleenheid is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart die gebruikt is om het Basis Hoofd Röt Randkleisteen & Sollingen grensvlak te berekenen. De dikte van deze eenheid is maximaal ~670 m.

Onder Bontzandsteen Subgroep (RBS) (14.5)

De Onder Bontzandsteen Subgroep (laat Changhsingien - vroegst Olenekien) bestaat hoofdzakelijk uit kleistenen van de Hoofd Kleisteen Formatie, lokaal is het tijdsequivalente Nederweert Zandsteen Laagpakket aangetroffen, maar ook de Hoofd Kleisteen Formatie kan erg zandig ontwikkeld zijn. Deze modeleenheid is in de gehele Roerdalslenk aanwezig, maar niet daarbuiten. De basis van deze groep is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Trias Groep. De Onder Bontzandsteen Subgroep ligt concordant op de onderliggende Zechstein Groep en wordt discordant bedekt door de Hoofd Bontzandsteen Subgroep. De top van deze modeleenheid is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart die gebruikt is om het Basis Hoofd Bontzandsteen Subgroep grensvlak te berekenen. De dikte van deze eenheid is maximaal ~900 m.

Zechstein Groep (ZE) (14.6)

De Zechstein Groep (laat Perm) bestaat binnen het modelgebied voornamelijk uit klastische sedimenten die karakteristiek zijn voor afzetting aan de rand van het Perm Bekken. De top van deze groep is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Perm (BPU). De basis van deze eenheid is bepaald met behulp van diktes uit boringen. Deze diktes zijn vergrid tot een diktekaart. De basis van de Zechstein Groep is vervolgens bepaald door de diktekaart op te tellen bij het grensvlak Base Permian Unconformity. De Zechstein Groep ligt concordant op de onderliggende Formatie van Slochteren en wordt concordant bedekt door de Trias Groep. De dikte van deze groep is maximaal ~37 m.

Formatie van Slochteren (RO) (14.7)

De Formatie van Slochteren (Perm) bestaat uit een zeer dunne zandsteenlaag (mogelijk ook conglomeraat) en is in het hele modelgebied aanwezig. De basis van deze modeleenheid is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Base Permian Unconformity. De Formatie

van Slochteren ligt discordant op de Limburg Groep en wordt concordant bedekt door de Zechstein Groep. De dikte van deze eenheid is maximaal ~50 m, zoals aangetroffen in boringen in het noordwesten van de Roerdalslenk. Deze interpretatie is echter onzeker omdat het onderscheid met Zechstein Randzandstenen slecht te maken is.

Formatie van Strijen (DCDH) (15)

De Formatie van Strijen (Westfalien D) bestaat uit siltige tot zeer fijnkorrelige zandige kleistenen met ingeschakelde zandsteenlagen; steenkoollagen zijn nagenoeg afwezig. Deze modeleenheid is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). Naar het zuidwesten wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijt discordantie (Basis Krijtkalk Groep) of de Basis Perm. De basis van deze formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Formatie van Strijen. De Formatie van Strijen ligt meestal concordant op de onderliggende Formatie van Hellevoetsluis, maar toont lokaal soms een hoekrelatie. De formatie wordt discordant bedekt door Perm, Trias of Krijtkalk eenheden. De dikte van deze formatie is maximaal ~1620 m.

Formatie van Hellevoetsluis (DCDH) (16)

De Formatie van Hellevoetsluis (Westfalien C-D) bestaat uit kleistenen met ingeschakelde dikke zandsteenlagen; steenkoollagen zijn sporadisch aanwezig. Deze modeleenheid is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). Naar het zuidwesten wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijt discordantie (Basis Krijtkalk Groep) of de Basis Perm. De basis van deze formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Formatie van Hellevoetsluis. De Formatie van Hellevoetsluis ligt meestal concordant op de onderliggende Formatie van Ruurlo, maar toont lokaal soms een hoekrelatie. De formatie wordt concordant bedekt door de Formatie van Strijen. De dikte van deze formatie is maximaal ~860 m.

Formatie van Maurits (DCCU) (17)

De Formatie van Maurits (Westfalien B-C) bestaat uit kleistenen met ingeschakelde steenkoollagen en een gering aantal zandsteenlagen. Deze modeleenheid is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). Naar het zuidwesten wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijt discordantie (Basis Krijtkalk Groep) of de Basis Perm. De basis van deze formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Formatie van Maurits. De Formatie van Maurits ligt concordant op de onderliggende Formatie van Ruurlo en wordt concordant bedekt door de Formatie van Hellevoetsluis. De dikte van deze formatie is maximaal ~1150 m.

Formatie van Ruurlo (DCCR) (18)

De Formatie van Ruurlo (Westfalien A) bestaat uit meerdere opeenvolgingen van kleistenen met ingeschakelde steenkool- en zandsteenlagen. Deze modeleenheid is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). Naar het zuidwesten wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijt discordantie (Basis Krijtkalk Groep) of de Basis Perm. De basis van deze formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Formatie van Ruurlo. De Formatie van Ruurlo ligt concordant op de onderliggende Formatie van Baarlo en wordt concordant bedekt door de Formatie van Maurits. De dikte van deze formatie is maximaal ~1200 m.

Formatie van Baarlo (DCCB) (19)

De Formatie van Baarlo (Westfalien A) bestaat uit meerdere opeenvolgingen van klei- en siltstenen, dikke zandsteenbanken en enkele koollagen. Deze modeleenheid is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). Naar het

zuidwesten wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijt discordantie (Basis Krijtkalk Groep) of de Basis Perm. De basis van deze formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Basis Formatie van Baarlo. De Formatie van Baarlo ligt concordant op de onderliggende Formatie van Epen en wordt concordant bedekt door de formaties van Ruurlo en Maurits. De dikte van deze formatie is maximaal ~2070 m.

Formatie van Epen (DCGE) (20)

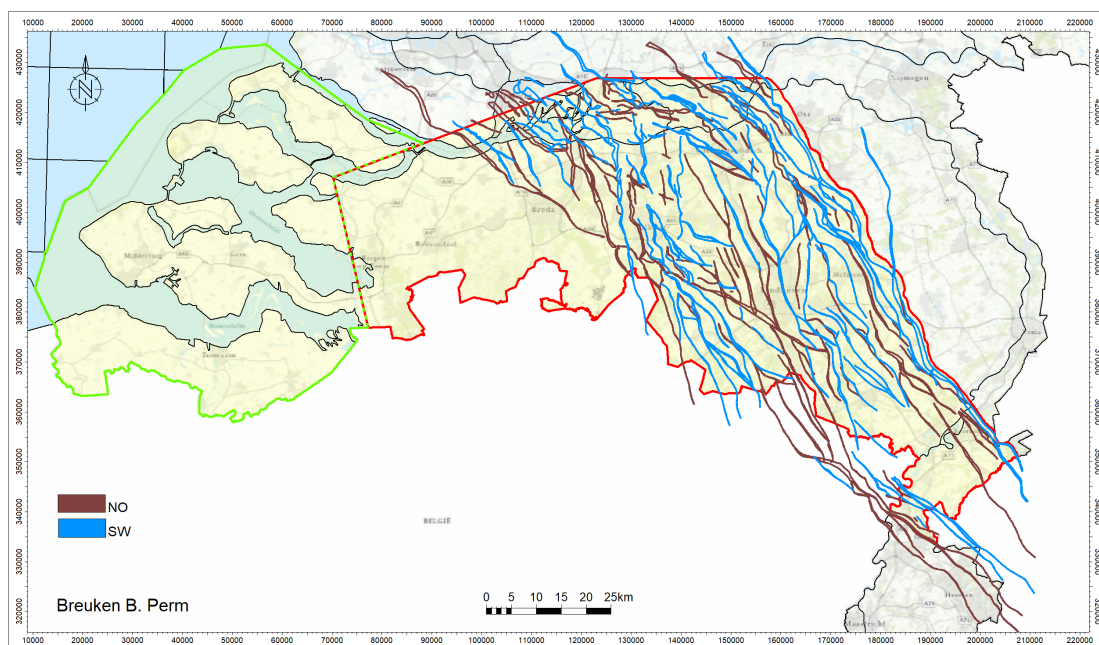
De Formatie van Epen (onder-Namurien) bestaat overwegend uit kleistenen en is in het gehele modelgebied aanwezig, maar is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). Naar het zuidwesten wordt de formatie afgesneden door de Basis Krijt discordantie (Basis Krijtkalk Groep). De basis van de formatie is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak nabij Top Basis Kolenkalk Groep. De Formatie van Epen ligt discordant op de onderliggende Kolenkalk Groep en wordt concordant bedekt door de Formatie van Baarlo. De dikte van deze formatie is maximaal ~3070 m en is daarmee de dikste modeleenheid.

Kolenkalk Groep (CL) (21)

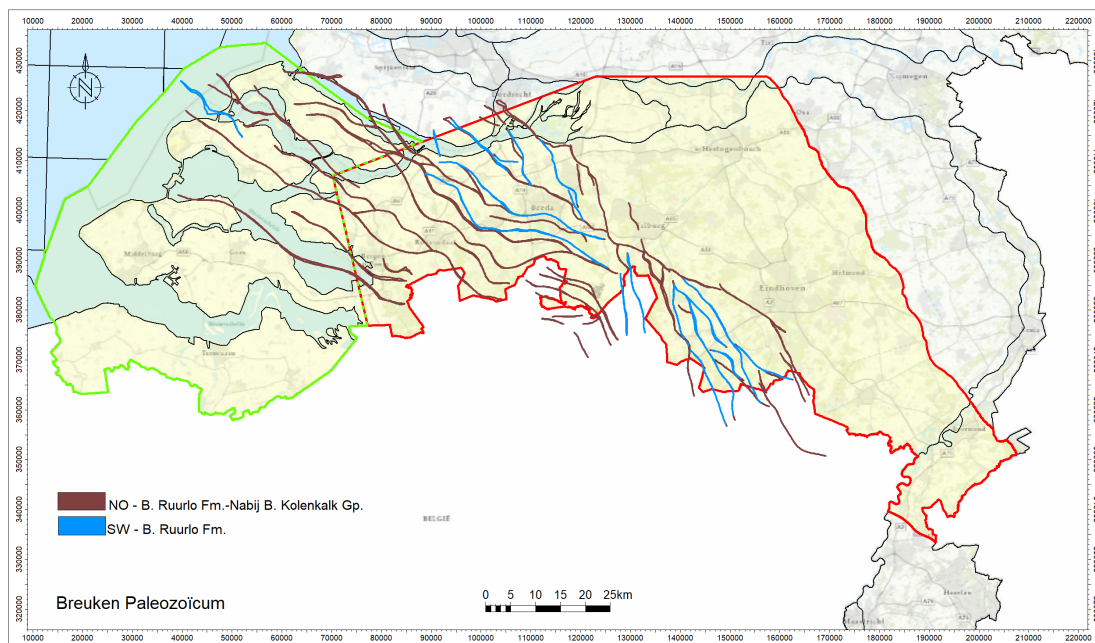
De Kolenkalk Groep uit het Dinantien (onder Carboon) bestaat uit lichtgrijze tot bruine en zwarte kalkstenen en grijze tot donkerbruine dolomieten. Deze modeleenheid is alleen in het modelgebied ten zuidwesten van de Roerdalslenk gemodelleerd (submodel 3). De basis van deze groep is gelijk aan het seismische gekarteerde grensvlak Nabij Basis Kolenkalk Groep. De Kolenkalk Groep ligt op de Banjaard Groep en wordt concordant bedekt door de Formatie van Epen. De dikte van deze Groep is maximaal ~1100 m.

5.7 Resultaten breukvlakken en grensvlakken

In het breukenmodel kan grofweg een onderscheid gemaakt worden tussen de Roerdalslenk en het Kempen Blok - Massief van Brabant gebied. In de Roerdalslenk is de breukinterpretatie en het breukenmodel primair afgestemd op de interpretatie van het mesozoïsche interval (Figuur 5.18). Veel van deze breuken tonen ook verzet in de kenozoïsche eenheden en in de paleozoïsche eenheden. Echter door de afnemende kwaliteit van de seismiek met diepte is de onzekerheid bij het bepalen van de aanwezigheid en richting van de breuken in de diepere eenheden groot. Ten zuiden van de Roerdalslenk, op het Kempen Blok en het Massief van Brabant zijn de breuken voornamelijk aanwezig in de Carbooneenheden; deze eindigen tegen of in de basis van de Krijtkalk Groep (Figuur 5.19).



Figuur 5.18 Overzicht van geïnterpreteerde breuken gegroepeerd naar hellingsrichting (NO of SW). De breuklijnen zijn verkregen door de 3D breuken aan te snijden met het samengestelde grensvlak Basis Perm en Krijtkalk Groep.



Figuur 5.19 Overzicht van geïnterpreteerde breuken gegroepeerd naar hellingsrichting (NO of SW). De breuklijnen zijn verkregen door een compilatie te maken van de 3D-breukenaansnijdingen met de grensvlakken basis Formatie van Baarlo (basis Westfalen) en nabij Basis Kolenkalk Groep. De paleozoïsche breuken op het Kempen Blok eindigen bijna allemaal op de basis van de Krijt-kalk Groep.

5.7.1 Regionale betekenis van het breukenmodel

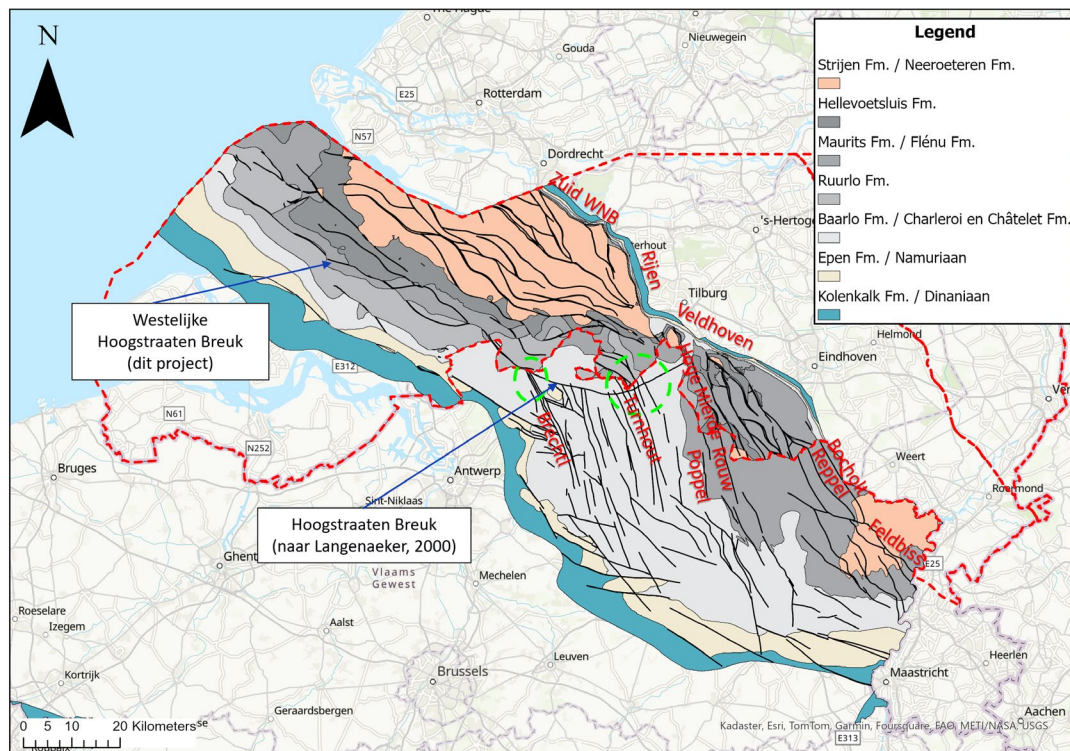
De grote hoeveelheid aan breuken in het modelgebied is reeds bekend sinds de allereerste kartingen van de diepe ondergrond van het Nederlandse Roerdalslenkgebied en de continuering daarvan in omliggende landen. Voor overeenstemming over de continuering van breuken over landsgrenzen heen en harmonisatie van de breuksemantiek (wat voor soort breuk is het en welke naam wordt gehanteerd) zijn reeds in het kader van de GeoERA-projecten GeoConnect3d en HIKE belangrijke stappen gezet (zie bijvoorbeeld <https://geoera.eu>). De karting en modellering uitgevoerd in het kader van dit project hebben echter wel geleid tot toevoeging van breuken in gebieden die eerder minder belicht waren, met name binnen het Kempen Blok en het Massief van Brabant. De harmonisatie van het nieuwe breukmodel voor het Paleozoïcum van het H3O-Diep gebied met Belgische modellen (G3Dv3.08) valt buiten de scope van dit project. Echter voor de seismische interpretatie en modellering is wel gebruik gemaakt van Belgische data en modelgegevens om zodoende een zo goed mogelijke aansluiting te garanderen. De resultaten daarvan kunnen het best beschouwd worden op een kaart die het verloop van breuken in het Belgische en Nederlandse top Carboon laat zien (Figuur 5.20). Hierbij kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden:

1. In het H3O-Diep Zuid-NL gebied zijn twee prominente breukrichtingen aanwezig: WNW-ESE en NNW-SSE georiënteerd (zie Figuur 5.18 en 5.19).
2. In en rond de Roerdalslenk komen beide richtingen voor en vertonen gezamenlijk een patroon van anastomoserende breuken. De Feldbiss Breukzone bijvoorbeeld vormt de zuidelijk begrenzing van de Roerdalslenk en bestaat duidelijk uit verschillende breuksegmenten die of tot de WNW-ESE of tot de NNW-SSE groep behoren. Zo is de Velhoven Breuk (als onderdeel van de Feldbiss Breukzone s.l.) WNW-ESE georiënteerd,

- maar de Rijen Breuk juist NNW-SSE georiënteerd. De Rijenbreuk vormt een belangrijke overstapzone tussen de Veldhovenbreuk en de zuidelijke randbreuk van het West-Nederlands Bekken. Zo vormen de Bocholt en Reppel breuken (BE) weer een overstapzone tussen de Veldhoven Breuk en de Feldbiss Breuk (s.s.) in Zuid-Limburg en het Hoge Kempen gebied (gebied ten westen van Maastricht; zie Figuur 5.20).
3. De aanwezigheid van NNW-SSE breuken, zoals de Poppel, Hoge Mierde en Rauw breuken, ten zuiden van de Feldbiss Breukzone en in het verlengde van de Rijen Breuk toont aan dat deze breuksystemen in aanleg wellicht ouder zijn dan de WNW-ESE breuken. Deze breuken zijn bij het ontstaan van de Roerdalslenk in het Mioceen gereactiveerd zodat de uiteindelijke slenk bepaald werd door interferentie van beide breuksystemen. De Rauw Breuk vormt een belangrijke overgang van de tektonisch actieve Roerdalslenk naar de meer stabiele gebieden in het westen van Vlaanderen en zuidwest-Nederland (Massief van Brabant en het Kempen Blok).
 4. Ook de breuksystemen binnen de Roerdalslenk vertonen een anastomoserend patroon dat door de eerdergenoemde interferentie verklaard kan worden (Figuur 5.18).
 5. De NNW-SSE breuken lijken zich te beperken tot een zone die grofweg van Antwerpen tot aan Maastricht verloopt (van de Brecht- tot Bocholt breuk). Ten westen en oosten daarvan hebben de breuken voornamelijk een WNW-ESE oriëntatie (Figuur 5.19). In Zeeland en westelijk Noord-Brabant vertonen de breuken die het Carboon doorsnijden in het kaartbeeld ook een golvend patroon (anastomoserend?), hetgeen kan wijzen op interferentie van twee breuk oriëntaties (Figuur 5.20). De beperkte dichtheid van de 2D seismische lijnen staat echter niet toe dit in meer detail te onderzoeken en om de interferentiehypothese te toetsen.
 6. De Hoogstraten breuk loopt net ten zuiden van de Belgische grens en lijkt een breuk die niet tot een van de genoemde breukcategorieën behoort. De Hoogstraten breuk toont in het kaartbeeld en ook in verticale aansneden een sterke kromming. Deze structuur werd door Vandenberghe et al. (1988) geïnterpreteerd als een listrische growth fault (groeibreuk), voornamelijk op basis van de ombuiging van de reflectoren in het Westfalen. Deze ombuiging wordt geïnterpreteerd als een roll-over anticline, gevormd door continue daling in het hangende blok onder de belasting van de bovenliggende sedimenten (zie bijvoorbeeld Figuur 4.4). De lagen aan de noordkant van de breuk zouden naar beneden gegleden zijn over het listrische breukvlak (of discontinuïteit) die gevormd wordt door de naar het noorden afvallende topografie van het Dinantien platform. De roll-over anticline in combinatie met de breuk is bewijs voor een fase van beweging tijdens het laat-Carboon en vormt belangrijke criteria om de Hoogstraten breuk te herkennen en te vervolgen naar het westen. De breuk wordt ook getoond op de top Carboon kaart van Langenaeker (2000 en ingetekend in **Figuur 5.20**). Jongere eenheden (Krijt-kalk en Noordzee Groepen) zijn niet door de breuk beïnvloed. Vandenberghe et al. (1988) merken op dat de snelle toename van de dikte van het Namurien naar het noorden wijst op het bestaan van een extensiebekken in die tijd. Wanneer deze observaties worden gecombineerd met de seismische gegevens uit andere delen van het modelgebied en uit omliggende gebieden, is het waarschijnlijk dat het verdwijnen van de duidelijke Dinantien-reflector en de verdikking van de Namurien-lagen naar het noorden kunnen worden verklaard door het bestaan van een belangrijke, langdurige breukzone onder het geïnterpreteerde breukvlak van de Hoogstraten Breuk. In dit scenario is het waarschijnlijk dat het een structuur is die overgeërfd is van de Caledonische orogenese en rekbewegingen tijdens het Dinantien heeft geacommodeerd. In die tijd definieerde het de grens tussen het carbonaatplatformgebied in het zuiden en het diepere bekkengebied dat wordt gekenmerkt door fijnkorrelige siliciklastische afzettingen in het noorden. De

mogelijkheid van de Dinantien-platformrand op deze locatie werd al gesuggereerd door Vandenberghe et al. (1988).

7. Het is opvallend dat de Hoogstraten breuk ook een zone vormt waar de dominantie van NNW-SSE breuken (ten zuiden van de breuk) verandert naar dominantie van WNW-ESE breuken (ten noorden van de breuk).



Figuur 5.20 Combinatie van top Carboon kaarten (subcropkaarten van de Basis Krijt-kalk Groep) van het H30-Diep Zuid-NL modelgebied en het Belgische G3Dv3.08 ondergrond model. De lithostratigrafische onderverdeling van het Boven-Carboon verschilt tussen de landen en daarom sluiten de eenheden in kaartbeeld soms niet precies aan. De belangrijkste breuken die in de tekst besproken worden zijn van namen voorzien (in rood en zonder de toevoeging “breuk”).

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport wordt de totstandkoming van het H3O-Diep Zuid-NL model, dat de provincies (lees deelprojecten) Zeeland en Noord-Brabant omvat, beschreven. De werkzaamheden zijn opgesplitst in vijf werkpakketten, die elk hebben geleid tot een tussenresultaat. Deze tussenresultaten zijn tijdens zogenaamde milestone meetings aan de begeleidingscommissie gepresenteerd. Na eventuele bijstelling zijn de tussen- en eindresultaten aan de stuurgroep gepresenteerd en vervolgens door de Chief Geologist van TNO-GDN beoordeeld en vrijgegeven.

Met de oplevering van het H3O-Diep Zuid-NL model zijn er een aantal unieke stappen gezet in de modellering van de ondergrond van zuidelijk Nederland. Hierbij worden soms oudere bevindingen bijgesteld of aangescherpt. Daarnaast roepen de resultaten ook nieuwe vragen op en kunnen er suggesties voor nader onderzoek worden gedaan. Hieronder volgt een beknopte opsomming:

- Het Paleozoïcum is voor het eerst op basis van seismische interpretatie voor het Kempen Blok (Zeeland en zuidwest Brabant) in kaart gebracht en gemodelleerd. Dit model sluit aan op het geologisch model G3Dv3.1 in België. Echter, deze aansluiting betreft voornamelijk de basis en top van de Kolenkalk Groep en de aansnijding met de Basis Perm Groep of Basis Krijtkalk Groep. De Belgische lithostratigrafische onderverdeling van het Boven-Carboon (Namurien en Westfalen) is anders dan de Nederlandse en harmonisatie hiervan valt buiten de scope van dit project. Hierdoor kan het voorkomen dat bijbehorende modeleenheden over de grens verschillen in diepteligging of dikte.
- Op basis van oudere lithostratigrafische interpretaties van een beperkt aantal putten werd voorheen aangenomen dat de Krijtkalk Groep ten zuidwesten van de Roerdaalslenk (op het Kempen Blok) geheel uit de Formatie van Ommelanden bestond. In het kader van dit project wordt op basis van een seismostratigrafische onderverdeling en interne af- en insnijdingsrelaties verondersteld dat de formatie drie eenheden bevat. Deze eenheden sluiten goed aan bij de Belgische eenheden op het Kempen Blok en de onderverdeling van de Formatie van Gulpen in Zuid-Limburg. Ze worden geïnterpreteerd als de meer zandige randfacies van de Formatie van Ommelanden die vertegenwoordigd wordt door de Formatie van Gulpen. De 3 eenheden zijn het Laagpakket van Benzenrade, het Laagpakket van Zeven Wegen en het Laagpakket van Vijlen, overeenkomend met respectievelijk het Lid van Dorne-1, Dorne-2 en Dorne-3 in België. Het wordt aanbevolen de Krijtkalk opeenvolging in dit gebied te bemonsteren en lithologisch te karakteriseren aan de hand van beschikbare boorgegevens.
- Op basis van eerdere lithostratigrafische interpretatie van boring RSB-01 werd verondersteld dat het Perm en Trias aangetroffen waren. Op basis van de interpretatie van verbeterde seismische data is in het kader van dit project bepaald dat dit niet het geval kan zijn. De aanbeveling is dat de lithostratigrafische markers van deze boring door TNO-GDN snel worden aangepast en op NLOG beschikbaar worden gemaakt. Deze nieuwe interpretatie heeft geleid tot een aanzienlijke verandering van de verbreidingsgebieden van Perm en Trias eenheden ten opzichte van eerdere modellen (zoals DMGdiep v5.0).

- Het H3O-Diep Zuid-NL model is een regionaal model dat inzicht verschaft in de aanwezigheid en dikte van een groot aantal eenheden in de ondergrond. Daarnaast geeft het de meest accurate weergave van het breukenverloop in de ondergrond. Echter, met de grote hoeveelheid seismische data die voor dit project is geconsulteerd worden de grenzen van gebruikte modelleringstechnieken opgezocht en is het soms niet mogelijk kleine, lokale artefacten helemaal te verwijderen. Ook is de footprint, ontstaan is als gevolg van de verticale misfit tussen seismische lijnen, niet volledig verwijderd, omdat het corrigeren van de seismische data erg tijdsingrijpend is. Voor lokale (en vooral kleinere) studies kunnen dergelijke artefacten makkelijker verwijderd worden. Bij behoefte aan dergelijke lokale studies kan het onderhavige regionale model als beste startpunt worden gebruikt. Om te voorkomen dat lokale studies alleen maar een hogere resolutie hebben, terwijl eigenlijk een grotere accuratesse wordt nagestreefd, dient het aanbeveling om voor zulke studies ook aanvullende data te verkrijgen (seismiek en/of boringen).
- De breukkartering uitgevoerd voor dit project heeft geleid tot de meest accurate weergave van het breukenverloop in de ondergrond. Hierbij is meer aandacht besteed aan plausibele breukaansluitingen, consistentie van (verticaal)breukverzet en daarmee ook de hiërarchische onderverdeling van breuken. Daarmee is het breukmodel een up-to-date weergave die goed inzetbaar is voor toepassingen die inzichten over breukaanwezigheid dienen mee te nemen in potentie- of gevaren evaluaties (zoals Seismic Hazard and Risk Analysis). Al is de structurele ontstaans-geschiedenis van het modelgebied geen onderdeel van dit project, toch zijn er tijdens het vervaardigen ervan veel nieuwe ideeën opgedaan. Enkele van deze nieuwe bevindingen en ideeën zijn bijvoorbeeld al opgenomen in het recente verschenen boek *Geology of the Netherlands* (2nd edition). Verder kan het breukenmodel in combinatie met het lagenmodel als startpunt dienen voor een nieuwe studie naar wanneer breuken ontstaan en geactiveerd zijn en hoe de breukwerking invloed heeft gehad op de distributie van de onderscheidde eenheden binnen het modelgebied.
- Het model is niet geharmoniseerd met België, maar geeft voldoende aansluiting van zowel breuken en grensvlakken om dit in de toekomst te doen.
- Samen met het model H3O-Peelhorst & Venloslenk dient dit model als belangrijke basis voor het continueren van de gevolgde aanpak naar aanpalende gebieden in midden Nederland (bijv. H3O-Gelderland- in concept)
- Zonder het beschikbaar komen van nieuwe SCAN seismiek en SCAN herbewerkte seismiek was het bereikte detail niet mogelijk geweest. Echter, er blijven “witte vlekken” in het modelgebied waar aanvullende seismische data het verloop van grensvlakken en breuken kan verhelderen.
- Het vaak dunne Perm interval is lithologisch slecht begrepen en zou beter ingepast kunnen worden in kennis van omliggende landen. Het gaat dan niet zozeer om de grensvlakken van het interval maar wel om de lithologische samenstelling van het interval dat door die grensvlakken afgebakend wordt.

7 Literatuurlijst

Berenschot (2020). Een studie naar de potentie van aardwarmte als duurzame bron in de gebouwde omgeving, glastuinbouw en industrie. Te verkrijgen via:
<https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/eindrapport-warm>

De Haan, H., ten Veen, J., Houben, S. and Kruisselbrink, A., (2020) Mapping of the Brussels Sand Member in the Netherlands. https://www.warmingup.info/documenten/report-mapping-brussels-sand_final_v3_18122020.pdf

Delmer, A., Dusar, M. & Delcambre, B. 2001: Upper Carboniferous lithostratigraphic units (Belgium), *Geologica Belgica* 4(1-2), pp. 95-103.

Duin, E.J.T. & Doornenbal, J.C. & Rijkers, R.H.B. & Verbeek, J.W. & Wong, Theo. (2006). Subsurface structure of the Netherlands - Results of recent onshore and offshore mapping. *Netherlands J. Geosci.* 85. 10.1017/S0016774600023064.

Felder, P.J., 1997. The Vijlen chalk member (Maastrichtian, Late Cretaceous) in the Meuse-Rhine euegion. *Annales de La Société Géologique de Belgique*, 119(2), 119-133.

Gutteridge, Peter & Ten Veen, Johan & Dewit, Julie & Garland, Joanna & Riva, Alberto & Mozafari, M.M & Jaarsma, Bastiaan & Melle, Timme. (2024). Regional assessment of the Ultra-deep geothermal (UDG) reservoir quality and potential of the Dinantian Zeeland formation, the Netherlands. Geological Society, London, Special Publications. 548. 10.1144/SP548-2023-106.

Huis in 't Veld, R. & Den Hartog Jager, D., 2025. Late Carboniferous. In: J.H. Ten Veen, G.-J. Vis, J. De Jager & Th.E. Wong (eds.): *Geology of the Netherlands*, second edition. Amsterdam University Press: 1-2. doi: 10.5117/9789463728362_ch03

Keutgen N, Jagt JWM, Felder PJ, Jagt-Yazykova EA. Stratigraphy of the upper Vijlen Member (Gulpen Formation; Maastrichtian) in northeast Belgium, the southeast Netherlands and the Aachen area (Germany), with special reference to belemnitellid cephalopods. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*. 2010;89(2):109-136. doi:10.1017/S0016774600000731

Langenaeker, V., 2000. The Campine Basin. Stratigraphy, structural geology, coalification and hydrocarbon potential for the Devonian to Jurassic. Thesis. Leuven University (Leuven): pp 1-142.

Mozafari, M., Gutteridge, P., Riva, A., Geel, C., Garland, J. & Dewit, J., 2019. Facies analysis and diagenetic evolution of the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface: overview and synthesis [SCAN report,]. 138 pp. Te verkrijgen via:
http://www.nlog.nl/sites/default/files/2019-12/scan_dinantian_facies_analysis_and_diagenetic_evolution.pdf

Munsterman, D.K., Ten Veen, J.H., Menkovic, A., Deckers, J., Witmans, N., Verhaegen, J., Kerstholt-Boegehold, S.J., Van de Ven, T. & Busschers, F.S., 2019. An updated and revised stratigraphic framework for the Miocene and earliest Pliocene strata of the Roer Valley Graben and adjacent blocks. *Netherlands Journal of Geosciences* 98 (8). e8 DOI: 10.1017/njg.2019.10

Nelskamp, S., Goldberg, T., Houben, A., Geel, C., Wasch, L., Verreussel, R. & Boxem, T. 2015. Improved sweet spot identification and smart development using integrated reservoir characterization (Phase 2). TNO 2015 R10740: 142 pp.

Paap B.F., Doornenbal J.C., den Dulk M., Hettelaar J.M.M. 2024 VELMOD-3.2 TNO-rapport 2023 R12557

Reijmer, J. J. G., Ten Veen, J. H., Jaarsma, B., & Boots, R. (2017). Seismic stratigraphy of Dinantian carbonates in the southern Netherlands and northern Belgium. *Geologie en Mijnbouw = Netherlands Journal of Geosciences*, 96(4), 353-379.
<https://doi.org/10.1017/njg.2017.33>

Ten Veen, J.H., de Haan, H.B., de Bruin, G., Holleman, N. and Scholer, W. 2019. Seismic interpretation and depth conversion of the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface (SCAN). <http://www.nlog.nl>

TNO – GDN, VITO & BGD (2023). H3O-De Voorkempen. TNO – Geologische Dienst Nederland, VITO & Belgische Geologische Dienst van het Koninklijk Belgisch Instituut, <https://www.dinoloket.nl/downloads-h3o-de-voorkempen>; gedownload op 01-11-2024.

TNO-GDN (2024). Laagpakket van Ubachsberg. In: *Stratigrafische Nomenclator van Nederland*, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 5-12-2025 op <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/laagpakket-van-ubachsberg>.

Van Adrichem Boogaert, H.A. & Kouwe, W.F.P., 1995. Stratigraphic nomenclature of The Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa, Section C. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 50 (Journal Article): 1–40.

Vandenberghe, N., Poggiagliolmi, E. & Watt, G., 1986. Offset dependent seismic amplitudes from karst limestone in northern Belgium. *First Break* 4(5): 9–27

Vandenberghe, N., Dusaar, M., Laga, P., Bouckaert, J., 1988. The Meer well in North Belgium, *Toelichtende verhandelingen voor de Geologische en Mijnkaarten van België*, 25 pp 1-23.

Van de Laar, H., 1985. Palynologische ouderdomsbepaling van boring Nederweert-1. RGD Rapport GB2090.

8 Ondertekening

Naam en ondertekening 2e lezer

 Valid Signed by Marcel Bakker
on 2025-07-15 09:41:11

Dr. M.A.J. Bakker

Ondertekening

 Valid Signed by Johan ten Veen
on 2025-07-14 17:03:47

Dr. J.H. ten Veen
Auteur

Autorisatie vrijgave

 Valid Signed by Denise Maljers
on 2025-07-14 17:12:31

Drs. D. Maljers
Research Manager Subsurface Modelling

9 Bijlagen

1. Conceptuele seismische profielen
2. Dieptekaarten grensvlakken
3. Diktekaarten modelleereenheden
4. Kaarten met seismische interpretatiepunten
5. Breukenmodel
6. ArcGIS project met data en resultaten
7. QGIS project met data en resultaten

Alle bijlagen zijn in digitaal formaat beschikbaar.