

# Interpretatie van nieuwe seismische data en constructie van een lokaal geologisch 3D-model in de omgeving van Renkum en Nijmegen in het zuiden van de provincie Gelderland: inzichten in het geothermisch potentieel.

Studie uitgevoerd in opdracht van: Tellus Renkum BV  
2021/RMA/R/2454\_Renkum

Juli 2021



## VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE  
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99  
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)  
Bank 375-1117354-90 ING  
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB





## VERSPREIDINGSLIJST

Vincent Helfferich, Tellus Renkum BV

## SAMENVATTING

In de Provincie Gelderland zijn meerdere partijen op verschillende locaties geïnteresseerd in de mogelijkheid om energie te halen uit aardwarmte. Zo plant Tellus Renkum BV de ontwikkeling van een diepe-geothermie-project voor de levering van lagedrukstoom aan de papierfabriek in Renkum van Smurfit Kappa (voorheen Parenco). Daarnaast is ook in Nijmegen interesse, bijvoorbeeld aan Radboud UMC of aan de voormalige energiecentrale van Engie in de Noordkanaalhaven. Er zijn in de ondergrond in deze regio meerdere geologische formaties die in meer of mindere mate potentieel bieden voor geothermie. Er zijn verschillende potentiële reservoirs die in aanmerking zouden kunnen komen voor het leveren van warmte aan midden tot hoge temperatuur. Eerdere studies identificeerden de kalksteen van de Kolenkalk Groep (Lower Carboniferous Limestone Group) als mogelijke target voor ultra-diepe geothermie, specifiek voor een warmtevraag aan hoge temperatuur. Om een goede inschatting te maken van de geometrie van en de diepte waarop de potentiële targets zich bevinden, zijn in de omgeving van Renkum en Nijmegen nieuwe seismische data vergaard. Deze nieuwe data, afkomstig enerzijds van de regionale exploratiecampagne L2EBN2019A en anderzijds van de lokale exploratiecampagne L2EBN2020B, zijn samen met data van oude seismische surveys uit de jaren 80 stratigrafisch en structureel geologisch geïnterpreteerd.

Op de seismische profielen zijn 10 horizonten ingetekend. De interpretaties van de 6 bovenste (ondiepe) seismostratigrafische horizonten (Boven Noordzee Groep, Midden en Onder Noordzee Groep, Krijtkalk Groep, Rijnland Groep, Onder Germaanse Trias Groep en Zechstein Groep) bevestigen het bestaande geologische model DGM-diep v5. De interpretaties van de 4 onderste (diepe) seismostratigrafische horizonten (Caumer Subgroep en 3 opties voor de Geul subgroep) daarentegen tonen een geheel andere geologische opbouw. De geïnterpreteerde ondiepe reflectoren zijn gekoppeld aan de regionale lithostratigrafie op basis van bestaande interpretaties op oude seismische lijnen, gekende stratigrafische discordanties en de diepboringen (NVG-01, AHM-01 en SNM-GT-01) aanwezig binnen het onderzoeksgebied. De regionale lithostratigrafische koppeling van de diepe reflectoren is gebaseerd op een correlatie langsheen seismische lijnen (MZ88-53, SCAN002, SCAN005 en SCAN016) met diepboringen gelegen op enige afstand van het onderzoeksgebied (MSB-02, BKH-01, WSK-01 en CAL-GT-01). Aan de hand van deze correlatie is, uit de 3 kandidaat-reflectoren voor de top van de Kolenkalk Groep, optie 2 als de meest plausibele naar voor gekomen. Ondanks het zeer discontinue karakter en zelfs ontbreken van de reflector gekoppeld aan optie 2 op de nieuwe seismische lijn (SCAN016), die het Renkum-Nijmegen gebied met het Venlo (Californië) gebied verbindt, is de correlatie tussen beide regio's over het Peel-Maasbommel Complex doorslaggevend geweest in het vastleggen van de top van de Kolenkalk Groep.

De structurele interpretatie van de seismische profielen concentreert zich op de seismostratigrafische eenheden onder het top-vlak van de Limburg Groep. Aan de hand van interpretatie van breuken (faultsticks) zijn binnen dit gesteentepakket verschillende structurele eenheden (horsten, slenken, pop-ups, ...) afgebakend. Door vergelijking van deze structuren en de opeenvolging ervan over verschillende seismische secties heen zijn de aangrenzende breuken (faultsticks) in sets van bij elkaar horende breuken (faultsticksets) verzameld en naar 3D-breukvlakken (faults) omgezet. Binnen de grenzen van de structurele eenheden zijn ook de interpretaties van de verschillende lithostratigrafische eenheden naar 3D-vlakken omgezet. Dit resulteert in een geologisch 3D-tijdmodel. Via een tijd/diepte conversie gebaseerd op de formules van Japsen (1993) en de  $k$ -,  $V_0$  en  $V_{int}$ -waarden van Pluymaekers et al. (2017) voor de ondiepe eenheden enerzijds en van ten Veen et al. (2019) voor de diepe eenheden anderzijds, is dit tijdmodel omgezet naar een geologisch 3D-dieptemodel. Aan de hand van een iteratief proces zijn verschillen in diepte tussen bestaande waarnemingen en model-vlakken weggewerkt en zijn de basis-vlakken van de verschillende lithostratigrafische eenheden aan diepboringen opgehangen.



Het geologisch 3D-dieptemodel vertoont aan het top-vlak van de Limburg Groep een structurele opbouw bestaande, in het zuidwesten uit 3 zuidoost-noordwest georiënteerde antiforme structuren (pop-ups) geflankeerd door 3 synforme structuren en, in het noordoosten uit een opgedeelde graben-structuur geflankeerd door 2 horst-structuren. Deze structuren bepalen de diepte waarop gesteenten van de Limburg Groep aangetroffen worden. Deze diepte varieert van -2500°m NAP in het westen waar de synforme structuren samenkomen, over -1500°m NAP in de graben-structuur tot ongeveer -1000°m NAP op antiforme structuren en de horst-structuur in het oosten. Al de structurele elementen zijn van elkaar gescheiden door zuidoost-noordwest georiënteerde breuken, met een normale werking rond de graben- en horst-structuren en een (hoofdzakelijk) inverse werking rond de antiforme structuren. Mogelijk dienen de antiformen als “positive flower structures” gezien te worden en de opgedeelde graben als een “negative flower structure”, beide gelinkt aan “strike-slip” bewegingen langs de breuken. Deze bewegingen zijn in de loop van de geologische geschiedenis meermaals van zin gewijzigd en wel op een dussdanige manier dat het resulterende verzet langs de breuken binnen de gesteenten van de Limburg Groep beperkt blijft, terwijl wijzigingen in dikte van bovenliggende gesteentepakketten belangrijke breukbewegingen veronderstellen. In het noordoostelijke deel van het model-gebied vertonen de meeste breuken geen sprong meer in het basis-vlak van de Noordzee Supergroep, in het zuidwestelijke deel van het model-gebied daarentegen zijn bewegingen langs breuken te vervolgen tot in het basis-vlak van de Boven Noordzee Groep. Het zuidwestelijke deel van het model-gebied lijkt bijgevolg langer aan tektonische activiteit onderhevig geweest te zijn.

De voornoemde structurele opbouw van het top-vlak van de Limburg Groep is in de basis-vlakken van de dieper gelegen lithostratigrafische eenheden niet aanwezig. Het basisvlak van de Caumer Subgroep en de Geul Subgroep (3 opties) is gekenmerkt door een “plateau” in het zuidoosten en een “diep” in het noordwesten, van elkaar gescheiden door een steile zuidwest-noordoost georiënteerde “helling”. Mogelijk weerspiegelt deze vorm de oorspronkelijke afzettingsomstandigheden van de sedimenten van de Kolenkalk Groep. Hierbij zou het “plateau” de “organic build-up” voorstellen volgens het depositionele facies model van Wilson (1975), het “diep” de “deep shelf margin” of de “open sea shelf” en de “helling” de “foreslope”, elk met zijn typische carbonaat sedimenten. Dit blijft evenwel zeer speculatief zolang deze gesteenten niet aangeboord zijn. Op basis van de dikte-verdeling van de sedimenten, het diepteverschil tussen “plateau” en “diep” en de steilte van de “helling” wordt het paleoreliëf in de verschillende gemodelleerde laagvlakken eerder als een expressie van door subsidentie gecontroleerde sedimentatie gezien.

Het paleoreliëf is doorsneden door enkele zuidoost-noordwest georiënteerde breuken met een beperkt verzet dat naar onder toe bovendien nog verder afneemt. Centraal op het “plateau” begrenzen 2 van deze breuken een zuidoost-noordwest georiënteerde rug die enkele honderden meters boven het “plateau” uitsteekt. De gesteenten van de Limburg Groep zijn hier tegen de breukvlakken opgeperst en vormen de wortels van de pop-up structuur ter hoogte van diepboring NVG-01 nabij Nijmegen. Deze opbouw zorgt er voor dat het top-vlak van de Kolenkalk Groep (basisvlak van de Geul Subgroep Optie 2) ter hoogte van het “plateau” op een gemiddelde diepte van -4300°m NAP ligt en in het centrale deel van het “diep” op een diepte van -6800°m NAP. De rug onder Nijmegen ligt op een minimale diepte van -3600°m NAP.

Een ééndimensionaal thermisch geleidbaarheidsmodel is opgesteld om binnen het model-gebied de temperatuur aan de basis van geologische eenheden te berekenen. Deze berekening is uitgevoerd voor 3 locaties; ter hoogte van 2 diepboringen (NVG-01 en MSB-02) en ter hoogte van de voorgestelde site van Smurfit Kappa te Renkum. Ze steunt op de lokale warmteflux, de thermische geleidbaarheid van en de warmtegeneratie in het gesteente. Deze parameters zijn ingeschat aan de hand van 8 diepboringen met lithologs en temperatuurdatab (BKH-01, BUM-01, GWD-01, MSB-01,

MSB-02, NVG-01, VRK-01 en WSK-01). Uit de data is een gemiddelde geothermische gradiënt berekend van  $35,3 \pm 2,6^\circ\text{C}/\text{km}$  en een warmteflux aan het oppervlak van ongeveer  $0,0700 \pm 0,0045^\circ\text{W}/\text{m}^2$ .

Voor de site van Smurfit Kappa te Renkum is het geothermisch potentieel ingeschat op basis van de nieuwe data. De Smurfit Kappa site ligt boven het “diep” in het top-vlak van de Kolenkalk Groep, de ENGIE site ligt boven de centrale rug op het “plateau” en de Radboud UMC site ligt op de zuidflank van deze rug eveneens op het “plateau” in het top-vlak van de Kolenkalk Groep. Uit het ééndimensionaal thermisch geleidbaarheidsmodel volgt dat ter hoogte van de sites temperaturen hoger dan  $100^\circ\text{C}$  pas te verwachten zijn binnen de gesteenten van de Caumer Subgroep en de Geul Subgroep. Temperaturen aan het top-vlak van de Limburg Groep bereiken er maximaal  $50^\circ\text{C}$ . De temperatuur aan de basis van de Limburg Groep (top Kolenkalk Groep) loopt verder op tot  $243 \pm 33^\circ\text{C}$  onder de Smurfit Kappa site. Naast temperatuur spelen ook de porositeit en permeabiliteit een belangrijke rol met betrekking tot het geothermisch potentieel. Deze parameters kunnen niet gekwantificeerd worden aan de hand van de nieuwe seismische data. Kwalitatief gezien kunnen de seismische data wel enige informatie leveren. Dit is met name het geval voor de kalksteen van de Kolenkalk Groep, waar verhoogde porositeit (en permeabiliteit) mogelijk is langs breukzones. Primaire porositeit in de kalksteen is immers quasi onbestaande (Mozafari et al., 2019). Een verhoogde secundaire porositeit en permeabiliteit kan voorkomen in zones geassocieerd met karst en dolomitatie (Carlson, 2019), of langs breukzones. Daar waar het gesteente opgebroken is, kunnen hydrothermale vloeistoffen circuleren en kan de porositeit verhoogd worden. Ter hoogte van de Smurfit Kappa site is de top van de Kolenkalk doorsneden door een zuidwest hellende breuk (14) met een normaal verzet van ongeveer  $200^\circ\text{m}$ . Het hoogste geothermische potentieel zal daar gevonden worden waar de voornoemde breuken de gesteenten van de Kolenkalk Groep doorsnijden. Het is echter onbekend of de gecreëerde permeabiliteit langs breukzones nog steeds aanwezig is, of na het stoppen van de breukwerking weer teniet gedaan is door diagenetische processen (precipitatie van mineralen).

Mogelijke stappen in een verder onderzoek zijn gericht:

- 1) op een verbetering van de lithostratigrafische interpretatie/correlatie van de seismische data,
- 2) op een verbetering van de tijd/diepte conversie van het 3D tijd-model naar een 3D diepte-model,
- 3) op een vergroten van de kennis m.b.t. het facies, de porositeit en de permeabiliteit van de reservoir gesteenten en
- 4) op het nauwkeuriger localiseren van de breuken als zones van verhoogde secundaire porositeit ter hoogte van de voorgestelde sites.

De eerste 3 onderzoekstappen zijn mogelijk aan de hand van een diepboring met monsternamen en Vertical Seismic Profiling. Hierbij wordt best eerst de lokale seismische survey uitgevoerd om daarna de diepboring zeer gericht te kunnen plaatsen. Onderzoeksstap 4 kan gebeuren aan de hand van lokale 3D seismische surveys ter hoogte van de Renkum site en andere geschikte sites in het gebied.



## SUMMARY

In order to provide low pressure steam to the Smurfit Kappa paper mill in southern Gelderland, Tellus Renkum BV wants to develop a deep geothermal project. Previous studies have identified the carbonates of Lower Carboniferous Limestone Group as a potential target for (ultra-) deep geothermal energy. To make a good assessment of the geometry of the sediments and of the depth at which they are found within the vicinity of Renkum and Nijmegen, new seismic data have been acquired during the regional exploration survey L2EBN2019A and the local exploration survey L2EBN2020B. Together with data from older seismic surveys (1980's) these new data have been stratigraphically and structurally interpreted.

Ten horizons have been interpreted on the seismic sections. The interpretations of the upper 6 horizons (the shallow horizons; Upper North Sea Group, Middle and Lower North Sea Group, Chalk Group, Rijnland Group, Lower Germanic Trias Group and Zechstein Group) confirm the existing geological model DGM-deep v5. On the contrary, the interpretations of the lower 4 horizons (the deep horizons; Caumer Subgroup and 3 options for the Geul Subgroup) show a totally different geology compared to the one of the DGM-deep V5 model. The interpretations of the shallow horizons are linked to the regional lithostratigraphy on the basis of 1) the existing interpretations of older seismic sections, 2) known stratigraphic unconformities and 3) deep boreholes (NVG-01, AHM-01 and SNM-GT-01) within the area of interest. The interpretations of the deep horizons are linked to the regional lithostratigraphy on the basis of a correlation along seismic sections (MZ88-53, SCAN002, SCAN005, SCAN016 and 09-02) with deep boreholes located outside of the area of interest at a distance no more than 60°km from its center (MSB-02, BHK-01, WSK-01 and CAL-GT-01). Out of 3 seismic reflectors that stand as a candidate for representing the top of the Carboniferous Limestone Group, Option 2 is chosen as the most plausible one, based on the aforementioned correlations. Notwithstanding the very discontinuous character and even the absence of the candidate reflector Option 2 on seismic section (SCAN016), which joins the Renkum-Nijmegen area with the Venlo (Californië) area, the correlation between both areas along the Peel-Maasbommel Complex was decisive in tying the seismic data of the Renkum-Nijmegen area to the top of the Carboniferous Limestone Group.

Structural interpretation of the seismic sections focusses on the deep seismostratigraphic horizons, which subcrop underneath the top-surface of the Limburg Group. Based on interpretation of fault-sticks within this stratigraphic reach several structural units are defined (horst, graben, pop-up, ...). By comparing these structures and their succession along the different seismic sections their bounding fault-sticks are gathered in fault-stick-sets and converted to 3D-fault-planes. Within the boundaries of these structures the interpretations of the different seismostratigraphic units are converted to 3D-surfaces. Together the fault-planes and the seismostratigraphic surfaces constitute a geological 3D-timemodel. This model was transformed in a geological 3D-depthmodel through a time/depth conversion based on the Japsen formula (1993) and the  $k$ -,  $V_0$  and  $V_{int}$ - values according to Pluymaekers et. al. (2017) and ten Veen et. al (2019), respectively for the shallow and the deep horizons. Differences in depth between the model and known observations are eliminated through an iterative process which results in a close link between both the model and the boreholes.

At the top-surface of the Limburg Group the geological 3D-depthmodel shows, in the southwest 3 SE-NW oriented antiform structures flanked by synform structures and in the northeast a segmented graben structure flanked by 2 horst structures. These structures define the depth at which the sediments of the Limburg Group are encountered. This depth changes from -2500°m NAP in the west at the junction of all synform structures, over -1500°m NAP in the graben structure to approximately -1000°m upon the antiform and horst structures. All structural units are bounded by SE-NW oriented



faults with a normal offset along the graben and horst structures and mainly an inverse movement along the antiform and synform structures. Possibly the antiform structures must be regarded as “positive flower structures” and the segmented graben as a “negative flower structure”, both linked to “strike-slip” movements along their bounding faults. The sense of movement along the majority of faults has changed frequently during geological history in such a way that the resulting offset within the Limburg Group is almost non-existent. Major changes in thickness within the overlying rocks on top of the Limburg Group however, suggest important movements. In the northeastern part of the model-area offset along faults stops at the base of the North Sea Supergroup, in the southwestern part however, fault-movements can be traced up to the base of and even within the sediments of the Upper North Sea Group. Consequently, the southwestern part of the model-area has been subject to tectonic activity for a longer time-span.

The aforementioned structure of the top-surface of the Limburg Group is not present in the basal surfaces of the deep seismostratigraphic units. The basal surfaces of the Caumer Subgroup and the 3 options for the Geul Subgroup are characterized by a “plateau” in the southeast, a “deep” in the northwest and a SW-NE oriented steep “slope” in between. This paleo-relief possibly reflects the original depositional environment of the sediments of the Carboniferous Limestone Group. The “plateau” corresponds to the “*organic build-up*” according the carbonate depositional facies model of Wilson (1975), the “deep” corresponds to “*the deep shelf margin*” or “*the open sea shelf*” and the “slope” corresponds to “*the foreslope*”, each with its typical carbonate facies. However, this remains very speculative as long as these rocks have not been drilled. Based on thickness-distribution, the difference in depth between the “plateau” and the “deep” and the steepness of the “slope” the paleo-relief of the 4 modelled basal surfaces is rather thought of as being the result of subsidence controlled sedimentation. SE-NW oriented faults crosscut the paleo-relief, but their offset remains limited and decreases even further downwards. In the middle of the “plateau” 2 faults bound a SE-NW oriented “ridge” which rises several hundred meters above the “plateau”. Rocks of the Limburg Group are pushed up along these faults and act as “root” underneath the pop-up structure near borehole (NVG-01) in Nijmegen. The depth at which the rocks of the Carboniferous Limestone Group (the basal surface of the Geul Subgroup Option 2) are encountered is determined by this paleo-relief; on the “plateau” the average depth approximates -4300°m NAP, in the central part of the “deep” a depth of -6800°m NAP is found and on the “ridge” near Nijmegen the minimum depth is -3600°m NAP.

In order to estimate the temperature at the top of the Carboniferous Limestone Group within the model-area a unidimensional thermal conduction model was developed. Temperatures are calculated at 3 locations; 2 boreholes (NVG-01 and MSB-02) and the site of Smurfit Kappa in Renkum. The model takes into account the local heat-flux, the thermal conductivity of and the generation of heat within the rocks. These parameters are estimated based upon 8 boreholes with lithological descriptions and temperature data (BKH-01, BUM-01, GWD-01, MSB-01, MSB-02, NVG-01, VRK-01 and WSK-01). These data give an average local geothermal gradient of  $35,3 \pm 2,6^\circ\text{C}/\text{km}$  and a heat-flux at the surface of approximately  $0,0700 \pm 0,0045^\circ\text{W}/\text{m}^2$ . Temperatures at the top of the Limburg Group reach a maximum of  $53^\circ\text{C}$ . Temperature increases to  $243 \pm 33^\circ\text{C}$  at the base of the Limburg Group (top of the Carboniferous Limestone Group) at the Smurfit Kappa site.

Along with temperature, porosity and permeability are crucial parameters when estimating the potential of a geothermal reservoir. These parameters cannot be quantified using seismic data. Seismic data can, however, provide qualitative information. This is the case for the limestone of the Lower Carboniferous Limestone Group, where increased porosity (and permeability) is possible along fault zones. Primary porosity in the limestone is very low (Mozafari et al., 2019). An increase secondary porosity (and permeability) can occur in zones associated with karst en dolomitization (Carlson, 2019), or along fault zones. Within fault damage zones, broken up zones may constitute

conduits for circulation of hydrothermal fluids, potentially increasing porosity. Near the Smurfit Kappa site, the top of the Carboniferous Limestone Group is crosscut by a SW dipping fault (14). The highest geothermal potential will be found at the location where the aforementioned fault passes through the rocks of the Carboniferous Limestone Group. Caution should be paid however, as mineral-saturated fluids can precipitate cements in pores and fractures. These can effectively become re-sealed, reducing permeability and forming significant barriers to fluid-flow.

Possible steps for future research may focus:

- 1) on improving the lithostratigraphic interpretation/correlation of the seismic data,
- 2) on improving the time/depth conversion of the 3D time-model to a 3D depth-model,
- 3) on increasing knowledge concerning facies, porosity and permeability of the target reservoirs and
- 4) on an accurate localization of faults, as zones of improved secondary porosity, near the proposed sites.

The 3 first steps can be achieved through a deep borehole with and a Vertical Seismic Profiling. The local seismic surveys are best performed first. Based on their new information the location of suitable targets can be identified and a deep drilling can be carried out. Step 4 can be done through local 3D seismic surveys near the Renkum site and other qualified sites in the area.

## INHOUD

Verspreidingslijst	I
Samenvatting	II
SUMMARY	V
Inhoud	VIII
Lijst van tabellen	XI
Lijst van figuren	XIII
Lijst van afkortingen	XV
<b>HOOFDSTUK 1. INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>HOOFDSTUK 2. SITUERING</b>	<b>2</b>
2.1. Topografische Situering	2
2.2. Geologische Situering	3
2.2.1. Geologische Data	3
2.2.2. Regionale Structurele Setting	5
2.2.3. Regionale Lithostratigrafische Setting	5
<b>HOOFDSTUK 3. NIEUWE SEISMISCHE SURVEYS</b>	<b>17</b>
3.1. Algemeen	17
3.1.1. Acquisitie	17
3.1.2. Processing	20
3.2. Sanity Check	22
3.3. Interpretatie	23
3.3.1. Geïnterpreteerde Lithostratigrafische Horizonten	23
3.3.2. Wijze van Interpretatie	24
3.3.3. Interpretatie Limburg Groep (DC) en Kolenkalk Groep (CL)	25
3.4. Lithostratigrafische Koppeling	26
3.4.1. Koppeling binnen het Studiegebied	27
3.4.2. Koppeling binnen de Omgeving van het Studiegebied	28
3.4.3. Koppeling ver buiten het Studiegebied	28
3.4.4. Koppeling met Californië/Venlo	30
<b>HOOFDSTUK 4. TIJD-MODEL</b>	<b>34</b>
4.1. Structurele Interpretatie	34
4.2. Opbouw van TWT-vlakken per Seismostratigrafische Horizont	35
4.2.1. Model-Gebied	35
4.2.2. Model-Data	36
4.2.3. Model-Procedure	36



<b>HOOFDSTUK 5. TIJD/DIEPTE CONVERSIE</b>	<b>38</b>
5.1. Algemeen	38
5.2. Velmod Model en Velmod v3.1	38
5.3. Oppervlaktesnelheid en Snelheidsgradiënt voor de Limburg Groep	40
<b>HOOFDSTUK 6. DIEPTE-MODEL</b>	<b>42</b>
6.1. Procedure	42
6.2. Calibratie aan Diepboringen	42
<b>HOOFDSTUK 7. BESPREKING VAN HET DIEPTE-MODEL</b>	<b>46</b>
7.1. Algemeen	46
7.2. De Ondiepe Model-Eenheden	46
7.2.1. Boven Noordzee Groep (NU)	47
7.2.2. Midden en Onder Noordzee Groep (NMNL)	48
7.2.3. Krijtkalk Groep (CK)	49
7.2.4. Rijnland Groep (KN)	51
7.2.5. Onder Germaanse Trias Groep (RB)	52
7.2.6. Zechstein Groep (ZE)	54
7.2.7. Boven Rotliegend Groep (RO)	56
7.3. De Diepe Model-Eenheden	57
7.3.1. Caumer Subgroep (DCC)	57
7.3.2. Geul Subgroep (DCG) – Optie 1	60
7.3.3. Geul Subgroep (DCG) – Optie 2	61
7.3.4. Geul Subgroep (DCG) – Optie 3	64
7.4. Conclusies	65
7.4.1. Ondiepe Model Eenheden	65
7.4.2. Diepe Model Eenheden	66
<b>HOOFDSTUK 8. STRUCTURELE OPBOUW VAN DE DIEPE ONDERGROND</b>	<b>68</b>
8.1. Algemeen	68
8.2. Structuren	69
8.3. Breuken	70
8.3.1. Oriëntatie	70
8.3.2. Nummering	71
8.3.3. Breukverzet/Breukwerking	73
<b>HOOFDSTUK 9. TEMPERATUUR-MODEL</b>	<b>75</b>
9.1. Aanpak	75
9.1.1. Berekeningswijze	75
9.1.2. Bepaling van de oppervlaktetemperatuur	77
9.1.3. Thermische geleidbaarheid	77
9.1.4. Warmtegeneratie	80
9.1.1. Warmteflux	81
9.2. Temperatuur aan de top van de Geul Subgroep	81

<b>HOOFDSTUK 10. POTENTIËLE LOCATIES VOOR GEOTHERMIE</b>	<b>83</b>
10.1. <i>Algemeen</i>	83
10.1.1. Ondiepe Targets	83
10.1.2. Targets in de Kolenkalk Groep	84
10.2. <i>Onderzochte Sites</i>	85
10.2.1. SMURFIT KAPPA	85
<b>HOOFDSTUK 11. CONCLUSIES</b>	<b>90</b>
<b>HOOFDSTUK 12. AANBEVELINGEN</b>	<b>92</b>
<b>Literatuurlijst</b>	<b>93</b>
<b>Bijlagelijst</b>	<b>95</b>
<b>Bijlage A: Warmtegeneratie lithostratigrafische eenheden</b>	<b>96</b>
<b>Bijlage B: Berekende temperatuurprofielen en warmtefluxen voor referentieboringen</b>	<b>102</b>
<b>Bijlage C: Inputparameters en berekend temperatuurprofiel voor de locatie Smurfit Kappa</b>	<b>105</b>
<b>Bijlage D: Figuren</b>	<b>106</b>

## LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: De gebruikte diepboringen met de totale verticale diepte, de code van de aangeboorde lithostratigrafische eenheid, de afstand tot het centrum van het studiegebied en de code van de structurele eenheid waarbinnen ze zich bevinden.	3
Tabel 2: De bestaande seismische surveys in het onderzoeksgebied met de lengte van de bijhorende lijnen, de nabijgelegen diepboringen en de kruisingen met de lijnen van de nieuwe seismische surveys.	4
Tabel 3: De nieuwe seismische surveys met de lengte van de bijhorende lijnen, de nabijgelegen diepboringen en de onderlinge kruisingen.	5
Tabel 4: Overzicht van de aanwezige lithostratigrafische eenheden met de gebruikte codering en een korte beschrijving van de lithologie en het afzettingsmilieu, in het onderzoeksgebied.	9
Tabel 5: Overzicht van de UDG nabij Nijmegen en Renkum, met hun lengte, het effectief aantal schotpunten en het aantal meetpunten.	18
Tabel 6: Acquisitieparameters voor lijnen BURKM006 t/m BURKM 010 (campagne L2EBN2020B).	18
Tabel 7: Overzicht van de verschillende stappen tijdens de gedetailleerde processing door DUG (2020).	20
Tabel 8: De diepboringen gelegen in het studiegebied, met de nabijgelegen seismische lijnen, het aantal doorboorde lithostratigrafische eenheden en de lithocode van de aangeboorde gesteenten.	27
Tabel 9: De diepboringen gelegen in de omgeving van het studiegebied, met de nabijgelegen seismische lijnen, het aantal doorboorde lithostratigrafische eenheden en de lithocode van de aangeboorde gesteenten.	28
Tabel 10: De dichtstbij het studiegebied gelegen diepboringen waarin de Kolenkalk Groep aangeboord werd, met het minimale aantal en de totaallengte van de seismische lijnen tussen de diepboringen en het studiegebied, het aantal doorboorde lithostratigrafische eenheden en de lithocode van de aangeboorde gesteenten.	29
Tabel 11: De gemiddelde afwijking (Average) van het massacentrum, voor wat $V_{int}$ van de verschillende klassen betreft, ten opzichte van de regressie lijn en de standaarddeviatie (StDev) van de verschillende klassen op $V_{int}$ van de Limburg Groep, waarbij blauwe de niet geïnverteerde klassen voorstellen (ten Veen et al., 2019).	40
Tabel 12: De diepboringen gebruikt bij de calibratie van het diepte-model, met de verticale diepte van de boringen, de lithocode van de aangeboorde lithologische eenheid en de codes voor de doorboorde en aangeboorde velmod eenheden.	43
Tabel 13: De diepboringen met de diepte van de aangeboorde lithostratigrafische eenheden, de diepte in het dgm diep v5 model en de diepte in het model uit dit onderzoek evenals het verschil ten opzichte van de waarneming in de diepboringen bij aanvang van het iteratief proces.	44
Tabel 14: Boringen die gebruikt werden voor het opstellen van het temperatuurmodel.	75
Tabel 15: Grenswaarden gebruikt voor het fitten van het ééndimensionale temperatuurmodel met de temperatuurswaarden gemeten in de boringen.	76
Tabel 16: Oppervlaktewarmteflux berekend voor de geselecteerde boringen.	81
Tabel 17: Diepte van de basis van de lithostratigrafische eenheden op de locatie Smurfit Kappa.	82
Tabel 18: Geschatte temperatuur aan de basis van de Geul Subgroep met 95% betrouwbaarheidsinterval uitgaande van optie 2 van het dieptemodel.	82
Tabel 19: De diepte en temperatuur ter hoogte van de basis van de verschillende gemodelleerde lithostratigrafische eenheden ter hoogte van de Smurfit Kappa site te Renkum.	86
Tabel 20: De diepte van de basis van de Caumer Subgroep en van de 3 opties voor de basis van de Geul Subgroep, met opgave van de standaarddeviatie op de diepte, de dikte, de	

intervalsnelheid en de tijd-dikte van het pakket bij gebruik van de “all areas” waarden voor de oppervlaktesnelheid en de snelheidsgradiënt voor de Limburg Groep. \_\_\_\_\_ 87

Tabel 21: De diepte van de basis van de Caumer Subgroep en van de 3 opties voor de basis van de Geul Subgroep, met opgave van de standaarddeviatie op de diepte, de dikte, de  
intervalsnelheid en de tijd-dikte van het pakket bij gebruik van de “non inverted areas”

waarden voor de oppervlaktesnelheid en de snelheidsgradiënt voor de Limburg Groep. \_\_\_\_ 87

Tabel 22: Warmtegeneratie voor de verschillende lithostratigrafische eenheden in  $\mu\text{W}/\text{m}^3$  \_\_\_\_ 96



## LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Topografische situering van het studiegebied, de gebruikte diepboringen en de gebruikte oude en nieuwe seismische lijnen. _____	2
Figuur 2: De structureel geologische situering van het studiegebied met de diepboringen, de lijnen van de oude en nieuwe seismische surveys en de structurele eenheden naar Kombrink et al., 2012 en Bekesi et al., 2020. _____	4
Figuur 3: De verdeling van de lithostratigrafische eenheden in de omgeving van Nijmegen over de verschillende structurele eenheden (Witmans et al., 2004). _____	6
Figuur 4: Kaart met ligging van de nieuwe seismische lijnen in het gebied van Renkum en Nijmegen in het kader van het SCAN en UDG programma. _____	17
Figuur 5: Kaart met de finale CDP lijnen en schotpunten van UDG lijnen 006 en 007 in de omgeving van Nijmegen. _____	19
Figuur 6: Kaart met de finale CDP lijnen en schotpunten van UDG lijnen 008, 009 en 010 in de omgeving van Renkum. _____	19
Figuur 7: Vergelijking tussen de modellagen van dgm diep v5 en de reflectoren op lijn BURKM010 van de L2EBN2020B seismische survey. _____	22
Figuur 8: Interpretatie van seismische sectie BURKM010, met in het paars de interpretatie uit dgm diep v5 voor de lithostratigrafische eenheden boven de top van de Limburg Groep (nummering van de breuken, zie hoofdstuk 8). _____	24
Figuur 9: De opbouw van de Limburg Groep, met de situering van de Caumer en Geul subgroepen en hun respectievelijke formaties en leden, waaronder het Lid van Ubachsberg aan de top van de Epen Formatie ( <a href="https://www.dinoloket.nl/">https://www.dinoloket.nl/</a> ). _____	25
Figuur 10: De situering van diepboring NVG-01 op lijn SCAN002 van de L2EBN2019A seismische survey ten opzichte van het lokale lithostratigrafische en structureel geologische kader (nummering en codering zie hoofdstuk 8). _____	27
Figuur 11: Correlatie van de Limburg Groep tussen het MSB-02 gebied en het BKH-01 gebied. ____	32
Figuur 12: Correlatie van de Limburg Groep tussen het Renkum-Nijmegen gebied (SCAN005) en het Venlo (Californië) gebied (09-02) langs nieuwe seismische lijn SCAN016. Merk op dat de correlatie van opties 1-3 tussen lijnen 09-02 en SCAN016 onzeker is omwille van verschillen in referentieniveau tussen beide lijnen (op dit paneel is lijn 09-02 te laag geplaatst). _____	33
Figuur 13: De situering van het model-gebied binnen het onderzoeksgebied. _____	35
Figuur 14: De opdeling van de stratigrafische kolom in 9 velmod eenheden (van Dalfsen et al., 2006) en de $V_0$ - en k-waarden voor de verschillende velmod eenheden uit velmod v3.1 (Pluymaekers et al., 2017). _____	39
Figuur 15: Schematisch overzicht van de work flow bij het hanteren van de $V_0$ en k waarden voor de tijd-diepte conversie. _____	40
Figuur 16: De situering van het onderzoeksgebied binnen de opdeling in klassen overeenkomstig de aanwezige lithokolom, waarbij klasse 4 en 5 de geïnverteerde gebieden voorstellen (ten Veen et al., 2019). _____	41
Figuur 17: Work flow voor het omzetten van de TWT rasters naar diepterasters. _____	42
Figuur 18: Schematische voorstelling van de work flow voor het calibreren aan de boringen (correctie op dikte). _____	45
Figuur 19: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Boven Noordzee Groep. _____	46
Figuur 20: De dikte (m) van de Boven Noordzee Groep. _____	47
Figuur 21: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Midden en Onder Noordzee Groep. _____	48
Figuur 22: De dikte van de Midden en Onder Noordzee Groep. _____	49
Figuur 23: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Krijtkalk Groep. _____	50
Figuur 24: De dikte van de Krijtkalk Groep. _____	50
Figuur 25: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Rijnland Groep. _____	51

Figuur 26: De dikte van de Rijnland Groep. _____	52
Figuur 27: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Onder Germaanse Trias Groep. _____	53
Figuur 28: De dikte (m) van de Onder Germaanse Trias Groep. _____	54
Figuur 29: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Zechstein Groep. _____	55
Figuur 30: De dikte (m) van de Zechstein Groep. _____	55
Figuur 31: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Boven Rotliegend Groep. _____	56
Figuur 32: De dikte (m) van de Boven Rotliegend Groep. _____	57
Figuur 33: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Caumer Subgroep. _____	58
Figuur 34: De dikte (m) van de Caumer Subgroep. _____	59
Figuur 35: 3D-zicht vanuit het W op de basis van de Caumer Subgroep (in tijd), met in het geel het plateau in het SE, het donkerbruin het centrale diep in het NW en tussen beide de helling. _	59
Figuur 36: De diepte van het basisvlak (m NAP) en de dikte (m) van de Geul Subgroep optie 1. _	60
Figuur 37: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 1. _____	61
Figuur 38: De diepte van het basisvlak(m NAP van de Geul Subgroep optie 2. _____	62
Figuur 39: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 2. _____	63
Figuur 40: 3D-zicht vanuit het W op de basis van de Geul Subgroep optie 2 (in tijd), met in het geel het plateau in het SE, het donkerbruin het centrale diep in het NW en tussen beide de helling. _____	63
Figuur 41: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Geul Subgroep optie 3. _____	64
Figuur 42: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 3. _____	65
Figuur 43: Het depositionele carbonaat facies model volgens Wilson (1975). _____	66
Figuur 44: De situering van de structuren en breuken aan de top van de Limburg Groep binnen het model-gebied. _____	68
Figuur 45: De situering van de structuren en breuken op seismische lijn BURKM009. _____	69
Figuur 46: Positive Flower Structure (A) en Negative Flower Structure (B) (Nanda, 2016). _____	70
Figuur 47: De situering van de structuren en breuken aan de top van de Limburg Groep binnen het model-gebied. _____	71
Figuur 48: Temperatuur – diepte trend vastgesteld in de 8 boringen. De onderbroken lijnen tonen het 95% betrouwbaarheidsinterval van de geschatte waarde op basis van de lineaire regressie. _____	77
Figuur 49: Gemiddelde mineralogische samenstelling en porositeit voor de lithostratigrafische (sub-) groepen. _____	79
Figuur 50: Berekenende thermische geleidbaarheid en warmtegeneratie voor de lithostratigrafische (sub)groepen. _____	80
Figuur 51: Overzicht van primaire en secundaire targets voor geothermie (ter Borgh & Mijnlief, 2019). De regio Renkum-Nijmegen maakt deel uit van gebied C, waarvoor de Rotliegend Groep en de Kolenkalk Groep als primaire targets en het bovenste deel van de Limburg Groep (Westfaal), Zechstein, Trias en Rijnland groepen als secundaire targets zijn aangeduid. _____	83
Figuur 52: Zonering van het top-vlak van de Kolenkalk Groep in het model-gebied. _____	84
Figuur 53: Situering van de sites ten opzichte van het model-gebied, de seismische data en diepboringen. _____	86
Figuur 54: Situering van de Smurfit Kappa site op seismische lijn BURKM008 ten opzichte van breuk (14) en de verschillende opties voor de basis van de Geul Subgroep. _____	88

---

**LIJST VAN AFKORTINGEN**

AHN	Actueel Hoogtebestand Nederland
CDP	Common Depth Point
CNB	Centraal Nederlands Bekken
NAP	Normaal Amsterdams Peil
NLOG	Nederlands Olie & Gas Portaal
PMC	Peel-Maasbommel Complex
RP	Receiver Point of meetpunt
RVG	Roerdal Slenk
SCAN	Seismische Campagne Aardwarmte Nederland
SP	Shot Point of schotpunt
TWT	Two-Way Travel Time
UDG	Ultra Diepe Geothermie
WNB	Westelijk Nederlands Bekken





## HOOFDSTUK 1. INLEIDING

---

In de Provincie Gelderland zijn meerdere partijen op verschillende locaties geïnteresseerd in de mogelijkheid om energie te halen uit aardwarmte. Zo plant Tellus Renkum BV de ontwikkeling van een diepe-geothermie-project voor de levering van lagedrukstoom aan de papierfabriek in Renkum van Smurfit Kappa (voorheen Parenco). Daarnaast is ook in Nijmegen interesse, bijvoorbeeld aan Radboud UMC of aan de voormalige energiecentrale van Engie in de Noordkanaalhaven. Er zijn in de ondergrond in deze regio meerdere geologische formaties die in meer of mindere mate potentieel bieden voor geothermie. Gezien de warmtevraag (midden tot hoge temperatuur) identificeerden eerdere studies de kalkstenen van de Kolenkalk Groep (Lower Carboniferous Limestone Group) als mogelijke target voor ultra-diepe geothermie. Het gesteente moet hiervoor nog doorlatend genoeg zijn, wat afhangt van het type kalksteen en de processen die erop hebben ingespeeld. Uit de voorgaande studies blijkt dat de kwaliteit van de beschikbare data in de onmiddellijke omgeving van Renkum onvoldoende is om zicht te krijgen op de relevante karakteristieken.

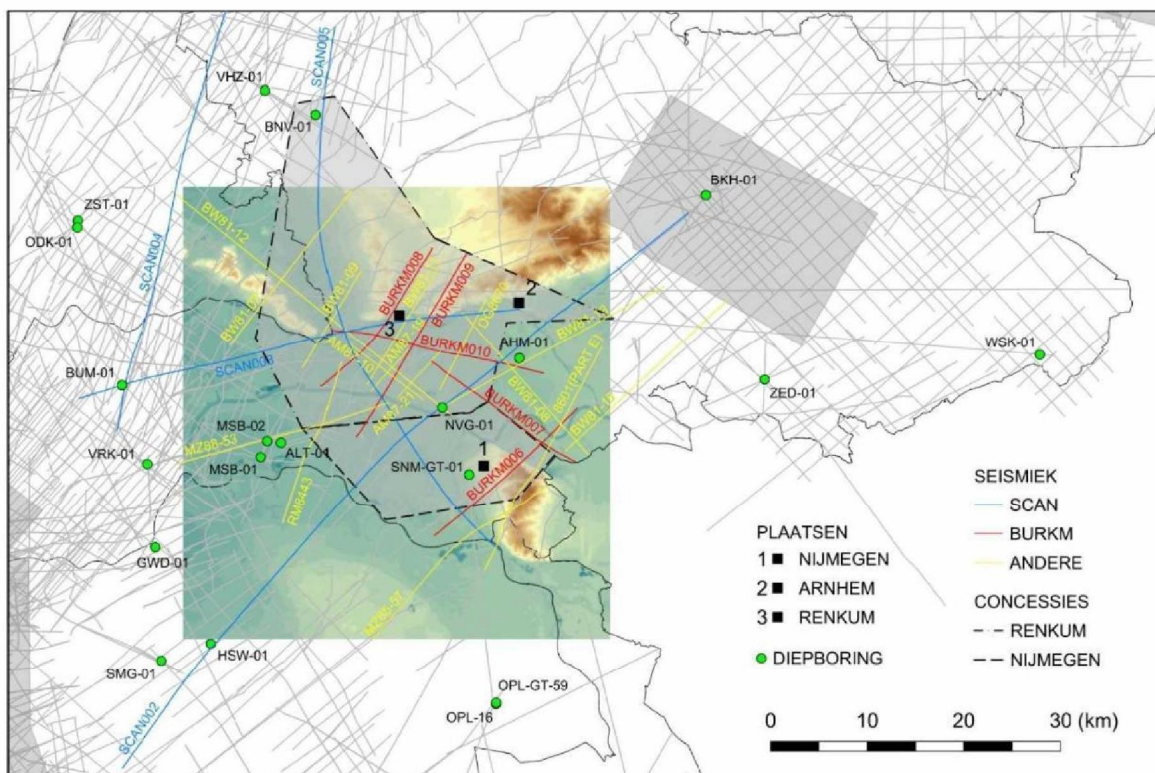
Om het te verwachten vermogen van een geothermisch doublet accurater te kunnen inschatten zijn bovendien extra gegevens nodig over de diepteligging, dikte en de opbouw (lithologische eenheden en breuken) van de kalkstenen en de onderliggende aardlagen. Reflectieseismiek is de meest voor de hand liggende methode om deze gegevens op een snelle en efficiënte manier te verweven. De nieuwe seismische data (Q1 2020, Nijmegen – Betuwe – Utrecht – Salland; <https://scanaardwarmte.nl/waar-doen-we-onderzoek/>) zijn gebruikt om een meer verfijnd lokaal geologisch model op te stellen, op basis waarvan een betere inschatting van het geothermische vermogen van een ultradiepe geothermisch doublet kan gemaakt worden.

Voorliggend rapport bespreekt de resultaten van het nieuwe seismische onderzoek, het geactualiseerde 3D geologische lagen- en breukenmodel en het daarop gebaseerde temperatuursmodel en tracht op basis daarvan een inschatting te maken van het potentieel voor (ultradiepe) geothermie in de omgeving van Renkum in Gelderland.

## HOOFDSTUK 2. SITUERING

## 2.1. TOPOGRAFISCHE SITUERING

De site van Smurfit Kappa Parenco BV is gelegen in het zuiden van Gelderland, op ongeveer 13<sup>o</sup>km ten westen van het centrum van Arnhem en 18<sup>o</sup>km ten noorden van het centrum van Nijmegen. Het bedrijf ligt op de noordoever van de Nederrijn die samen met de Waal en de Maas het onderzoeksgebied van oost naar west doorstroomt. Het onderzoeksgebied wordt in tegenwijzerzin ongeveer omschreven door de polygoon Arnhem, Ede, Wageningen, Druten, Wijchen, Cuijk, Groesbeek, Gendt en Huissen en leunt in het zuidoosten aan tegen de grens Nederland/Duitsland. Het centrale punt van het studiegebied ligt ongeveer ter hoogte van Valburg iets ten noorden van Nijmegen. Het noorden van het gebied wordt gevormd door de zuidrand van de Veluwezoom waar het reliëf tot een hoogte van 90 m NAP opklimt. Gelijkaardige hoogten worden teruggevonden in het zuiden nabij Berg en Dal ten zuidoosten van Nijmegen. In beide gevallen gaat het om een reliëf gevormd door stuwwallen als gevolg van het oprukkende landijs tijdens de Saale ijstijd. Het reliëf van het overgrote deel van het onderzochte gebied ligt evenwel tussen 5<sup>o</sup>m en 10<sup>o</sup>m NAP en wordt gevormd door de alluviale vlakke van de 3 voornoemde rivieren.



Figuur 1: Topografische situering van het studiegebied, de gebruikte diepboringen en de gebruikte oude en nieuwe seismische lijnen.



## 2.2. GEOLOGISCHE SITUERING

### 2.2.1. GEOLOGISCHE DATA

Voor het onderzoek werd informatie verzameld uit:

- literatuur (SCAN-rapporten, Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Stratigrafische Nomenclator van Nederland, ...)
- bestaande geologische modellen (dgm v2.2/Dinoloket, dgm diep v5/NLOG-portaal)
- bestaande diepboringen (NLOG-portaal)
- bestaande seismische lijnen (NLOG portaal)

Alle diepboringen binnen een radius van 45°km ten opzichte van het centrum van het onderzoeksgebied werden geraadpleegd en binnen een radius van 18°km werd een keuze gemaakt uit de bestaande seismische lijnen. Hierbij werd de keuze geleid enerzijds door mogelijke kruisingen met diepboringen en met nieuwe seismische lijnen en anderzijds door de ouderdom van de seismische surveys. Hierbij werd er gekozen enkel seismiek van na 1980 te raadplegen. De geraadpleegde diepboringen en seismische lijnen zijn opgelijst respectievelijk in tabellen 1 en 2.

Figuur 1 geeft de ruimtelijke situering van de bestaande en nieuwe geologische data weer in en rond het studiegebied.

*Tabel 1: De gebruikte diepboringen met de totale verticale diepte, de code van de aangeboorde lithostratigrafische eenheid, de afstand tot het centrum van het studiegebied en de code van de structurele eenheid waarbinnen ze zich bevinden.*

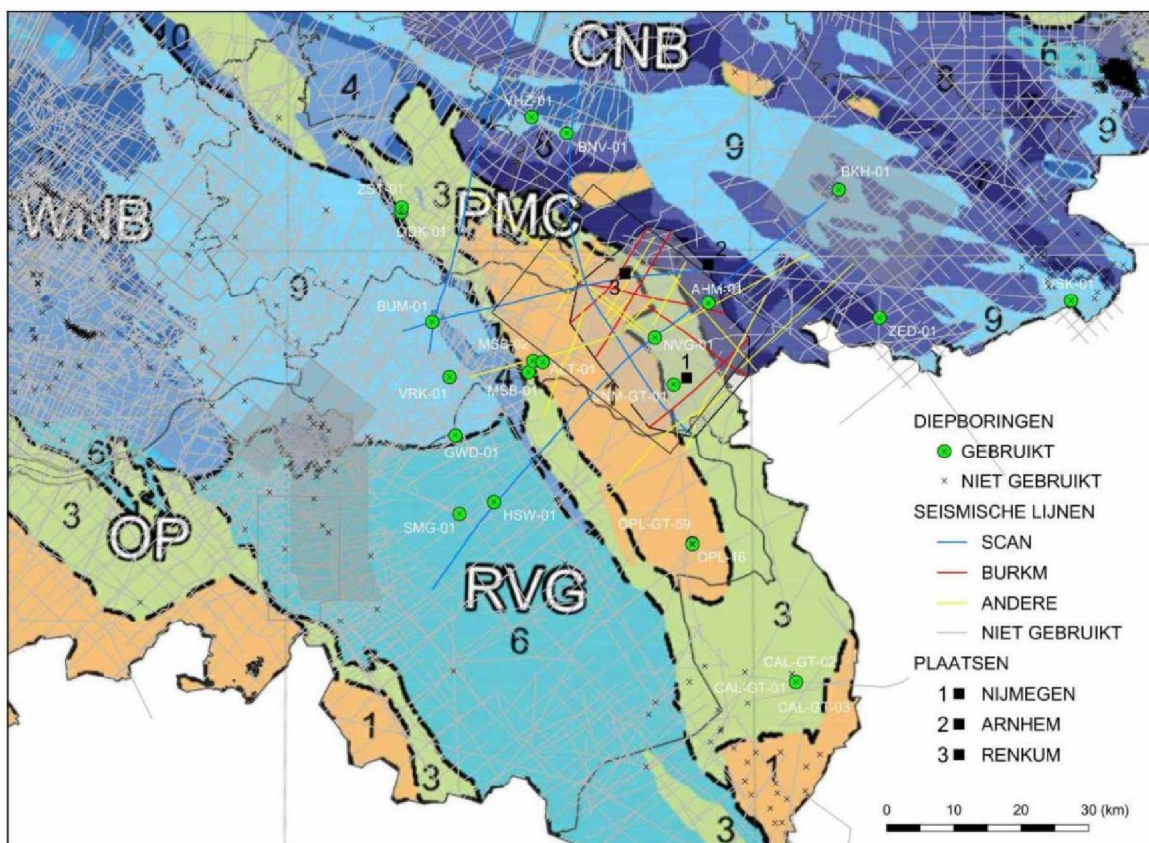
NAAM	CODE	X (m) RD	Y (m) RD	Z (m) NAP	DIEPTE (m) TVD	LITHOCODE	AFSTAND (km)	STRUCTURELE EENHEID
ARNHEM-01	AHM-01	190910	437930	11,01	662	NMRFC	9	CNB-07
ALTFORST-01	ALT-01	166320	429120	7	654	CKGR	17	PMC-01
BRONKHORST-01	BKH-01	210224	454757	16,57	1553,09	DCCU	35	CNB-09
BARNEVELD-01	BNV-01	169890	463106	17,54	1021,96	UNDEF	33	CNB-09
BARNEVELD-01-SIDETRACK1	BNV-01-S1	169890	463106	17,54	2288,45	DCC	33	CNB-09
BUURMALSEN-01	BUM-01	149852	435103	9,3	2189,25	DCC	33	WNB-09
CALIFORNIE-GT-01	CAL-GT-01	203895	381599	33	1856,64	CLZL	55	PMC-03
CALIFORNIE-GT-01-SIDETRACK1	CAL-GT-01-S1	203895	381599	33	2510,17	OBBS	55	PMC-03
CALIFORNIE-GT-02	CAL-GT-02	203898	381606	32	1481,68	OBBS	55	PMC-03
CALIFORNIE-GT-03	CAL-GT-03	203901	381613	33	2255,77	OBBS	55	PMC-03
CALIFORNIE-GT-04	CAL-GT-04	203337	382807	31,2			54	PMC-03
CALIFORNIE-GT-05	CAL-GT-05	203341	382817	31,2			54	PMC-03
GEWANDE-01	GWD-01	153310	418263	12,63	1990,23	RNROF	33	WNB-09
GEWANDE-01-SIDETRACK1	GWD-01-S1	153310	418263	12,63	1990,23	RNROL	33	WNB-09
HEESWIJK-01	HSW-01	159054	408294	14,99	2488,01	UNDEF	34	RVG-06
HEESWIJK-01-SIDETRACK1	HSW-01-S1	159054	408294	14,99	2774,56	UNDEF	34	RVG-06
MAASBOMMEL-01	MSB-01	164203	427638	8,5	1713,5	ZEZ3C	19	PMC-03
MAASBOMMEL-02	MSB-02	164883	429301	9,5	1278	DCCB	18	PMC-01
NIJMEGEN-VALBURG-01	NVG-01	182939	432783	15,35	1277	DCCU	0	PMC-03
ODIJK-01	ODK-01	145229	451443	4	650	CKGR	42	PMC-03
OPLOO-16	OPL-16	188500	402050	19,09	1149,64	CKAK	31	PMC-01
OPLOO-GT-59	OPL-GT-59	188495	402175	18,4	550	CKGR	31	PMC-01
SINT-MICHELSGESTEL-01	SMG-01	153912	406533	10,73	3337,5	RBSH	39	RVG-06
SANADOME-GT-01	SNM-GT-01	185710	425810	15,35	759	CKGR	8	PMC-03
VOORTHUIZEN-01	VHZ-01	164647	465586	8,56	1753,5	ATAL	38	CNB-10
VARIK-01	VRK-01	152469	426917	7,96	1807,25	RBMVL	31	WNB-09
WINTERSWIJK-01	WSK-01	244787	438270	44,61	5002,98	OB	62	CNB-09
ZEDDAM-01	ZED-01	216292	435702	18,27	1964,5	DCCB	33	CNB-08
ZEIST-01	ZST-01	145291	452166	4,05	1100	KNGLU	42	PMC-03



Tabel 2: De bestaande seismische surveys in het onderzoeksgebied met de lengte van de bijhorende lijnen, de nabijgelegen diepboringen en de kruisingen met de lijnen van de nieuwe seismische surveys.

SURVEY	JAAR	LIJN	LENGTE	NABIJ DIEPBORING	KRUIISING
L2PET1981E	1981	BW81-07	20,33		SCAN005
L2PET1981E	1981	BW81-08	19,69	AHM-01	SCAN002 / SCAN003 / BURKM006 / BURKM010
L2PET1981E	1981	BW81-09	11,82		SCAN003 / SCAN005
L2PET1981E	1981	BW81-11	14,75		SCAN005 / SCAN005
L2PET1981E	1981	BW81-12	36,92	NVG-01	SCAN002 / SCAN003 / SCAN005 / BURKM008 / BURKM009 / BURKM010
L2PET1981E	1981	BW81-13	26,82	AHM-01 / NVG-01	SCAN002 / BURKM007 / BURKM010
L2PET1981E	1981	BW81-15	22,98		
L2RGD1984A	1984	RM8443	18,04		BURKM008
L2MOB1985A	1985	MZ85-57	24,54		SCAN005
L2DGP1986B	1986	8601(PART E)	26,46		SCAN005 / BURKM006 / BURKM007
L2DGP1986C	1986	DG8670	10,76		SCAN003 / BURKM007 / BURKM010
L2PET1987A	1987	AM87-10	9,98		SCAN005 / BURKM008 / BURKM009
L2PET1987A	1987	AM87-19	5,93		SCAN005
L2PET1987A	1987	AM87-21	6,72		BURKM010
L2MOB1988A	1988	MZ88-53	22,91	ALT-01 / MSB-02	SCAN005 / BURKM009

In tegenstelling tot het omliggende Centraal Nederlands Bekken (CNB), de Roerdal Slenk (RVG) en het Westelijk Nederlands Bekken (WNB) is het Peel-Maasbommel Complex (PMC) een structurele eenheid die geologisch gezien weinig onderzocht is en slechts met een beperkt aantal data bedekt is (figuur 2). De noordwestelijke rand van het PMC heeft een redelijke seismische bedekking en op de zuidoostelijke rand van het PMC is er een goede bedekking met diepboringen. Maar de rest van het PMC en dus ook het studiegebied op de noordoostelijke rand ervan zijn onderbedeeld.



Figuur 2: De structureel geologische situering van het studiegebied met de diepboringen, de lijnen van de oude en nieuwe seismische surveys en de structurele eenheden naar Kombrink et al., 2012 en Bekesi et al., 2020.



De lijnen van de nieuwe seismische surveys uitgevoerd in 2019 (SCAN) en 2020 (BURKM) brengen hier verandering in. Dit onderzoek is hoofdzakelijk gebaseerd op de geologische informatie vervat in de lijnen van deze nieuwe surveys. Tabel 3 geeft een overzicht van de gebruikte nieuwe seismische lijnen en figuren 1 en 2 geven de ruimtelijke situering ervan in een topografische en geologische context. Tijdens het finaliseren van het rapport is ook lijn SCAN016 ter beschikking gekomen, die gebruikt is voor de correlatie met de omgeving Californië.

*Tabel 3: De nieuwe seismische surveys met de lengte van de bijhorende lijnen, de nabijgelegen diepboringen en de onderlinge kruisingen.*

SURVEY	JAAR	LIJN	LENGTE	NABU DIEPBORING	KRUISING
L2EBN2019A	2019	SCAN002	82,61	AHM 01 / HSW 01 / NVG 01	SCAN005 / BURKM007 / BURKM010
L2EBN2019A	2019	SCAN003	46,58	BUM-01	SCAN005 / BURKM008 / BURKM009 / BURKM010
L2EBN2019A	2019	SCAN005	59,64	BNV-01	SCAN002 / SCAN003 / BURKM006 / BURKM008 / BURKM009
L2EBN2020	2020	BURKM006	19,97		SCAN005 / BURKM007
L2EBN2020	2020	BURKM007	18,28		SCAN002 / BURKM006
L2EBN2020	2020	BURKM008	18,62		SCAN003 / SCAN005 / BURKM010
L2EBN2020	2020	BURKM009	22,14		SCAN003 / SCAN005 / BURKM010
L2EBN2020	2020	BURKM010	22,45	AHM-01	SCAN002 / SCAN003 / SCAN005 / BURKM008 / BURKM009

### 2.2.2. REGIONALE STRUCTURELE SETTING

Structureel geologisch is het onderzoeksgebied hoofdzakelijk gelegen op het Peel-Maasbommel Complex (PMC). Dit is een zuidoost-noordwest georiënteerde structuur waarvan de kern opgebouwd is uit Paleozoïsche gesteenten enkel bedekt door gesteenten van Krijt en/of Paleogeen en Neogeen ouderdom. Langs de randen van het PMC worden boven de Paleozoïsche gesteenten ook nog gesteenten van Trias ouderdom aangetroffen. In het noordoosten grenst het PMC aan het Centraal Nederlands Bekken (CNB) en in het zuidwesten aan de Roerdal Slenk (RVG) die naar het westen toe overgaat in het Westelijk Nederlands Bekken (WNB). Deze structureel geologische eenheden zijn breukgebonden zakkingsgebieden met dikke pakketten gesteenten van Jura en/of Trias ouderdom afgedekt door sedimentpakketten afgezet tijdens het Paleogeen en Neogeen. Als gevolg van inversiebewegingen komen er binnen de RVG, het WNB en CNB slechts weinig of geen gesteenten van Krijt ouderdom voor. Het noordoostelijke deel van het onderzoeksgebied behoort reeds tot het CNB. Figuur 2 geeft de regionale structurele setting weer.

### 2.2.3. REGIONALE LITHOSTRATIGRAFISCHE SETTING

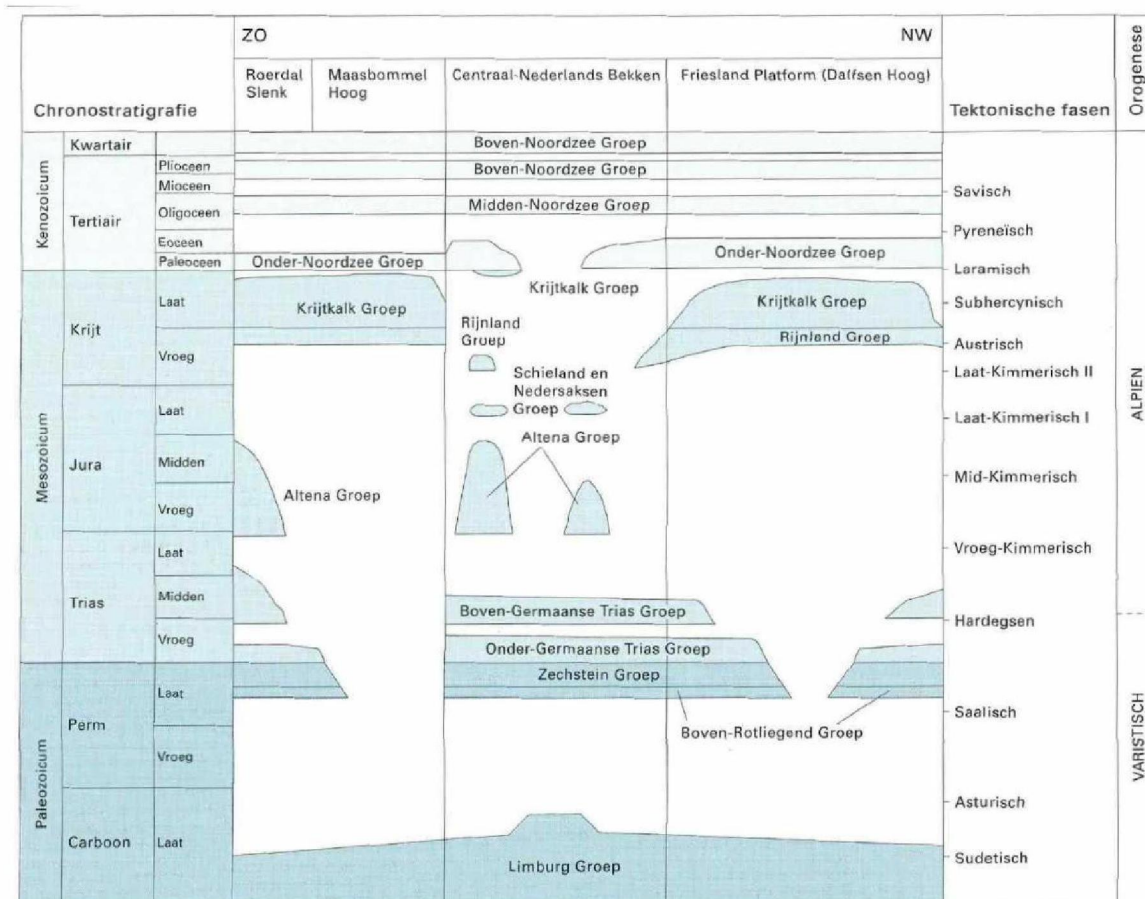
De regionale stratigrafische setting wordt besproken aan de hand van:

- De Stratigrafische Nomenclator van Nederland (Dinoloket)
- De Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, kaartblad IX Harderwijk-Nijmegen (NITG-TNO, 2004)
- Diepboringen uit het NLOG portaal
- Het Geologisch Model DGM-Diep-v5
- Het Geologisch Model DGM-v2.2

#### 2.2.3.1. Boven Noordzee Groep (NU)

Ter hoogte van het studiegebied wordt de Boven Noordzee Groep vertegenwoordigd enerzijds door een reeks formaties van continentale oorsprong en anderzijds door drie formaties met een ondiep mariene origine. Op het PMC werd dit pakket met een dikte tot ongeveer 500°m waargenomen. Buiten het PMC in het CNB en RVG/WNB nabij het onderzoeksgebied kan de dikte van de Boven Noordzee Groep oplopen tot meer dan 1000°m.

De eerste reeks formaties is hoofdzakelijk van Holocene en Pleistocene ouderdom. Hierbij gaat het om glaciale, alluviale, fluviatiele en estuariene afzettingen, bestaande uit zeer verschillende lithologieën gaande van grind, over zand, leem en klei tot veen. Meestal worden ze als “ongedifferentieerd Quartair” aangeduid in de lithostratigrafische interpretatie van de diepboringen aanwezig in het onderzoeksgebied. De dikte van dit “ongedifferentieerd Quartair” kan oplopen tot ongeveer 100m op het PMC. In de boringen in het CNB en RVG/WNB in de nabijheid van het studiegebied worden diktes tot ongeveer 250m opgetekend.



Figuur 3: De verdeling van de lithostratigrafische eenheden in de omgeving van Nijmegen over de verschillende structurele eenheden (Witmans et al., 2004).

De formaties met ondiep mariene sedimenten zijn hoofdzakelijk van Pliocene en Miocene ouderdom. Het gaat hier om de formaties van Maasluis, Oosterhout en Breda.

#### a. Maasluis Formatie (NUMS)

Dit pakket bestaat uit kustnabij afgezet grijs fijn tot matig grof zand, het is glauconietarm en heeft inschakelingen van grijze klei. Op het PMC werd deze formatie met een dikte van ongeveer 120m waargenomen. In het CNB en RVG/WNB in de nabij het onderzoeksgebied wordt een gelijkaardige dikte aangetroffen.



**b. Oosterhout Formatie (NUOO)**

Deze formatie wordt gevormd door groengrijs fijn tot zeer grof zand, ze is glauconiethoudend en bevat schelpen. Bovenaan komt er grijsbruine klei voor. Op het PMC werd dit pakket met een dikte tot ongeveer 115°m aangetroffen. In het CNB en RVG/WNB in de nabij het studiegebied worden diktes tot 250°m en meer waargenomen.

**c. Breda Formatie (NUBR)**

De Formatie van Breda bestaat uit grijsgroen tot zwartgroen fijn zand en zeer zandige klei. Het zand is siltig en glauconiet- en kalkhoudend. Op het PMC werd de formatie waargenomen met een dikte tot 290°m. Nabij het onderzoeksgebied in het CNB en RVG/WNB kan de dikte oplopen tot 650°m en meer.

**2.2.3.2. Midden Noordzee Groep (NM)**

De Midden Noordzee Groep wordt vertegenwoordigd door de formaties van Veldhoven en Rupel. De Tongeren Formatie ontbreekt binnen het studiegebied. Het gaat hier voornamelijk om mariene afzettingen. De Midden Noordzee Groep werd op het PMC waargenomen met een dikte tot 230°m. In het CNB en RVG/WNB nabij het PMC werden diktes vastgesteld tot 400°m. De sedimenten zijn afgezet gedurende het Laat-Oligoceen tot het Vroeg-Mioceen.

**a. Veldhoven Formatie (NMVE)**

Dit pakket bestaat uit een opeenvolging van grijs tot groengrijs fijn zand en groengrijze klei. De formatie bereikt een dikte van 110°m op het PMC, en 230°m in het CNB en RVG/WNB nabij het PMC.

**b. Rupel Formatie (NMRU)**

Deze formatie bestaat hoofdzakelijk uit bruinigrijze siltige zware klei. Deze bevat veel pyriet en is arm aan glauconiet. Onderaan en bovenaan is er een overgang naar glauconiethoudend fijn tot grof zand. Op het PMC loopt de dikte van het pakket op tot ongeveer 160°m, in het CNB en RVG/WNB werden diktes tot 200°m vastgesteld nabij het onderzoeksgebied.

**2.2.3.3. Onder Noordzee Groep (NL)**

De formatie van Dongen en Landen maken tezamen de Onder Noordzee Groep. Deze formaties bestaan hoofdzakelijk uit mariene sedimenten. Dit pakket bereikt diktes tot 150°m op het PMC en tot 260°m in het CNB en RVG/WNB nabij het onderzoeksgebied. Deze afzettingen hebben een Midden Paleocene tot Midden Eocene ouderdom.

**a. Dongen Formatie (NLDO)**

Dit pakket wordt hoofdzakelijk opgebouwd uit grijze, groene en bruine kleien. Ze zijn kalkhoudend en bevatten inschakelingen van glauconiethoudend zand. De formatie werd op het PMC waargenomen met een dikte tot 50°m. In het CNB en RVG/WNB nabij het PMC komen diktes tot 90°m voor.

**b. Landen Formatie (NLLA)**

Deze heterogene formatie wordt opgebouwd uit een opeenvolging van glauconiethoudend groen zand, grijze mergel en donkergroene klei met bovenaan inschakelingen van fijn zand. Op het PMC komen diktes tot 105°m voor, in het CNB en RVG/WNB tot 120°m.

### 2.2.3.4. Krijtkalk Groep (CK)

De Krijtkalk Groep wordt vertegenwoordigd door de formaties van Ommelanden en Texel. Beide bestaan uit vol mariene afzettingen. Op het PMC werd een maximale dikte van ongeveer 650°m waargenomen. In het CNB en RVG/WNB nabij het PMC werd een maximale dikte van ongeveer 20°m vastgesteld. De sedimenten werden afgezet tijdens het Boven Krijt tot het Onder Paleoceen.

#### a. Ommelanden Formatie (CKGR)

De Ommelanden Formatie is opgebouwd uit een opeenvolging van witte en gele of grijze fijnkorrelige kalkstenen. Meestal zijn de kalkstenen hard en bevatten ze lagen met vuursteenknollen. Op het PMC werd een dikte van 650°m vastgesteld, in het CNB en RVG/WNB een dikte van ongeveer 20°m.

#### b. Texel Formatie (CKTX)

Dit pakket bestaat uit lichtgrijze tot roze kalkstenen en mergelige krijtkalken. Aan de basis wordt een transgressief groenzand aangetroffen. Op het PMC werd het pakket waargenomen met een dikte van 95°m. In het CNB en RVG/WNB werd het in de boringen in de onmiddellijke nabijheid van het onderzoeksgebied niet aangetroffen.

### 2.2.3.5. Rijnland Groep (KN)

De Rijnland Groep wordt gevormd door de mariene Holland Formatie en de Vlieland Subgroep. In de omgeving van het onderzoeksgebied werden beide, zij het niet simultaan, in diepboringen waargenomen. Enkel de Holland Formatie werd aangetroffen op het PMC en dit met een dikte tot 180°m. De Vlieland Subgroep komt voor in het CNB ten noorden van het PMC met een dikte van ongeveer 100°m. Deze afzettingen hebben een Onder Krijt ouderdom.

#### c. Holland Formatie (KNGL)

De Holland Formatie wordt gevormd door grijze en roodbruine mergels en kleistenen. Inschakelingen van groenzandlagen en bitumineuze schalie kunnen voorkomen. OP het PMC werd een dikte waargenomen tot 180°m. Buiten het PMC werd de formatie niet aangetroffen in de diepboringen nabij het onderzoeksgebied.

#### d. Vlieland Subgroep (KNN)

Dit pakket bestaat uit zandstenen en kleistenen. Deze werden in één van de onderzochte diepboringen in het CNB ten noorden van het PMC, zonder specificatie op formatie niveau, met een dikte van 100°m aangeboord.

### 2.2.3.6. Nedersaksen Groep (SK)

Van deze groep werden geen sedimenten aangetroffen in het onderzoeksgebied en de onmiddellijke omgeving.

### 2.2.3.7. Scruff Groep (SG)

Van deze groep werden geen sedimenten aangetroffen in het onderzoeksgebied en de onmiddellijke omgeving.



Tabel 4: Overzicht van de aanwezige lithostratigrafische eenheden met de gebruikte codering en een korte beschrijving van de lithologie en het afzettingsmilieu, in het onderzoeksgebied.

Group	Subgroup	Formation	Code	Lithology	Depositional Environment
Boven Noordzee		Quartair		silty sand and sandy loam gravel, clay, peat	aeolian, fluvial, alluvial, colluvial
		Maassluis	NUMS	fine to coarse sand intercalations of clay	near shore, shallow marine
		Oosterhout	NUOO	fine to coarse sand glauconiferous, some clay	
		Breda	NUBR	silty fine to medium sand sandy clay, glauconiferous	marine
Midden Noordzee		Veldhoven	NMVE	clayey sand to fine sand clay	shallow marine
		Rupel	NMRU	silty clay heavy clay	marine
Onder Noordzee		Dongen	NLDO	clay intercalations of sand	marine
		Landen	NLLA	green to grey clay marl and fine sand	
Krijtkalk		Ommelanden	CKGR	fine grained limestone chert nodules	marine
		Texel	CKTX	limestone, marly chalk greensand	deep water marine
Rijnland	Vlieland	Holland	KNGL	marl, claystone intercalations of sand and shale	deep water marine
			KNN	sandstone claystone	marine
Schieland			SL	claystone clayey sandstone intercalations of coal	paralic, continental
Altena			AT	claystone intercalations of siltstone intercalations of sandstone	marine
Boven Germaanse Trias			RN	claystone evaporites carbonates sandstone	shallow marine flood plain
Onder Germaanse Trias	Hoofd Bontzandsteen	Hardeggen	RBMH	red claystone white to rose sandstone	fluvial, lacustrine
		Dethfurt	RBMD	sandstone brown claystone	fluvial
		Volpriehausen	RBMV	sandstone, siltstone claystone	fluvial, lacustrine
	Onder Bontzandsteen	Rogenstein	RBSR	sandstone, siltstone, claystone oölitic intercalations	near shore, shallow marine
		Hoofd Kleisteen	RBSM	claystone sandstone and oölitic intercalations	
Zechstein		Boven Kleisteen	ZEUC	claystone anhydrite, carbonate	playa, lacustrine
		Aller (Z4)	ZEZ4	claystone, anhydrite, salt claystone, sandstone	marine
		Leine (Z3)	ZEZ3	claystone, anhydrite, salt claystone, sandstone	
		Staasfurt (Z2)	ZEZ2	claystone, anhydrite, salt anhydrite	
		Werra (Z1)	ZEZ1	black shale carbonate, anhydrite, salt	
Boven Rotliegend		Slochteren	ROSL	sandstone, conglomerate intercalations of claystone	aeolian, fluvial sabkha
Limburg	Caumer	Maurits	DCCU	grey siltstone intercalations of coal and sandstone	delta, river plain
		Ruurlo	DCCR	black siltstone intercalations of coal	
		Baarlo	DCCB	black siltstone and fine grained sandstone intercalations of coal	
	Geul	Epen	DCGE	siltstone with intercalations of fine to medium grained sandstone	delta, lacustrine, marine
Kolenkalk		Zeeland	CLZL	limestone, dolomite intercalations of claystone, chert	marine
Banjaard		Bosscheveld	OBBS	grey and red mudstone sandstone and limestone	marine
		Bollen Claystone	OBGC	dark shaly mudstone intercalations of grey sandstone	
Siluur			OS	grey to black shales mudstones	deep-water basin

### 2.2.3.1. Schieland Groep (SL)

De Schieland Groep komt volgens de Stratigrafische Nomenclator op een tweetal solitaire plaatsen voor in de omgeving van het studiegebied. In 3 diepboringen in het CNB en de RVG/WNB worden sedimenten als behorende tot deze groep geïnterpreteerd. De groep wordt gevormd door grijze en bonte kleistenen en kleiige en steenkoolachtige zandstenen met inschakelingen van enkele steenkoollagen. De sedimenten werden afgezet in een paraliisch tot continentaal milieu. Ze komen niet voor op het PMC. In het CNB en RVG/WNB bereiken deze sedimenten een dikte tot 500°m. Deze sedimenten werden afgezet tijdens het Midden Jura tot Onder Krijt.

### 2.2.3.2. Altena Groep (AT)

Net als voor de Schieland Groep komen de sedimenten van de Altena Groep niet voor op het PMC. De fijnkorrelige kleistenen met soms inschakelingen van silt- en zandstenen werden in een open mariene omgeving afgezet. Ze komen voor in de diepere delen van het CNB en RVG/WNB rond het PMC waar een dikte tot 1175°m bereikt wordt. Deze afzettingen hebben een Boven Trias tot Onder Jura ouderdom.

### 2.2.3.3. Boven Germaanse Trias Groep (RN)

In de omgeving van het onderzoeksgebied wordt de Boven Germaanse Trias Groep vertegenwoordigd door de formaties van Keuper, Muschelkalk, Röt en Solling. Sedimenten van deze groep komen voornamelijk voor in het CNB en RVG/WNB rond het PMC. Aan de zuidwestelijke rand van het PMC werden ze aangetroffen in één boring (MSB-01) met een dikte van 205°m, maar verder komen ze niet voor op het PMC. Deze heterogene groep bestaat uit kleistenen, evaporieten, carbonaten en zandstenen afgezet in een ondiepe binnenzee en in overstromingsvlakten. In het CNB en RVG/WNB wordt een dikte waargenomen tot 485°m. De gesteenten werden afgezet tijdens het Onder Trias tot het Boven Trias.

### 2.2.3.4. Onder Germaanse Trias Groep (RB)

De sedimenten van de Onder Germaanse Trias Groep zijn afgezet in een lacustrien en fluviatiel milieu met lokaal eolische invloeden. In en rond het studiegebied is de groep opgebouwd uit de Hoofd-Bontzandsteen Subgroep en de Onder-Bontzandsteen Subgroep. Deze sedimenten bedekken de randen van het PMC en bereiken er een dikte tot 280°m. Centraal op het PMC zijn ze niet aanwezig. Rond het PMC in de aangrenzende gebieden van het CNB en RVG/WNB werden diktes tot 545°m waargenomen. Deze sedimenten hebben een Boven Perm tot Onder Trias ouderdom.

### 2.2.3.5. Hoofd-Bontzandsteen Subgroep (RBM)

Deze eenheid wordt gevormd door een afwisselende opeenvolging van grijze tot roodbruine zandstenen en siltige kleistenen. Vaak zijn deze anhydritisch en af en toe komen er oölitische kalksteenlagen voor. Van boven naar onder wordt de subgroep opgedeeld in de formaties van Hardeggen, Detfurth en Volpriehausen. De subgroep bereikt een dikte tot ongeveer 145°m op de randen van het PMC, waar ze enkel opgebouwd is uit de formaties van Detfurth en Volpriehausen. In het CNB en RVG/WNB langs de randen van het PMC komen de drie formaties voor en kan de dikte oplopen tot 235°m.

#### a. Formatie van Hardeggen (RBMH)

Dit pakket bestaat uit een afwisseling van witte tot roze zandstenen en rode kleistenen, afgezet in een lacustrien milieu. Langs de bekkenranden heeft de formatie een fluviatiel karakter. De formatie



werd enkel aangeboord in het RVG/WNB langs de zuidwestelijke rand van het PMC met een dikte tot 80°m.

**b. Formatie van Detfurth (RBMD)**

Deze formatie wordt gevormd door een lichtgekleurde kwartsrijke zandsteen en een roodbruine kleisteen, beide van fluviatiele oorsprong. Langs de bekkenrand wordt ze volledig opgebouwd door massieve zandstenen. Op de rand van het PMC bereikt de formatie een dikte van 60°m, in het RVG/WNB aan de zuidwestelijke rand van het PMC een dikte van ongeveer 65°m.

**c. Formatie van Volpriehausen (RBMV)**

Deze eenheid wordt gevormd door een opeenvolging van zandstenen, siltstenen en kleistenen, waarbij de zandstenen zich voornamelijk aan de bekkenranden bevinden en de siltstenen en kleistenen meer bekken inwaarts voorkomen. Daar krijgen ze een rode tot groene kleur. Deze sedimenten hebben een fluviatiele tot lacustriene origine. In het RVG/WNB langs de randen van het PMC kan de dikte van het pakket oplopen tot 160°m, op de randen van het PMC werd een dikte tot ongeveer 85°m waargenomen.

**2.2.3.6. Onder-Bontzandsteen Subgroep (RBS)**

De Onder-Bontzandsteen Subgroep bestaat uit roodbruine en groene tot grijze anhydritische kleistenen, siltstenen en zandstenen. Kalkhoudende oölitische lagen zijn ook aanwezig. De sedimenten zijn afgezet in een lacustrien milieu. Maar grove klastische afzettingen met conglomeraten van fluviatiele oorsprong komen ook voor. Op de randen van het PMC werden deze sedimenten waargenomen met een dikte tot 135°m. Daarbuiten in het CNB en RVG/WNB aan de randen met het PMC zijn diktes tot 355°m vastgesteld. Centraal op het PMC komt de subgroep niet voor. In de omgeving van het onderzoeksgebied wordt de subgroep vertegenwoordigd door de Rogenstein en Hoofd-Kleisteen formaties.

**a. Rogenstein Formatie (RBSR)**

Deze formatie bevat inschakelingen van tot 1°m dikke oölietlagen binnen de opeenvolging van zandstenen, siltstenen en kleistenen. Deze oölietlagen duiden op sedimentatie in een kustnabij ondiep water omgeving. Op de randen van het PMC werd deze formatie aangetroffen met een dikte tot 135°m. In het CNB en RVG/WNB zijn diktes vastgesteld tot 220°m.

**b. Hoofd-Kleisteen Formatie (RBSM)**

Zoals de naam aangeeft bestaat deze eenheid hoofdzakelijk uit kleisteen. Het gesteente heeft een roodbruine tot groene kleur, is siltig en soms anhydritisch. Enkele dunne zandsteenlagen en oölietlagen komen ook voor. Net als de vorige formatie is ook deze afgezet in een kustnabij ondiep water milieu. In het CNB en RVG/WNB langs de randen van het PMC komt de formatie voor met een dikte tot 200°m. Centraal op het PMC is ze afwezig. Enkel op de randen van het PMC wordt de formatie waargenomen met een dikte tot 95°m.

**2.2.3.7. Zechstein Groep (ZE)**

De Zechstein Groep bestaat uit een opeenvolging van evaporieten en carbonaten met enkele dunne inschakelingen van kleisteen. In het zuiden van het Perm Bekken is er een geleidelijke overgang naar siliciclastische sedimenten. Afzetting vond plaats in een peri-mariene tot mariene omgeving, waarin het sedimentatiebekken geleidelijk aan ondieper werd, om uiteindelijk te eindigen in een playa-meer afzettingsmilieu. Het studiegebied bevindt zich aan de bekkenrand. Centraal op het PMC is de

Zechstein Groep afwezig. Op de randen van het PMC werd het pakket aangeboord met een dikte van 20°m. Langs de randen van het PMC in het CNB en RVG/WNB werd de Zechstein Groep met een dikte tot 175°m waargenomen. In de omgeving van het onderzoeksgebied wordt de groep vertegenwoordigd door de Zechstein Boven-Kleistein, Z4 (Aller), Z3 (Leine), Z2 (Stassfurt) en Z1 (Werra) formaties. Deze sedimenten hebben een Boven Perm ouderdom.

### a. Zechstein Boven Kleistein Formatie (ZEUC)

Dit pakket bestaat uit bruine tot grijsgroene kleistenen met wat anhydriet en carbonaat. Dunne zandlagen komen voor in de top van de formatie. Al deze sedimenten werden afgezet onder playa-achtige omstandigheden. Op de rand van het PMC heeft deze formatie een dikte van ongeveer 10°m. Rond het PMC in het CNB en RVG/WNB bereikt de formatie een dikte van 20°m.

### b. Z4 (Aller) Formatie (ZEZ4)

Deze eenheid bestaat uit een opeenvolging van kleistein, anhydriet en zout. Langs de bekkenranden wordt een opeenvolging van kleistein en zandsteen aangetroffen. De sedimenten werden afgezet in een mariene omgeving. In het CNB en RVG/WNB rond het PMC werd de formatie met een dikte tot 25°m waargenomen. Op de randen van het PMC heeft het sediment een dikte van ongeveer 10°m.

### c. Z3 (Leine) Formatie (ZEZ3)

Net als de vorige eenheid bestaat deze uit een opeenvolging van kleistein, anhydriet en zout. De formatie wordt gekenmerkt door dikke magnesium en kalium zouten in het centrale deel van het bekken. Langs de bekkenranden wordt een opeenvolging van kleistein en zandsteen aangetroffen. De sedimenten werden afgezet in een mariene omgeving. In het CNB en RVG/WNB rond het PMC werd de formatie met een dikte tot ongeveer 35°m waargenomen. Op de randen van het PMC heeft het sediment een dikte van ongeveer 20°m.

### d. Z2 (Stassfurt) Formatie (ZEZ2)

Dit mariene pakket wordt gevormd door een opeenvolging van carbonaat, anhydriet, zout en anhydriet. Langs de bekkenranden wordt een opeenvolging van kleistein en zandsteen aangetroffen. Zowel in het CNB en RVG/WNB langs de randen van het PMC als op de randen van het PMC wordt deze formatie met een dikte tot ongeveer 28°m waargenomen.

### e. Z1 (Werra) Formatie (ZEZ1)

Deze mariene formatie start met een zwarte schalie gevolg door een opeenvolging van carbonaat, anhydriet, zout en anhydriet. Langs de bekkenranden is er een geleidelijke overgang naar een opeenvolging van carbonaat, schalie en/of zandsteen. In het CNB en RVG/WNB rond het PMC werd de formatie met een dikte tot ongeveer 120°m waargenomen. Op de randen van het PMC heeft het sediment een dikte van ongeveer 55°m.

#### 2.2.3.8. Boven Rotliegend Groep (RO)

De Boven Rotliegend Groep bestaat uit conglomeraten, kleistenen, evaporieten en rode zandstenen. Al deze sedimenten worden aanzien als afgezet in een woestijn / playa-meer systeem. De kleistenen en evaporieten zijn voornamelijk afgezet in het centrum van het bekken. Naar de bekkenranden toe gaat de sedimentatie over in zandafzetting en uiteindelijk in conglomeratafzetting. Op de randen van het PMC werd de groep aangeboord met een dikte van ongeveer 20°m. Rond het PMC in het CNB en RVG/WNB werd de eenheid met een dikte van 100°m waargenomen in diepboringen. Ter



hoogte van het onderzoeksgebied komt de Boven Rotliegend Groep voor onder de vorm van de Slochteren Formatie. De gesteenten werden afgezet van het Midden Perm tot het Laat Perm.

#### a. Slochteren Formatie (ROSL)

Deze eenheid wordt gevormd door een opeenvolging van rode tot bruine zandstenen en conglomeraten met enkele inschakelingen van kleistenen. De zandige sedimenten werden afgezet als eolische zandduinen en zandplaten of als fluviatiele geulopvullingen en vlakke afspoelingen. De kleiige sedimenten werden afgezet in meren, duinpanmeren en sabkhas. Op de randen van het PMC werd de formatie aangeboord met een dikte van ongeveer 20°m. Rond het PMC in het CNB en RVG/WNB werd de eenheid met een dikte van 100°m waargenomen in diepboringen.

#### 2.2.3.9. Onder Rotliegend Groep (RV)

Van deze groep werden geen sedimenten aangetroffen in het onderzoeksgebied en de onmiddellijke omgeving.

#### 2.2.3.10. Limburg Groep (DC)

De Limburg Groep bestaat uit een opeenvolging van grijze tot zwarte fijnkorrelige siliciclastische afzettingen met inschakelingen van steenkoollagen in het middelste en bovenste deel. In het onderste deel komen geen steenkoollagen voor, maar zijn er wel massieve zandstenen aanwezig. In het onderste en in mindere mate in het middelste deel van de groep komen inschakelingen van fossielhoudende mariene lagen voor. Inschakelingen van vulkanische tuflagen zijn dan weer voornamelijk aanwezig in het bovenste deel. De groep komt voor over het ganse studiegebied en de onmiddellijke omgeving, maar werd nergens volledig doorboord. Enkel de top van de groep werd er in enkele diepboringen aangetroffen tot een dikte van ongeveer 750°m. In de dichtstbijzijnde diepboring waar de groep volledig doorboord werd (WSK-01) bedraagt de dikte ongeveer 2985°m. De top werd er aangeboord op 1289°m diepte. Ter hoogte van het bestudeerde gebied wordt de groep vertegenwoordigd door de Caumer Subgroep en de Geul Subgroep. De jongere Hunze en Dinkel subgroepen komen niet voor in of nabij het onderzoeksgebied. De Caumer Subgroep komt ongeveer overeen met de sedimenten afgezet tijdens het Westfaliaan en de Geul Subgroep ongeveer met de sedimenten afgezet tijdens het Namuriaan.

#### 2.2.3.11. Caumer Subgroep (DCC)

Deze eenheid bestaat uit een cyclische opeenvolging van fijnkorrelig siliciclastische afzettingen (kleisteen, siltsteen en kleiige zandstenen) met inschakelingen van steenkoollagen. De sedimenten werden hoofdzakelijk afgezet in een deltaïsche en fluviatiele omgeving in een lacustrien bekken, waarin zich enkele mariene incursies voordeden. Hierbij werden fossielhoudende donkergrijze kleistenen afgezet. Het bovenste deel van de subgroep wordt gekenmerkt door het voorkomen van dunne vulkanische tuflagen. De Caumer Subgroep komt voor in gans het studiegebied en de onmiddellijke omgeving. In geen van de onderzochte diepboringen werd de basis van de eenheid evenwel doorboord. In de dichtstbijzijnde diepboring in het CNB bereikt de Caumer Subgroep een dikte van 1070°m (WSK-01). Het bovenste deel van de eenheid ontbreekt er echter. In het onderzochte gebied werd de top van de eenheid aangeboord op een diepte van 1119°m over een lengte van ongeveer 160°m (NVG-01). In het studiegebied wordt de subgroep opgedeeld in de Maurits, Ruurlo en Baarlo formaties. Deze formaties verschillen van elkaar in de hoeveelheid koollagen die aanwezig zijn, in het aantal mariene en/of vulkanische lagen die voorkomen en in het aantal inschakelingen van zandstenen.

### a. Maurits Formatie (DCCU)

Deze formatie wordt gevormd door een opeenvolging van grijze kleistenen en met veel inschakelingen van steenkoollagen en soms van kleiige zandstenen. Deze sedimenten werden voornamelijk afgezet in een lacustriene omgeving met soms moerassige en fluviatiele omstandigheden. De aanwezigheid van kleisteen inschakelingen met brakwater fossielen geven aan dat er zich soms ook mariene invloeden lieten gelden. In het studiegebied werd de formatie aangeboord over een lengte van ongeveer 160°m (NVG-01). In het CNB werd de formatie over een dikte van ongeveer 10°m waargenomen (BKH-01). In beide gevallen wordt de formatie afgesneden door sedimenten van de Boven Rotliegend Groep. Nergens in de omgeving werd ze evenwel volledig doorboord. In de andere diepboringen in de omgeving werd de formatie niet aangetroffen en werden onmiddellijk onder de Boven Rotliegend Groep oudere formaties van de Caumer Subgroep aangetroffen.

### b. Ruurlo Formatie (DCCR)

Deze eenheid bestaat uit grijze tot zwarte siltige kleistenen met schakelingen van steenkoollagen en kleiige of siltige zandsteenlagen. De sedimenten werden afgezet onder deltaïsche en fluviatiele omstandigheden in een opvallend lacustrien bekken met zeldzame mariene incursies. De formatie werd aangeboord in de onmiddellijke nabijheid van het studiegebied over een dikte van ongeveer 90°m (MSB-02). Ze komt er onmiddellijk onder de sedimenten van de Rijnland Groep voor. Verder oostwaarts in het CNB werd ze onder de Boven Rotliegend Groep met een dikte van 575°m waargenomen (WSK-01). In beide gevallen werd de basis van de formatie doorboord.

### c. Baarlo Formatie (DCCB)

De Baarlo Formatie bestaat uit een cyclische opeenvolging van bruingrijze tot zwarte kleistenen die overgaan in siltstenen en fijne zandstenen. Steenkoollagen komen enkel voor in het bovenste deel van de cycli. In het studiegebied en de onmiddellijke omgeving bestaan sommige inschakelingen van zandsteen uit grofkorrelig tot zelfs conglomeratisch materiaal. De sedimenten werden afgezet in een deltaïsche milieu onder afwisselend meer fluviatiele of meer mariene omstandigheden. De steenkoollagen ontstonden in de moerassen van de deltavlake. In het onderzoeksgebied en de onmiddellijke omgeving werd de formatie over een dikte van 145°m waargenomen (MSB-02). De basis werd evenwel niet bereikt. Meer oostwaarts in het CNB werd ze met een volledige dikte van ongeveer 495°m aangeboord (WSK-01).

#### 2.2.3.12. Geul Subgroep (DCG)

Dit pakket wordt gevormd door een cyclische opeenvolging van fijnkorrelige siliciclastische gesteenten (kleiige zandstenen en fijne tot middelmatige zandstenen), maar ditmaal zonder steenkoollagen. Inschakelingen van kleiige siltstenen komen geregeld voor. De sedimenten werden afgezet in een deltaïsche omgeving in een lacustrien bekken met meerdere mariene incursies. De eenheid komt voor over het ganse onderzoeksgebied en de onmiddellijke omgeving, maar werd er nergens aangeboord. De dichtstbijzijnde boring in het CNB geeft een dikte van ongeveer 1915°m aan (WSK-01). De Geul Subgroep wordt er gevormd door de Epen Formatie.

### a. Epen Formatie (DCGE)

Deze formatie bestaat uit een cyclische opeenvolging van grijze en zwarte kleistenen met inschakelingen van grijze zandstenen. Verspreid komt er kalkhoudend materiaal voor. Schalieachtige kleistenen met mariene fossielen komen voor aan de basis en in het midden van elke cyclus. In de top van de formatie komen lokaal dikke massieve zandstenen voor. Deze behoren tot het Ubachsberg Lid. Aan de basis van de formatie komen bitumineuze zwarte schalieachtige kleistenen



voor met inschakelingen van siltsteen en fijne zandsteen. Deze sedimenten worden gegroepeerd in het Geverik Lid. Onderaan wordt dit lid gevormd door verkiezelde grijze en zwarte klakstenen. Binnen het studiegebied werd de formatie niet waargenomen. Verder oostwaarts werd ze op een diepte van 2358°m aangeboord met een dikte van 1915°m (WSK-01).

#### 2.2.3.13. Kolenkalk Groep (CL)

Deze lithostratigrafische eenheid wordt gevormd door grijze tot zwarte en bruine carbonaten (kalksteen en dolomiet). Inschakelingen van kleisteenlagen en vuursteenlagen komen voor. Deze mariene sedimenten werden afgezet op een carbonaatplatform en diens bekkenwaartse helling. Hoewel de Kolenkalk Groep nergens werd aangeboord in het studiegebied en de onmiddellijke omgeving ervan, wordt verondersteld dat deze er aanwezig is. Ten oosten van het onderzoeksgebied werd de groep waargenomen over een dikte van ongeveer 185°m (WSK-01). De groep wordt hier vertegenwoordigd door de Zeeland Formatie.

##### a. Zeeland Formatie (CLZL)

Deze eenheid omvat een opeenvolging van grijze tot zwarte kalkstenen en grijze tot bruine dolomieten met inschakelingen van kleistenen en chertlagen. Deze mariene sedimenten vormen een carbonaatplatform. Plaatselijk komen er sabkha-achtige afzettingen voor. De formatie werd niet aangeboord in het studiegebied, maar werd wel meer oostwaarts met een dikte van ongeveer 185°m waargenomen (WSK-01). De top werd er aangeboord op 4275°m diepte. Ook in het zuiden op het PMC werd de formatie waargenomen in de CAL-GT diepboringen over een gemiddelde dikte van ongeveer 450°m en op een gemiddelde diepte rond 1580°m onder maaiveld.

#### 2.2.3.14. Banjaard Groep (OB)

Deze groep omvat de mariene sedimenten afgezet gedurende het Devoon en vroege Onder-Carboon. Ze bestaat uit kleistenen, zandstenen en in mindere mate carbonaten. In het bestudeerde gebied en de onmiddellijke omgeving werden de sedimenten van deze groep (nog) niet aangeboord. Desondanks wordt verondersteld dat ze voorkomen in het gebied. Meer oostwaarts in het CNB werd de top van de groep aangeboord op 4461°m diepte (WSK-01). De groep werd er waargenomen over een dikte van ongeveer 550°m. Ook in het zuiden op het PMC werd de Banjaard Groep in de CAL-GT diepboringen aangeboord over een dikte van meer dan 1000°m. De basis werd nooit aangeboord. De groep wordt opgedeeld in de Bosscheveld en Bollen Kleisteen formaties.

##### a. Bosscheveld Formatie (OBBS)

Deze formatie omvat de sedimenten afgezet tijdens het Famenniaan tot vroeg Onder-Tournaisiaan. Ze bestaat uit een afwisseling van grijze en lokaal rode (kalkhoudende) kleistenen, zandstenen en (knollige) kalkstenen. Deze sedimenten werden afgezet in een ondiep mariene omgeving. Ze zijn (nog) niet aangeboord in het studiegebied. Meer oostelijk in het CNB werden ze onder de Kolenkalk Groep aangetroffen met een dikte van ongeveer 50°m (WSK-01). Deze formatie werd ook aangeboord in de CAL-GT diepboringen met een dikte van meer dan 1000°m op een diepte van ongeveer 1450°m en 2000°m onder maaiveld.

##### b. Bollen Kleisteen Formatie (OBGC)

Deze formatie bevat de sedimenten afgezet tijdens het Boven-Devoon. Ze wordt gevormd door zwarte schalie-achtige kleisteen met inschakelingen van grijze zandsteen. Lokaal zijn deze mariene sedimenten kalkhoudend of dolomitisch van aard. Ze werden afgezet op het continentaal plat. Net als in het geval van de vorige formatie zijn ze (nog) niet aangeboord in het studiegebied. Meer

oostelijk in het CNB werden ze aangetroffen op een diepte van 4510°m met een dikte van ongeveer 135°m (WSK-01).

### 2.2.3.15. Siluur (OS)

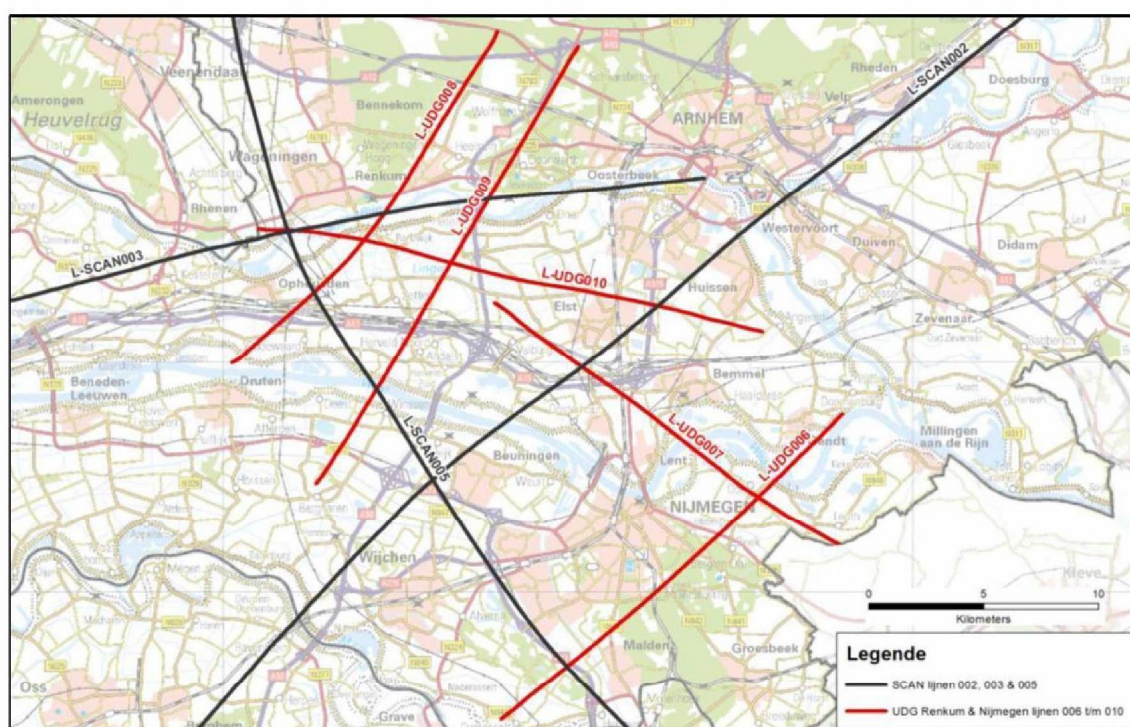
Gesteenten van Siluur ouderdom werden (nog) niet aangeboord in de omgeving van het studiegebied. Desondanks worden ze verondersteld aanwezig te zijn onder de sedimenten van de Banjaard Groep. Op basis van enkele mogelijke waarnemingen in Nederland wordt er aangenomen dat ze bestaan uit grijze en zwarte kleistenen. Het turbidietfacies wijst op afzetting in een diep water voorlandbekken. Gelijkaardige gesteenten vormen in België de buitenste rand van het Londen Brabant Massief (LBM), waarvan de kern is opgebouwd uit gesteenten van Ordovicium en Cambrium ouderdom.



## HOOFDSTUK 3. NIEUWE SEISMISCHE SURVEYS

## 3.1. ALGEMEEN

Als onderdeel van SCAN en het UDG onderzoeksprogramma wordt in verschillende provincies in Nederland bijkomende seismische exploratie uitgevoerd. De exploratie heeft tot doel om data te verzamelen over diepe geologische formaties in gebieden waar tot nu toe weinig of geen gegevens zijn verzameld, of niet van voldoende kwaliteit. De seismische exploratie wordt uitgevoerd door EBN, dat de opdracht voor de acquisitie in het veld heeft aanbesteed aan Rossingh Drilling & Geophysics. De regionale exploratie (campagne L2EBN2019A) gaat samen met lokale exploratie rond projecten in het kader van UDG (campagne L2EBN2020B), in dit geval rond de locaties van Renkum en Nijmegen (Figuur 4).



Figuur 4: Kaart met ligging van de nieuwe seismische lijnen in het gebied van Renkum en Nijmegen in het kader van het SCAN en UDG programma.

## 3.1.1. ACQUISITIE

Tussen september 2019 en februari 2020 werden in het gebied acht seismische lijnen geschoten met een gezamenlijke lengte van 290,29 km. Hiervan maken er drie deel uit van het SCAN programma (campagne L2EBN2019A: lijnen 002, 003 en 005) en zijn er vijf specifiek geschoten rond Renkum en Nijmegen (campagne L2EBN2020B: lijnen BURKM006 t/m 010). Lijnen BURKM006 en BURKM007 liggen in de omgeving van Nijmegen en hebben een gezamenlijke lengte van 38,25 km. Lijnen BURKM008 t/m BURKM010 zijn gelegen in het gebied rondom Renkum, hun totale lengte bedraagt 63,21 km.

De trajecten van de lijnen werden bepaald door VITO (Laenen, 2018) in samenspraak met EBN en Tellus Renkum/Tellus Nijmegen. Tussen 2018 en de start van de veldwerken werden de trajecten verder aangepast. De lokale seismische survey (Nijmegen en Renkum) en de exploratie binnen SCAN werden op elkaar afgestemd. Hierdoor bleven er 5 lijnen over, specifiek voor Nijmegen en Renkum. De finale trajecten werden eind 2019 en begin 2020 bepaald door EBN en de aannemer op basis van de condities in het veld, toestemmingen voor het betreden van terreinen, en beperkingen wat betreft infrastructuur en veiligheidsafstanden. De finale posities van de CDP lijnen en van de schotpunten is weergegeven op onderstaande kaarten (Figuur 5 en Figuur 6).

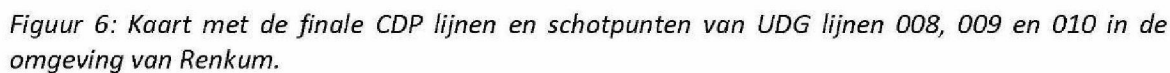
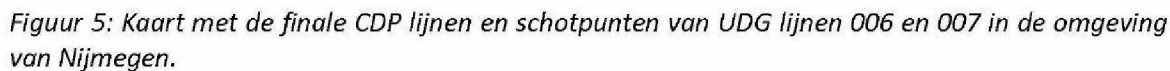
*Tabel 5: Overzicht van de UDG nabij Nijmegen en Renkum, met hun lengte, het effectief aantal schotpunten en het aantal meetpunten.*

Lijn	Lengte (km)	# SP's	# RP's
<b>BURKM006</b>	19,97	293	3857
<b>BURKM007</b>	18,28	254	3663
<b>BURKM008</b>	18,62	287	3474
<b>BURKM009</b>	22,14	323	4208
<b>BURKM010</b>	22,45	336	4330
<b>Totaal</b>	<b>101,46</b>	<b>1493</b>	<b>19532</b>

*Tabel 6: Acquisitieparameters voor lijnen BURKM006 t/m BURKM 010 (campagne L2EBN2020B).*

SP spacing	60 m
RP spacing	5 m
Max # live channels	2800
Min offset	2,5 m
Max offset	6997,5 m
Nominal fold	116,67
Receiver type & model	GCL Connectorless GCL-1 SEG
Natural frequency	5 Hz
# receivers per station	1
Polarity	SEG Normal (America): impedance increase = positive number Final data are in European polarity
Source type	Explosive
Charge depth	Variabel (4-26 m)
Charge weight	Variabel (0,24-1,56 kg)
Spread type	Symmetrical split-spread
Shooting method	Roll on – Roll off
Sample rate	2 ms
Record length	10000 ms







## 3.1.2. PROCESSING

De verwerking of processing van de data werd verzorgd door DUG. Een eerste versie van de lijnen was beschikbaar in maart 2020 (*fasttrack*). Nadien werd een gedetailleerde processing doorgevoerd, waarbij de finale resultaten beschikbaar waren in augustus 2020. Het processing rapport van DUG (DUG, 2020) geeft een overzicht van de processing stappen, de uitdagingen en de details van de verschillende stadia van dataverwerking. De verschillende stappen in de finale processing zijn overgenomen van DUG (2020) en zijn hieronder weergegeven.

De spatiëring van 5 m tussen de geofoons heeft geleid tot een hoge resolutie. Daarnaast resulteerde het gebruik van dynamiet als bron en de ruimere diepte van de schotgaten in een goed frequentiebereik van het signaal, met ook weinig ruis afkomstig van de bron zelf. Het wegfilteren van ruis met oog voor de integriteit van de data vormde een aanzienlijk onderdeel van de processing. Op sommige locaties (bv. lijn BURKM006) zorgde de aanwezigheid van glaciale afzettingen voor een mindere penetratie van het signaal in de ondergrond, wat leidde tot een lokaal mindere kwaliteit van de lijnen.

Tabel 7: Overzicht van de verschillende stappen tijdens de gedetailleerde processing door DUG (2020).

# Stap	Omschrijving
1	Data reformat from SEG Y to internal format
2	Applied crooked line geometry
3	SEG Y: Raw shots
4	Spherical divergence correction
5	Geophone response correction
6	Refraction static computation and application using delay-time solution <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_0=1000</math> m/s</li> <li>• <math>V_R=1700</math> m/s</li> <li>• <math>SRD=NAP</math></li> </ul>
7	Noise attenuation: +/-1250 m/s Weiner dip filter
8	Edits: Drop hydrophones (only present on SCAN004, kill invalid shots)
9	Edits: Only keep traces with offset < 500 m for weak shots
10	Noise attenuation: Despiking
11	Noise attenuation: Wavelet (D20) transform filter
12	1st pass surface consistent amplitude compensation: Source and receiver components
13	Noise attenuation: TFDN
14	Inverse Q: $Q=100$ phase and amplitude using 40 Hz reference frequency and 12 dB gain stabilisation
15	Surface consistent deconvolution: Source and receiver <ul style="list-style-type: none"> <li>• 160 ms operator length</li> <li>• 16 ms predictive gap</li> <li>• 0.1% white noise stabilisation</li> <li>• Design window: 200-3000 ms</li> </ul>
16	1st pass velocity analysis: 1 km interval manual picks
17	Noise attenuation: 1.75 ms/tr (2857 m/s) dip filter
18	Noise attenuation: Wavelet transform filter on shots
19	Noise attenuation: Wavelet transform filter on shots with NMO applied
20	Noise attenuation: Cadzow on shots with NMO applied
21	1st pass residual statics pass 1: Surface consistent MASTT algorithm applying source and receiver terms
22	2nd pass surface consistent amplitude compensation: Source and receiver components
23	2nd pass velocity analysis: 1 km interval picked velocities



24	2nd pass residual statics pass 2: Surface consistent MASTT algorithm applying source and receiver terms
25	Spherical divergence removed: T
26	Migration (PreSTM1): Isotropic 4th order curved-ray Kirchhoff using smoothed stacking velocities
27	Velocity analysis: 500 m manually picked 2nd order velocities with automatic Eta picking every 250 m
28	Migration (PreSTM2): Anisotropic VTI Kirchhoff using re-picked 2nd order velocities and autopicked Eta
29	Time-tomography: Automatic non-parabolic RMO picking every 250 m followed by timetomography to update velocity and Eta. Time-tomography velocity and Eta were smoothed using a 2 km along line smoother
30	Low cut filter: 2.5 Hz with 18 dB/octave slope
31	SEG-Y: Migration input CDPs (on floating datum with conversion to zero phase)
32	SEG-Y: Migration input stack (on floating datum with conversion to zero phase, stacked using 1/N stack normalisation)
33	AGC products only: 2000 ms AGC
34	Migration (PreSTM3): Anisotropic VTI Kirchhoff using re-picked 2nd order velocities <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-picked Eta</li> <li>• 60 m offset bins to 6990 m</li> <li>• 3 km aperture length</li> <li>• Time-variant dip: 30° dip at 0 ms, 30° dip at 1250 ms, 45° dip at 2500 ms</li> <li>• Anti-alias constant = 2</li> </ul>
35	SEG-Y: Migration output CDPs (on final datum with conversion to zero phase)
36	SEG-Y: Raw stacks (on final datum with conversion to zero phase, stacked using 1/N stack normalisation)
37	Demultiple: Radon domain (801 P-traces from -1000 – 7000) with subtraction using a polygon
38	Noise attenuation: Weiner dip filter with signal protection
39	Trim statics: 12 ms maximum shif, smoothed field
40	Conversion to zero phase: Application of statistically derived filter operator
41	Noise attenuation: CDP-offset Cadzow rank-reduction random noise attenuation
42	Noise attenuation: Common offset dip filter
43	Drop offsets not input to migration
44	Mute: Offset domain manually picked inside and outside trace mutes
45	Conversion to zero phase: statistical. Trough polarity
46	SEG-Y: Final CDPs (on final datum with conversion to zero phase)
47	AGC products only: 2000 ms AGC
48	Stack: 1/N for true amplitude stacks (1/VN for AGC stacks)
49	SEG-Y: Processed stacks (on final datum with conversion to zero phase)
50	Spectral broadening
51	Noise attenuation: 2 window Weiner dip filter
52	Noise attenuation: Cadzow rank-reduction noise attenuation
53	Noise attenuation: Structurally Oriented Filter (SOF)
54	Time-variant frequency domain filter <ul style="list-style-type: none"> <li>• Time (ms): 0-750 1250-2500 3500-10000</li> <li>• Frequency (Hz): 6-8-100-190 6-12-90-110 6-12-35-55</li> </ul>
55	AGC products only: Dual gate 2000/500 ms AGC)
56	True amplitude products only: Bulk line scalar
57	Final datum shif
58	SEG-Y: Final stack (true amplitude and AGC products supplied)

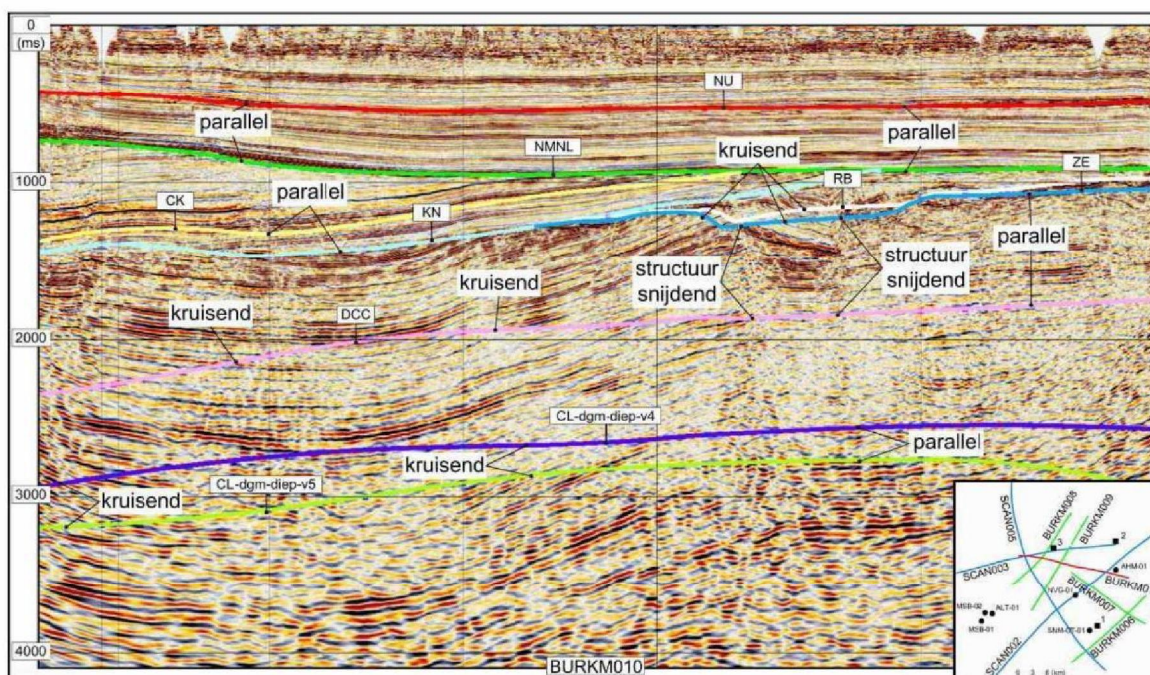


### 3.2. SANITY CHECK

Vooreerst werd er een “sanity check” uitgevoerd. Hierbij werd er nagegaan in hoeverre de nieuwe seismische secties het bestaand beeld van de ondergrond, zoals vastgelegd in de modellen van de diepe ondergrond (dgm diep v4 en dgm diep v5), bevestigden of tegenspraken. Hiervoor werd op het traject van elke nieuwe seismische lijn de interpretatie in TWT uit de bestaande modellen geëxtraheerd. De seismische lijnen en de TWT model-interpretaties werden ingelezen in het software-pakket OpendTect en met elkaar vergeleken.

Algemeen kon hieruit geconcludeerd worden dat:

- er een goede overeenstemming bestaat tussen de bestaande TWT-model interpretaties en het beeld op de nieuwe seismische lijnen voor de gemodelleerde basisvlakken vanaf het maaiveld tot de basis van de Rijnland Groep (NU, NMNL, CK en KN)
- de globale structuur van de dieper liggende gemodelleerde basisvlakken (RB, ZE en RO) door het beeld op de nieuwe seismische lijnen bevestigd wordt, maar dat er lokaal afwijkingen vastgesteld worden
- de opbouw van de Carboon lagen (DCC, DCG en CL) zoals vastgelegd in de bestaande regionale modellen niet bevestigd kon worden aan de hand van de nieuwe seismische lijnen



Figuur 7: Vergelijking tussen de modellagen van dgm diep v5 en de reflectoren op lijn BURKM010 van de L2EBN2020B seismische survey.

Voor de Carboon lagen werden volgende vaststellingen gedaan:

- lokaal is er een overeenstemming tussen modellagen en reflectoren
- lokaal wisselen modellagen tussen reflectoren
- elders kruisen gemodelleerde horizonten en reflectoren elkaar
- modellagen doorsnijden structuren (breuk, horst, graben, ...) herkenbaar op de nieuwe seismische lijnen



Deze vaststellingen geven aan dat het bestaand regionaal kader:

- voldoet voor het opstellen van een lokaal geologisch 3D model voor de lithostratigrafische eenheden tot en met de Rijnland Groep (NU, NMNL, CK en KN).
- lokaal dient aangepast te worden voor de lithostratigrafische eenheden tussen de Rijnland Groep en de Boven Rotliegend Groep (RB, ZE en RO).
- niet voldoet om een lokaal geologisch 3D model op aan te sluiten voor wat de diepere lithostratigrafische eenheden onder de Rotliegend Groep betreft (DCC, DCG, CL).

### 3.3. INTERPRETATIE

De lijnen van de nieuwe seismische surveys werden lithostratigrafisch en structureel geologisch geïnterpreteerd. De lithostratigrafische interpretatie wordt in de volgende paragrafen besproken. De structurele interpretatie komt aan bod in het volgende hoofdstuk.

#### 3.3.1. GEÏNTERPRETEERDE LITHOSTRATIGRAFISCHE HORIZONTEN

Voor het opstellen van een consistent lokaal geologisch 3D model werd er getracht de volgende lithostratigrafische horizonten op de nieuwe seismische secties in te tekenen:

- de basis van de Boven Noordzee Groep (NU, rood op figuur 5)
- de basis van de Midden en Onder Noordzee Groep (Noordzee Supergroep) (NMNL of N, groen op figuur 5)
- de basis van de Krijtkalk Groep (CK, geel op figuur 5)
- de basis van de Rijnland Groep (KN, lichtblauw op figuur 5)
- de basis van de Onder Germaanse Trias Groep (RB, wit op figuur 5)
- de basis van de Zechstein Groep (ZE, blauw op figuur 5)
- de basis van de Boven Rotliegend Groep (RO, niet geïnterpreteerd)
- de basis van de Caumer Subgroep (DCC, roze op figuur 5)
- de basis van de Geul Subgroep (Limburg Groep) (DCG of DC, drie opties: wit, donkerblauw en geelgroen op figuur 5)

Andere lithostratigrafische eenheden op Groep of Subgroep niveau (SK, SG, SL, AT, RN en RV) komen niet voor binnen het onderzoeksgebied of werden er alleszins niet herkend.

De basis van de Boven Noordzee Groep (NU) werd niet geïnterpreteerd. Voor het opstellen van het lokaal geologisch 3D model werd voor deze horizont gebruik gemaakt van de bestaande interpretatie uit het dgm diep v5. De positie van deze TWT model-laag werd vanop de bestaande seismische lijnen binnen het studiegebied via kruisingen naar de nieuwe seismische lijnen overgebracht. Hieruit kwam naar voor dat de TWT-interpretatie uit het dgm diep v5 nagenoeg volledig overeenkwam met de gewenste reflector voor de basis van de Boven Noordzee Groep op de lijnen van de nieuwe seismische surveys.

De basis van de Boven Rotliegend Groep (RO) werd uiteindelijk evenmin geïnterpreteerd. De dikte van deze lithostratigrafische eenheid is zo klein ( $>20^{\circ}\text{m}$  in NVG-01 of ongeveer  $12^{\circ}\text{ms}$ ), dat ze niet te onderscheiden valt van de reflector die de basis van de bovenliggende Zechstein Groep uitmaakt.

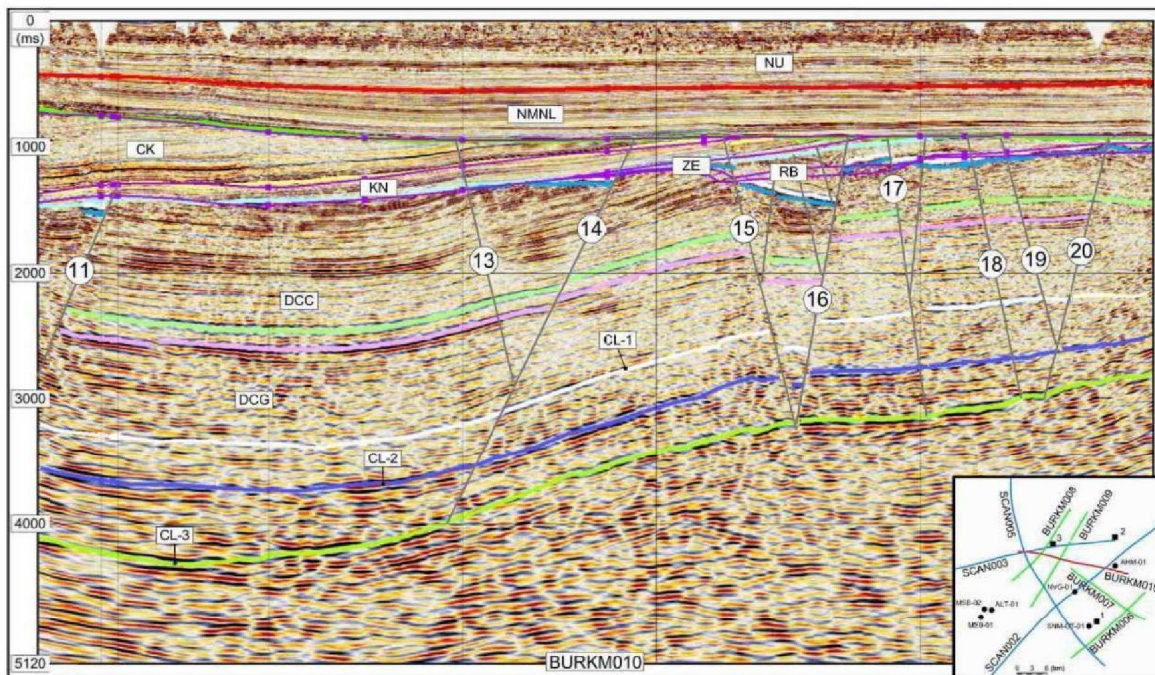
Naast de verschillende voornoemde horizonten werden op de seismische secties ook reflectoren ingetekend die geen onmiddellijke lithostratigrafische betekenis hebben. Deze reflectoren zijn meestal niet dezelfde op verschillende seismische secties en zijn meestal ook niet continu vervolgbaar over één welbepaalde sectie. Ze doen dienst om de algemene structureel geologische opbouw op de seismische secties te visualiseren.



## 3.3.2. WIJZE VAN INTERPRETATIE

Bij de interpretatie van de verschillende horizonten werd er met volgende punten rekening gehouden:

- er werd aangesloten op de interpretatie van de verschillende horizonten uit dgm diep v5 op de bestaande seismiek in de omgeving van het onderzoeksgebied. De achterliggende redenering hierbij is dat de bestaande interpretatie steunt op de kennis van en de ervaring met de regionale lithologische en geologische kenmerken van de verschillende onderscheiden pakketten in de omgeving. De keuze van het gebruik van een “hard kick” of “soft kick” voor een welbepaalde horizont steunt bijgevolg in eerste instantie op de interpretatie van de bestaande seismiek uit het dgm diep v5.
- herkenbare discordanties werden gevolgd. Hierbij werd er gezocht naar reflectoren die enerzijds het best overeenkwamen met deze discordanties en anderzijds het best te volgen waren over de verschillende (nieuwe en oude) seismische secties. Hieruit volgt dat voor sommige discordante horizonten niet consequent een “hard kick” of “soft kick” kan gebruikt worden, aangezien de akoestische contrasten variëren al naar gelang de verschillen in lithologische opeenvolging langs de discordantie.



Figuur 8: Interpretatie van seismische sectie BURKM010, met in het paars de interpretatie uit dgm diep v5 voor de lithostratigrafische eenheden boven de top van de Limburg Groep (nummering van de breuken, zie hoofdstuk 8).

- in geval van concordante lagen werden seismisch herkenbare pakketten geïdentificeerd. Er werd gezocht naar herkenbare opeenvolgingen van seismisch transparante zones en zones met duidelijk reflectoren of naar een set reflectoren die zich steeds in eenzelfde volgorde en met eenzelfde uitzicht voordeden. Hierbij werd op de grens tussen deze zones een “duidelijke” reflector gevolgd, herkenbaar op verschillende seismische secties, en werd er abstractie gemaakt van het “hard kick/soft kick” concept.
- voor de basis van de Caumer Subgroep (DCC) en de top van de Kolenkalk Groep (CL) werd er voor een “hard kick” optie gekozen, gebaseerd op de bestaande interpretaties in het Maasbommel, Bronkhorst en Venlo (Californië) gebied. Hierbij is de achterliggende



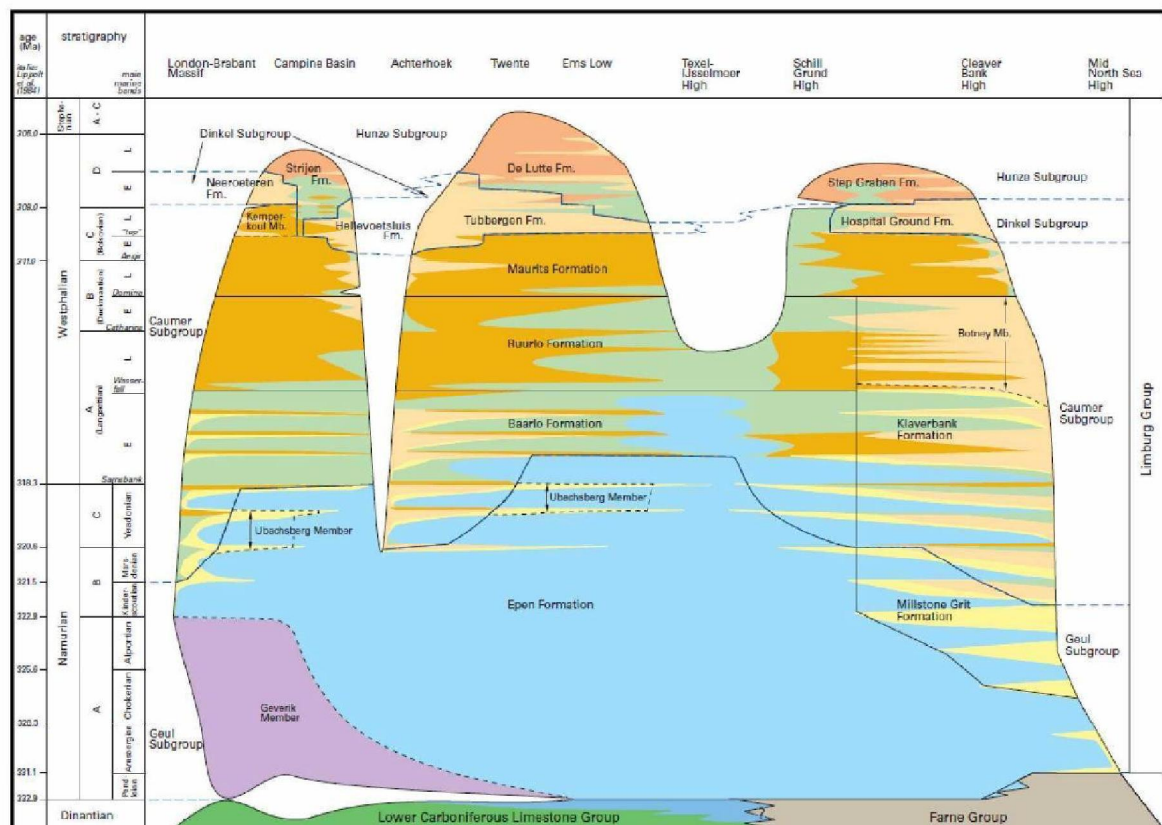
redenering dat het gebied rond diepboringen MSB-02, BKH-01 en CAL-GT-01 een degelijke 2D en 3D seismische bedekking heeft en dat daar bijgevolg een goede seismostratigrafische controle bestaat.

### 3.3.3. INTERPRETATIE LIMBURG GROEP (DC) EN KOLENKALK GROEP (CL)

Uit de *sanity check* komt naar voor dat de regionale geologische opbouw uit de bestaande modellen in TWT (dgm diep v4 en dgm diep v5) voor de “ondiepe” lagen (NU, NMNL, CK, RN, RB, ZE en RO) bevestigd wordt door het beeld op de lijnen van de nieuwe seismische surveys. Voor de “diepe” lagen wordt er evenwel geen goede overeenkomst vastgesteld binnen het studiegebied en de nabije omgeving. De geologische opbouw voorgesteld door de bestaande modellen kan dus bezwaarlijk gebruikt worden als vertrekpunt voor de seismostratigrafische interpretatie van de basis van de Caumer Subgroep en de top van de Kolenkalk Groep.

Onder het topvlak van de Limburg Groep werden verschillende reflectoren getraceerd:

- een set reflectoren rond de vermoedelijke positie van de basis van de Caumer Subgroep
- een drietal reflectoren die mogelijk kandidaat zijn voor de top van de Kolenkalk Groep
- een discontinue reflector tussen beide



Figuur 9: De opbouw van de Limburg Groep, met de situering van de Caumer en Geul subgroepen en hun respectievelijke formaties en leden, waaronder het Lid van Ubachsberg aan de top van de Epen Formatie (<https://www.dinoloket.nl/>).

Ter hoogte van de vermoedelijke positie van de basis van de Caumer Subgroep werd een set van een vijf- tot zestal “hard kick” reflectoren ingetekend. De bovenste (lichtgroen op figuur 5), de derde (roze op figuur 5) en de onderste reflectoren worden aan de bovenzijde afgeboord door een

duidelijke “soft kick” reflector. De drie bovenste reflectoren komen meestal voor op alle nieuwe seismische secties en worden waargenomen over de volledige lengte van de seismische lijnen, zij het niet altijd op een continue manier. Tussen de bovenste en de tweede reflector komt een eerder transparante zone voor. Onder de tweede reflector (die soms minder duidelijk aanwezig is) volgt een dik gebande zone met een opeenvolging van vier “hard kick” reflectoren. Hiervan wordt verondersteld dat ze massieve zandsteenbanken voorstellen nabij de top van de Epen Formatie (Ubachsberg Lid) en dat ze bijgevolg reeds tot de Geul Subgroep behoren. De drie onderste reflectoren zijn niet steeds even duidelijk zichtbaar en komen op een eerder discontinue manier voor. Deze set van reflectoren scheidt een bovenliggend seismisch pakket bestaande uit eerder fijn gebande zones van een onderliggend seismisch pakket dat meer transparant is of een eerder chaotische indruk geeft. In het bovenste seismisch pakket worden de gebande zones lokaal afgewisseld met een meer transparante zone en worden de reflectoren in de gebande zones dunner naar boven toe. Het onderste seismische pakket, gelegen tussen de onderste reflector van de hierboven beschreven set en de dieper gelegen kandidaat-reflectoren voor de top van de Kolenkalk Groep, bevat binnen de meer chaotische zone nog één eerder discontinue “soft kick” reflector zowel bovenaan als onderaan afgeboord door een “hard kick” reflector. Lokaal komen er binnen de chaotische zone evenwel meerdere reflectoren van die aard voor, zodat er niet met zekerheid kan gezegd worden dat steeds dezelfde getraceerd werd.

Onder de voorgaande zone komen drie “hard kick” reflectoren voor die bovenaan en onderaan omgeven worden door “soft kick” reflectoren. Elk van deze “hard kick” reflectoren is kandidaat voor correlatie met de top van de Kolenklak Groep. De bovenste is de minst duidelijke en minst continue volgbare reflector en wordt hier aangeduid als optie 1 (wit op figuur 5). Lokaal komen er enkele zeer discontinue reflectoren voor bovenaan optie 1. Tussen optie 1 en optie 2 (donkerblauw op figuur 5) komt er een gelijkaardig chaotische zone voor als boven optie 1. Ze lijkt echter iets meer gestructureerd en lokaal meer geband. Net boven optie 2 komen geregeld nog een tweetal goed volgbare reflectoren voor. Onder optie 2 komt een discontinue gebande zone voor die onderaan afgeboord wordt door een reflector, hier als optie 3 (geelgroen op figuur 5) aangeduid. Deze reflector is divergerend ten opzichte van optie 2, waarbij beide verder uit elkaar gaan met toename in diepte. Zowel bovenaan als onderaan komen convergerende reflectoren voor die toelopen op reflector optie 3. Lokaal lijkt dit ook soms het geval onderaan reflector optie 2.

Uit deze verschillende getraceerde reflectoren dient een keuze gemaakt te worden met betrekking tot welke de basis van de Caumer Subgroep voorstelt en welke de top van de Kolenkalk Groep. Hiervoor dient er een lithostratigrafische koppeling gemaakt te worden met diepboringen waarin de gesteenten van deze eenheden aangeboord werden.

### 3.4. LITHOSTRATIGRAFISCHE KOPPELING

De reflectoren ingetekend op de seismische secties dienen gekoppeld aan de lithostratigrafische opeenvolging gekend binnen het onderzoeksgebied en de nabije omgeving. Enerzijds is er het regionaal lithostratigrafische kader waarop aangesloten wordt via de bestaande interpretaties van het dgm diep v5. Anderzijds zijn er de stratigrafische discordanties, herkenbaar op de seismische secties, waarvan de lithostratigrafische positie gekend is (N, KN, ZE). Natuurlijk zijn er ook de diepboringen aanwezig binnen het onderzoeksgebied en de nabije omgeving. Eigenlijk maken de diepboringen de enige echte koppeling mogelijk tussen reflectoren op seismische lijnen en de lithostratigrafie.







Dit maakt van NVG-01 de belangrijkste diepboring binnen het onderzoeksgebied om de geïnterpreteerde reflectoren te koppelen aan de verschillende lithostratigrafische eenheden. Ze is centraal gelegen, ze doorboort alle belangrijke (ondiepe) lithostratigrafische eenheden (NU, NMNL, CK, KN, RB en ZE) binnen het studiegebied en ze is gelegen nabij 3 seismische lijnen. In deze diepboring werd enkel de bovenste 158m van de Limburg Groep aangeboord. De diepere eenheden (DCC, DCG en CL) werden niet bereikt in diepboring NVG-01, maar zijn wel belangrijk voor deze studie. Vandaar dient er voor de lithostratigrafische koppeling aan diepboringen verder buiten de grenzen van het studiegebied gekeken te worden.

### 3.4.2. KOPPELING BINNEN DE OMGEVING VAN HET STUDIEGEBIED

Tabel 8 geeft de diepboringen weer die langs nieuwe seismische lijnen liggen of langs oude seismische lijnen contact maken met de nieuwe seismische lijnen (zie ook figuur 1):

*Tabel 9: De diepboringen gelegen in de omgeving van het studiegebied, met de nabijgelegen seismische lijnen, het aantal doorboorde lithostratigrafische eenheden en de lithocode van de aangeboorde gesteenten.*

NAAM	CODE	X (m) RD	Y (m) RD	Z (m) NAP	DIEPTE (m) TVD	LITHOCODE	SEISMISCHE LIJNEN	AANTAL EENHEDEN
ALTFORST-01	ALT-01	166320	429120	7	654	CKGR	MZ88-53	3
BRONKHORST-01	BKH-01	210224	454757	16,57	1553,09	DCCU	SCAN002	7
BARNEVELD-01	BNV-01	169890	463106	17,54	1021,96	UNDEF	SCAN005	1
BARNEVELD-01-SIDETRACK1	BNV-01-S1	169890	463106	17,54	2288,45	DCC	SCAN005	9
BUURMALSEN-01	BUM-01	149852	435103	9,3	2189,25	DCC	SCAN003	8
HEESWIJK-01	HSW-01	159054	408294	14,99	2488,01	UNDEF	SCAN002	5
HEESWIJK-01-SIDETRACK1	HSW-01-S1	159054	408294	14,99	2774,56	UNDEF	SACN002	2
MAASBOMMEL-01	MSB-01	164203	427638	8,5	1713,5	ZEZ3C	MZ88-53	7
MAASBOMMEL-02	MSB-02	164883	429301	9,5	1278	DCCB	MZ88-53	5

Diepboring ALT-01 reikt 200m tot in de Krijt-kalk Groep (CK) en is bijgevolg te ondiep voor de lithostratigrafische koppeling met de Paleozoïsche eenheden DCC, DCG en CL. Diepboring MSB-01 reikt ongeveer 20m tot in de Zechstein Groep (ZE) en is dus ook te ondiep voor de lithostratigrafische koppeling met de Paleozoïsche eenheden. In diepboring HSW-01 werden sedimenten van de Onder Germaanse Trias Groep aangeboord. Deze boring is dus eveneens te ondiep voor de gewenste koppeling.

Zowel in diepboring BKH-01, als BNV-01 en BUM-01 werden gesteenten van de Caumer Subgroep aangeboord over een lengte van respectievelijk ongeveer 10m, 20m en 40m. Deze boringen liggen alle drie ongeveer op 33km van het centrum van het studiegebied. Aangezien de Caumer Subgroep meer dan 1000m dik is, brengen deze boringen dan ook weinig bij voor de koppeling met de lithostratigrafisch diepere eenheden DCC, DCG en CL.

In diepboring MSB-02 worden de basislagen van de Caumer Subgroep (Baarlo Formatie) bereikt. Deze boring ligt op ongeveer 10km buiten het onderzoeksgebied en kan enige indicatie geven met betrekking tot welke reflector op seismische lijn MZ88-53 met de basis van de Caumer Subgroep (DCC) overeenkomt. Voor diepere eenheden waaronder de top van Kolenkalk Groep (CL) dient er nog verder buiten de grenzen van het studiegebied gezocht te worden.

### 3.4.3. KOPPELING VER BUITEN HET STUDIEGEBIED

De dichtstbijzijnde diepboringen die de top van Kolenkalk Groep aanboren zijn de WSK-01 boring in Winterswijk en de CAL-GT boringen in Californië/Venlo. Deze liggen respectievelijk op ongeveer 60km en 55km van het centrum van het studiegebied. WSK-01 ligt in het CNB en CAL-GT, net als



het overgrote deel van het onderzoeksgebied, op het PMC. In dat opzicht is een correlatie met CAL-GT meer aangewezen dan een correlatie met WSK-01.

Een koppeling met CAL-GT werd initieel niet gemaakt omdat deze een correlatie veronderstelt langs minstens 6 bestaande seismische lijnen met een totaallengte van ongeveer 70<sup>o</sup>km. Eén seismische lijn dateert van 2009, drie van 1983 en één van 1981. De laatste seismische lijn die vanuit Californië/Venlo contact maakt met lijnen (SCAN005) van de nieuwe seismische surveys dateert van 1969. Uit het onderzoek komt naar voor dat de seismische lijnen van de jaren 1980 op een diepte groter dan 2<sup>o</sup>seconden zelden nog duidelijk herkenbare en volgare reflectoren vertonen. Het is juist dit bereik dieper dan 2<sup>o</sup>seconden waarin de top van de Kolenkalk Groep (CL) zich in het studiegebied bevindt. Met de bestaande seismische lijnen tussen Nijmegen en Californië/Venlo zal het bijgevolg moeilijk zijn om de top van de Kolenkalk Groep (CL) vanuit het onderzoeksgebied te koppelen aan de CAL-GT diepboringen.

Bij het finaliseren van het rapport is lijn SCAN016 beschikbaar gekomen. Deze lijn verbindt het gebied nabij Nijmegen met het gebied ten westen van de CAL-GT putten, en laat zo beter een correlatie toe.

*Tabel 10: De dichtstbij het studiegebied gelegen diepboringen waarin de Kolenkalk Groep aangeboord werd, met het minimale aantal en de totaallengte van de seismische lijnen tussen de diepboringen en het studiegebied, het aantal doorboorde lithostratigrafische eenheden en de lithocode van de aangeboorde gesteenten.*

NAAM	CODE	X (m) RD	Y (m) RD	Z (m) NAP	DIEPTE (m) TVD	LITHOCODE	LENGTE / AANTAL SEISMISCHE LIJNEN	AANTAL EENHEDEN
CALIFORNIE-GT-01	CAL-GT-01	203895	381599	33	1856,64	CLZL	70 / 6	7
CALIFORNIE-GT-01-SIDETRACK1	CAL-GT-01-S1	203895	381599	33	2510,17	OBBS	70 / 6	2
CALIFORNIE-GT-02	CAL-GT-02	203898	381606	32	1481,68	OBBS	70 / 6	8
CALIFORNIE-GT-03	CAL-GT-03	203901	381613	33	2255,77	OBBS	70 / 6	8
WINTERSWIJK-01	WSK-01	244787	438270	44,61	5002,98	OB	50 / 3	10

De WSK-01 diepboring maakt via een aantal seismische lijnen van de jaren 1970 verbinding met de 3D seismische survey van 1996 rond BKH-01. Ondanks het weinig zekere karakter van de correlatie tussen WSK-01 en het BKH-01 gebied werd de top van de Kolenkalk Groep binnen het volledige 3D seismisch gebied herkend (ten Veen et al., 2019). De nieuwe seismische lijn SCAN002 loopt over het centrum van het studiegebied tot in het gebied van de 3D seismische survey nabij BKH-01. Op een onrechtstreekse wijze wordt hier een lithostratigrafische koppeling gemaakt met de WSK-01 diepboring voor wat de top van Kolenkalk Groep (CL) betreft, maar ook voor de basis van de Caumer Subgroep (DCC).

Aangezien er binnen het studiegebied en de nabije omgeving geen lithostratigrafische koppeling mogelijk is tussen de nieuwe seismische lijnen en diepboringen voor wat betreft de top van de Kolenkalk Groep (CL), werd er in eerste instantie getracht om een koppeling te maken met de basis van de Caumer Subgroep. Hiervoor werd er:

- vertrokken van de interpretatie voor de Caumer Subgroep op seismische lijn MZ88-53 ter hoogte van MSB-02 en op het uiteinde van seismische lijn SCAN002 in het 3D seismische gebied rond BKH-01.
- vanuit MSB-02 via seismische lijn MZ88-53 een lithostratigrafische koppeling gemaakt met seismische lijn SCAN005.
- vanuit het 3D seismische survey gebied rond BKH-01 langs seismische lijn SCAN002 een koppeling gemaakt met diezelfde seismische lijn SCAN005.
- op de sectie van lijn SCAN005 tussen de kruisingen met lijnen MZ88-83 en SCAN002 een vergelijking gemaakt met betrekking tot de positie van beide interpretaties.
- nagegaan of de koppeling vanuit beide regio's tot eenzelfde correlatie leidde.



De verkregen correlatie werd gebruikt om de basis van de Caumer Subgroep op alle oude en nieuwe seismische lijnen uit te zetten.

Deze interpretatie vormt de leidraad bij het koppelen van de nieuwe seismiek in het studiegebied aan de seismostratigrafische interpretatie voor de top van de Kolenkalk Groep in de BKH-01 regio.

Op basis van deze koppeling vormt de derde reflector in de set van getraceerde reflectoren uit de vorige paragraaf, met andere woorden de bovenste getraceerde reflector van de dik gebande zone, de basis van de Caumer Subgroep en reflector optie 2 de top van de Kolenkalk Groep

### 3.4.4. KOPPELING MET CALIFORNIË/VENLO

Eind januari 2021 zijn nieuwe seismische data, vergaard binnen het SCAN programma, gepubliceerd en openbaar gemaakt via het NLOG-portaal. Seismische lijn (SCAN016) behoort tot deze gepubliceerde data. Ze ligt tussen Nijmegen en Grashoek, loopt hierbij iets ten westen van Venlo (glastuinbouwgebied Californië) en maakt een koppeling tussen beide regio's betrouwbaarder dan aan de hand van de vernoemde oude seismische lijnen. De nieuwe seismische lijn maakt net geen verbinding met lijn (SCAN005) en evenmin met de lijn door diepboring CAL-GT-01 (09-02). De afstand tot deze lijnen bedraagt respectievelijk 1491<sup>m</sup> en 640<sup>m</sup> en is op Figuur 12 weergegeven met blanco zones tussen de seismische profielen. Desondanks is een seismostratigrafische correlatie, die het Venlo (Californië) gebied met het Renkum-Nijmegen gebied verbindt, mogelijk. De interpretatie van seismische lijn (09-02) is lithostratigrafisch gekoppeld aan diepboring CAL-GT-01, waarin de gesteenten van de Kolenkalk Groep aangeboord werden. Door via de interpretatie van lijn (SCAN016) de seismostratigrafie van lijn (09-02) naar lijn (SCAN005) over te brengen is het mogelijk om een onderbouwde keuze te maken met betrekking tot welke van de 3 reflectoren, die kandidaat staan voor de basis van de Caumer Subgroep, werkelijk de top van de Kolenkalk voorstelt. De resultaten van deze correlatie genieten de voorkeur boven de correlatie met het Bronkhorst gebied, aangezien seismische lijn (SCAN016) op het PMC gelegen is, terwijl lijn (SCAN002) naar een ander structureel domein (CNB) overgaat in de richting van Bronkhorst, wat op zich een goede correlatie kan bemoeilijken.

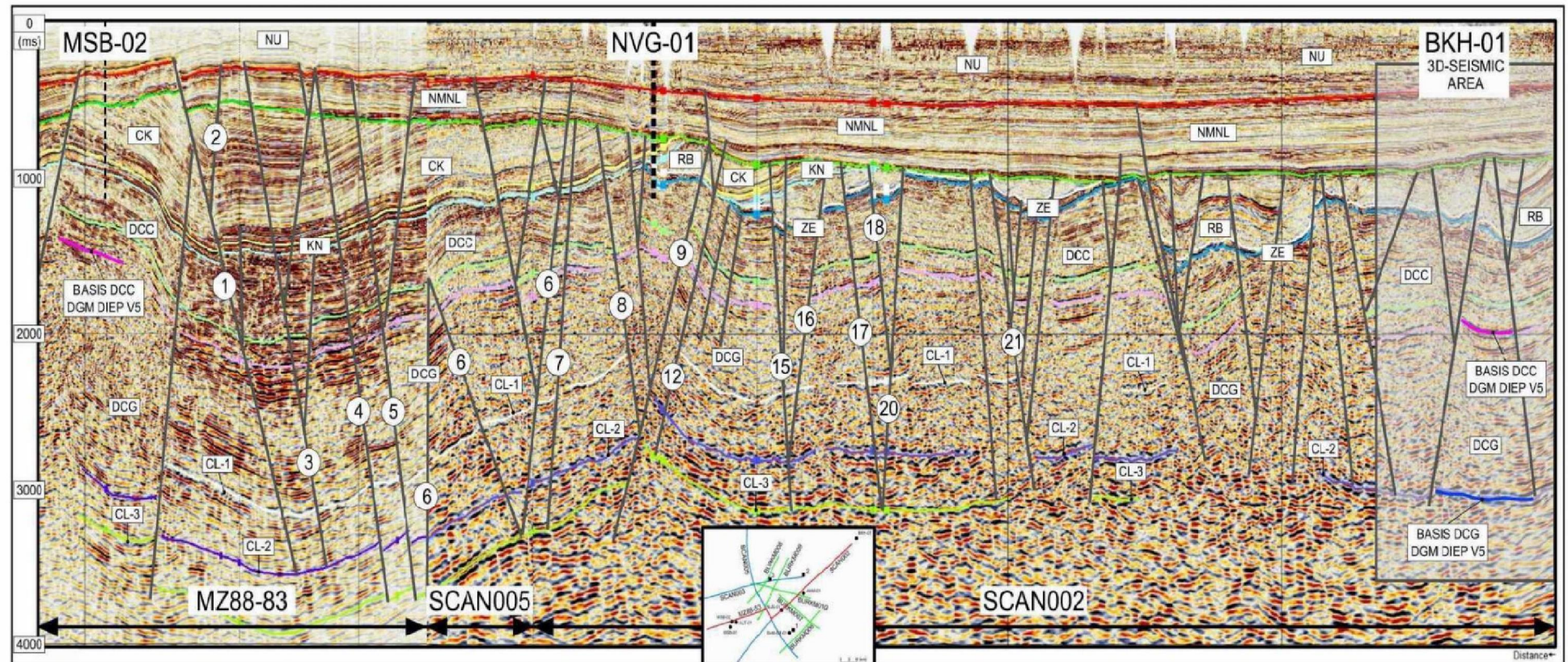
In het Renkum-Nijmegen gebied ligt de reflector voor de basis van de Geul Subgroep Optie 1 temidden van een eerder transparante zone, waarbij het pakket onder de reflector tot aan de reflector, die Optie 2 voorstelt, lokaal een zekere gebandheid vertoont. Tussen de reflectoren voor Optie 2 en Optie 3 wordt een gebande zone aangetroffen, die lateraal lokaal chaotisch of zelfs transparant kan worden. Binnen dit pakket komen reflectoren voor die convergeren naar reflector Optie 3. Onder de reflector voor Optie 3 komt een chaotisch geband tot lokaal transparant pakket voor. Ook in dit onderste pakket komen naar reflector Optie 3 convergerende reflectoren voor.

In het Venlo (Californië) gebied wordt iets gelijkaardigs teruggevonden. De reflector die daar de top van de Kolenkalk Groep voorstelt, vormt er de grens tussen een eerder transparant pakket bovenaan en een geband pakket onderaan. Binnen het transparante pakket kan een opdeling gemaakt worden in een onderste zone die lokaal een zekere gebandheid vertoont en een bovenste zone waarin die lokale gebandheid minder uitgesproken naar voor komt eerder. Het contact tussen beide zones wordt gezien als overeenkomstig met reflector Optie 1 in het Renkum-Nijmegen gebied. Het gebande pakket onderaan de top van de Kolenkalk Groep wordt aan de onderzijde afgeboord door een transparante zone die lateraal lokaal een zekere gebandheid vertoont. Het contact tussen het gebande en transparante pakket wordt gezien als overeenkomstig met reflector Optie 3 in het Renkum-Nijmegen gebied. Ook hier lijken de bovenliggende en onderliggende reflectoren lokaal naar reflector Optie 3 te convergeren.



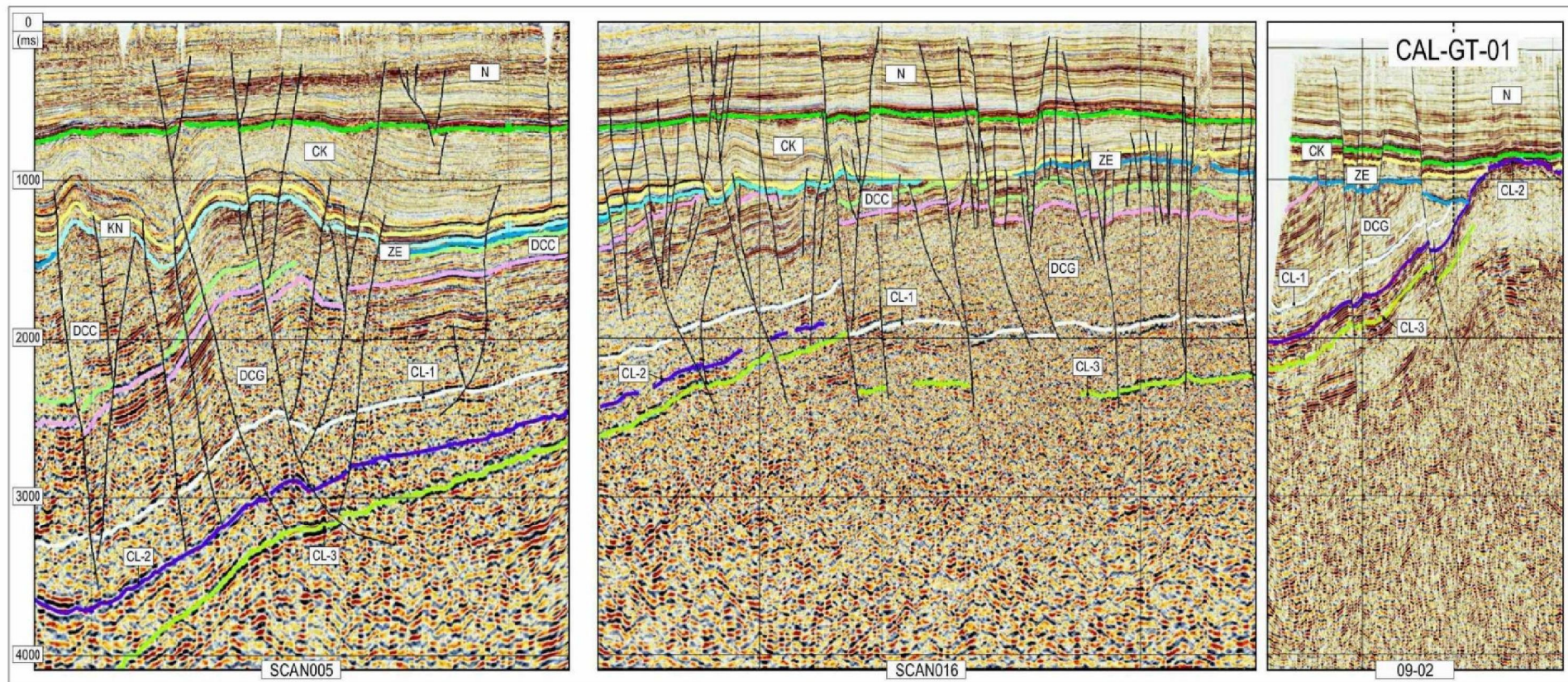
In beide regio's wordt bijgevolg een vergelijkbare seismostratigrafische opbouw aangetroffen voor het bereik rond de top van de Kolenkalk Groep. Op seismische lijn (SCAN016) is een gelijkaardig beeld evenwel niet duidelijk aanwezig. Over de ganse lengte van dit seismisch profiel worden binnen het bereik van de top van de Kolenkalk Groep 2 duidelijke "hard kick" reflectoren aangetroffen die langs beide zijden afgeboord worden door 2 "soft kick" reflectoren. Beide "hard kick" reflectoren liggen binnen een seismisch transparante zone. Zeer lokaal komt er rond de bovenste reflector een onduidelijke gebandheid voor. Vanwege de geometrische positie van deze "hard kick" reflectoren ten opzichte van de reflectoren op lijnen (SCAN005) en (09-02) is het duidelijk dat ze overeenkomen met Optie 1 en Optie 3 voor de basis van de Geul Subgroep. Optie 2, die in de Venlo (Californië) regio overeenkomt met de top van de Kolenkalk Groep en het gebande pakket eronder, zijn op lijn (SCAN016) als dusdanig niet herkenbaar. In het uiterste noorden van het seismisch profiel is er lokaal een discontinue reflector vervolgbaar, die geometrisch in het verlengde ligt van reflector Optie 2 op lijn (SCAN005). Zuidwaarts in de richting van Venlo (Californië) wordt deze discontinue reflector niet meer aangetroffen. De reflector voor de top van de Kolenkalk Groep is bijgevolg niet één op één vervolgbaar vanuit het Venlo (Californië) gebied tot in het Renkum-Nijmegen gebied en kan er daardoor niet rechtstreeks gekoppeld worden aan reflector Optie 2. Een correlatie wordt ook bemoeilijkt door het voorkomen van meerdere breuken. De exacte verplaatsing langs deze breuken heeft een impact op de correlatie van de reflectoren (en de opties). Dit brengt een aanzienlijke onzekerheid met zich mee. De correlatie wordt bovendien beïnvloed door de exacte verticale positie van lijn 09-02 ten opzichte van SCAN016, beide lijnen hebben een verschillend referentieniveau. Toch kan er op basis van de geometrie van de omliggende reflectoren voor Optie 1 en Optie 3 op de verschillende seismische lijnen (SCAN005, SCAN016 en 09-02) gesteld worden dat reflector Optie 2 de beste kandidaat is om de top van de Kolenkalk Groep voor te stellen. Temeer daar de pakketten tussen en rond de verschillende reflectoren voor Optie 1, Optie 2 en Optie 3 een vergelijkbare seismische expressie vertonen in beide regio's.





Figuur 11: Correlatie van de Limburg Groep tussen het MSB-02 gebied en het BKH-01 gebied.





Figuur 12: Correlatie van de Limburg Groep tussen het Renkum-Nijmegen gebied (SCAN005) en het Venlo (Californië) gebied (09-02) langs nieuwe seismische lijn SCAN016. Merk op dat de correlatie van opties 1-3 tussen lijnen 09-02 en SCAN016 onzeker is omwille van verschillen in referentieniveau tussen beide lijnen (op dit paneel is lijn 09-02 te laag geplaatst).



## HOOFDSTUK 4. TIJD-MODEL

---

### 4.1. STRUCTURELE INTERPRETATIE

Voor de opbouw van een 3D TWT tijd-model werden de lijnen van de nieuwe seismische surveys seismostratigrafisch geïnterpreteerd. Vijftien oude lijnen uit zeven verschillende seismische surveys (tabel 2) kregen eveneens een seismostratigrafische interpretatie. Twee van die lijnen (MZ88-53 en MZ85-57) waren gereprocessed in het kader van het SCAN-aardwarmte project. Tezamen met de seismostratigrafische interpretatie werden alle seismische lijnen ook van een structurele interpretatie voorzien. Deze interpretaties vinden allemaal plaats in het tijdsdomein (TWT).

Op de seismische lijnen werden verschillende structurele elementen waargenomen. Deze elementen, zoals horsten, slenken, pop-ups en dergelijke werden afgelijnd. Per seismische sectie werden breuken (*faultsticks*) ingetekend. Over de verschillende secties heen werden structuren vergeleken en werden op basis daarvan de verschillende *faultsticks* verzameld in "*faultsticksets*". Elke *faultstickset* bevat de *faultsticks* behorend tot een welbepaald breukvlak. Naast de *faultsticks* ingetekend op de seismische secties werden er ook "*hulp-faultsticks*" toegevoegd aan de *faultsticksets*. Deze zijn ingebracht tussen de verschillende seismische secties in en moeten ervoor zorgen dat de breukvlakken een meer vloeiend verloop krijgen dan in het geval deze enkel gebaseerd zijn op de echte *faultsticks*. Op basis van de *faultsticksets* werden dan de breukvlakken (*faults*) gecreëerd.

Bij de structurele interpretatie van de seismische secties werden enkel de breuken (*faultsticks*) ingetekend die herkend werden tussen het gecombineerde basisvlak van de Noordzee Supergroep (N) en de Rijnland Groep (KN) en het topvlak van de Kolenkalk Groep optie 3. Met andere woorden enkel de *faultsticks* binnen de Onder Germaanse Trias Groep, de Zechstein Groep, de Onder Rotliegend Groep en de Limburg Groep werden ingetekend.

- op de meeste van de seismische secties vertonen de breuken ter hoogte van het topvlak van de Kolenkalk optie 3 geen sprong meer en zijn ze bijgevolg dieper moeilijk traceerbaar
- op één breuk na met een belangrijk verzet is er in het basisvlak van de Rijnland Groep zelden een breuksprong waarneembaar
- binnen het stratigrafisch bereik tussen de basis van de Rijnland Groep en de basis van Noordzee Supergroep zijn breuken moeilijk te herkennen, binnen het studiegebied althans lijkt dit pakket eerder ductiel vervormd (ten westen van het studiegebied zijn er wel duidelijk breuken te herkennen in de top van de Krijtkalk Groep)
- vanaf het gecombineerde basisvlak van de Noordzee Supergroep en de Rijnland Groep ontstaan er naar boven toe veelal satelliet-breuken die geen bijdrage leveren aan de structurele opbouw van de onderliggende pakketten die de target vormen van deze studie

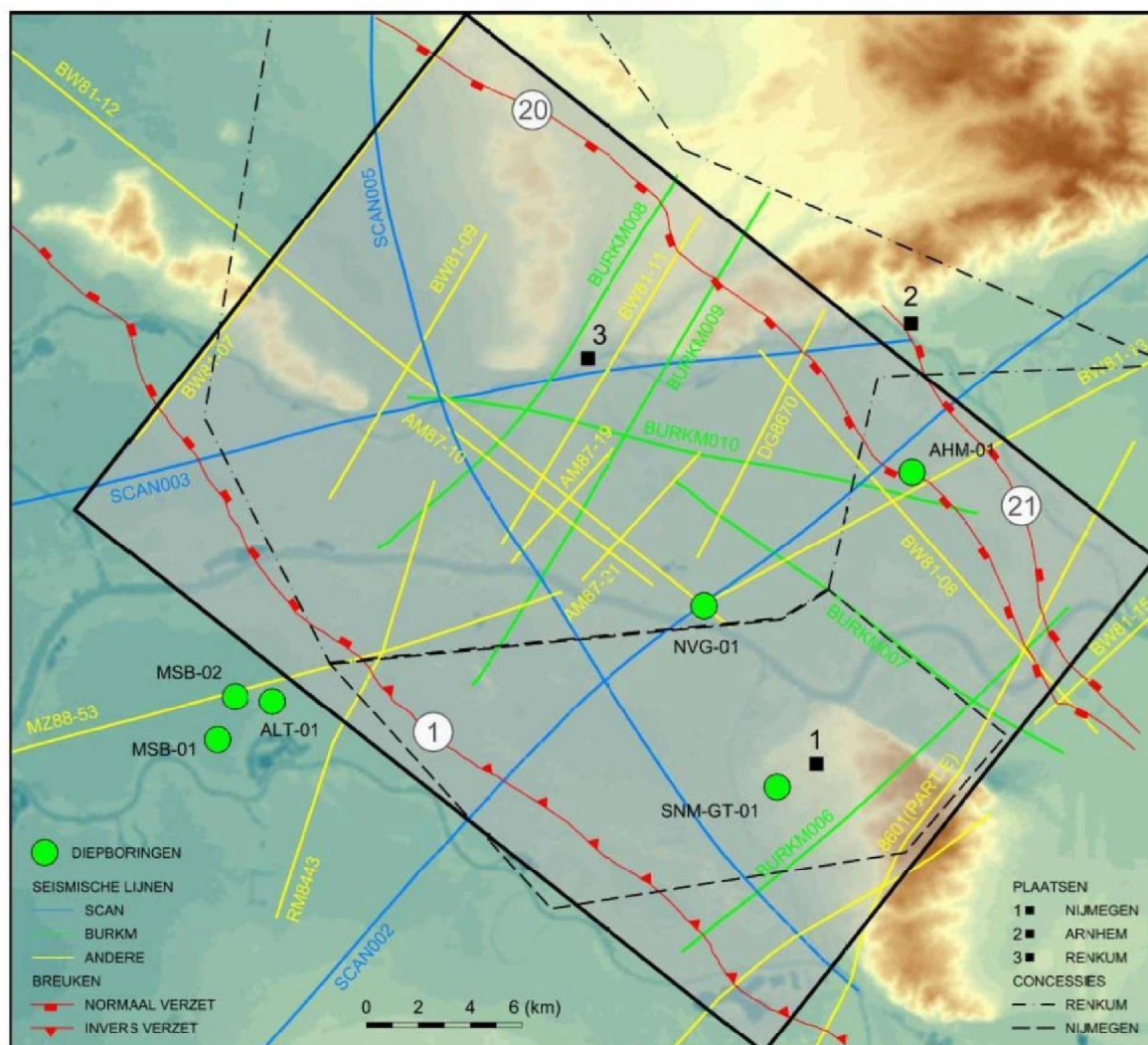
Omwille van technische redenen bij het modelleren van breukvlakken werden de *faultsticks* vanaf de basis van de Rijnland Groep met een gelijkaardige helling doorgetrokken tot aan de basis van de Noordzee Supergroep. De gemodelleerde 3D breukvlakken lopen bijgevolg vanaf de basis van de Noordzee Supergroep tot aan de top van Kolenkalk Groep optie 3. Breuken in de basis van de Noordzee Supergroep en hogerop werden niet gemodelleerd.



## 4.2. OPBOUW VAN TWT-VLAKKEN PER SEISMOSTRATIGRAFISCHE HORIZONT

### 4.2.1. MODEL-GEBIED

Eenmaal de seismostratigrafische en structurele interpretatie uitgevoerd, werd een TWT tijd-model opgesteld binnen een rechthoekig gebied dat alle interpretaties op de nieuwe seismische lijnen omschrijft. Binnen dit kader met de volgende coördinatenparen in m RD (156250, 408850) en (200250, 455550) werd voor elke seismostratigrafische horizont een raster met cellen van 100°m bij 100°m aangemaakt.



Figuur 13: De situering van het model-gebied binnen het onderzoeksgebied.

Het uiteindelijke model-gebied is evenwel kleiner en wordt afgebakend:

- aan de noordwest zijde door seismische lijn BW81-07
- aan de zuidoost zijde door seismische lijnen MZ85-57, 8601 PART-E en BW81-15
- aan de noordoost zijde en zuidwest zijde door breuken (1, 20 en 21; zie verder hoofdstuk 8).

Deze zone omschrijft het centrale deel van het rechthoekig model-gebied en valt ongeveer samen met de omtrek van de oppervlakte bedekt door de BURKM-lijnen van de L2EBN2020B seismische survey.

**4.2.2. MODEL-DATA**

Voor het aanmaken van de TWT-rasters werd er per horizont gebruik gemaakt van:

- de nieuwe seismostratigrafische interpretatie (in ms TWT) van de verschillende horizonten op de verschillende voornoemde nieuwe en oude seismische lijnen
- de bestaande seismostratigrafische interpretatie uit het dgm diep v5 (in ms TWT) voor de niet geherinterpreteerde seismische lijnen binnen het rechthoekig model-gebied
- hulppunten:
  - o op verbreidingsgrenzen/subcropgrenzen
  - o langs breuken

De hulppunten op de subcropgrenzen werden van een derde dimensie (in ms TWT) voorzien door ze te projecteren op een eerste versie van het bovenliggende seismostratigrafisch vlak of de combinatie aan bovenliggende seismostratigrafische vlakken. De hulppunten langs de breuken werden op 50°m langs beide zijden van de breuken aangebracht en van een derde dimensie voorzien op basis van een lineaire interpolatie van de TWT-waarden van de seismostratigrafische horizont aan weerszijden van het gemodelleerde breukvlak (zie 4.1.1.). Binnen een buffer van 500°m langs de nieuwe seismische lijnen werden de waarnemingen afkomstig van de bestaande seismostratigrafische interpretatie uit het dgm diep v5 verwijderd. Zodoende werd er voor gezorgd dat de nieuwe interpretaties de belangrijkste invoerbron vormden voor interpolatie naar een TWT-raster.

**4.2.3. MODEL-PROCEDURE**

Op basis van enkel de waarnemingspunten (dus zonder de hulppunten) werd er aan de hand van een standaard Kriging interpolatiemethode voor elke horizont een eerste voorlopig TWT-raster opgesteld. Voor elk van deze rasters werd er een snijding gemaakt met de verschillende breukvlakken. De hieruit verkregen snijlijnen vertegenwoordigen de breuktrajecten ter hoogte van de onderzochte seismostratigrafische horizont. Deze breuktrajecten krijgen een sturende functie tijdens een tweede interpolatie ronde. Ze geven namelijk aan dat er een structureel overheersende N55W-oriëntatie in het gebied aanwezig is. Deze werd als voorkeursrichting tijdens interpolatie van enkele horizonten meegegeven. Ze werd gebruikt onder de vorm van een gerichte keuze tussen punten bij interpolatie en onder de vorm van een anisotropie tijdens het interpoleren. Tijdens de tweede interpolatie ronde werd er gewerkt zowel met waarnemingspunten als met hulppunten. Om de interpolatie rond breuken nog beter te sturen werden de hulppunten langs breukvlakken nogmaals ontdebeld op 100°m vanaf het breukvlak. Op die manier wordt er voorkomen dat de steile gradiënt rond de breukzone bij interpolatie met Kriging te ver doorgetrokken wordt.

Volgende lijst geeft de specificaties bij of uitzonderingen op deze procedure bij het aanmaken van specifieke TWT-rasters weer:

- de basis van de Boven Noordzee Groep (NU):
  - o is enkel gebaseerd op TWT-waarden van de seismische lijnen afkomstig uit het dgm diep v5.
  - o er werd gebruik gemaakt van een zoekellips en een anisotropie met een lange as georiënteerd volgens de N55W-richting en een 100/70 verhouding.
- de basis van de Midden en Onder Noordzee Groep (NMNL):
  - o er werd gebruik gemaakt van een zoekellips en een anisotropie met een lange as georiënteerd volgens de N55W-richting en een 100/70 verhouding.
- de basis van de Krijtkalk Groep (CK):
  - o er werd gebruik gemaakt van een zoekellips en een anisotropie met een lange as georiënteerd volgens de N55W-richting en een 100/50 verhouding.



- er werd gebruik gemaakt van hulppunten op de subcropgrens onderaan de Noordzee Supergroep (N)
- de basis van de Rijnkalk Groep (RK):
  - er werd gebruik gemaakt van een zoekellips en een anisotropie met een lange as georiënteerd volgens de N55W-richting en een 100/50 verhouding.
  - er werd gebruik gemaakt van hulppunten op de subcropgrens onderaan de Noordzee Supergroep (N)
- de basis van de Onder Germaanse Trias Groep (RB):
  - er werd gebruik gemaakt van de tijd-dikte i.p.v. de TWT-diepte in ms
  - er werd gebruik gemaakt van hulppunten met tijd-dikte 0°ms op de subcropgrens onderaan het (N) en (RN) gecombineerde basisvlak
  - het tijd-dikte raster werd bovenaan het (ZE)-TWT-raster toegevoegd
- de basis van de Zechstein Groep (ZE):
  - er werd gebruik gemaakt van hulppunten op de subcropgrens onderaan het (N) en (RN) gecombineerde basisvlak
  - er werd gebruik gemaakt van hulppunten langs breuken
- de basis van de Boven Rotliegend Groep (RO):
  - er werd niet in TWT gemodelleerd
- de basis van de Caumer Subgroep (DCC):
  - er werd gebruik gemaakt van hulppunten langs breuken
- de top van de Kolenkalk Groep (CL):
  - er werd gebruik gemaakt van hulppunten langs breuken
  - voor elk van de 3 mogelijke opties werd een TWT-raster aangemaakt

Uiteindelijk werden alle TWT-rasters:

- in 3D vergeleken met de snijdende seismische secties
- onderling met elkaar vergeleken
- onderzocht naar mogelijk onderlinge kruisingen

Waar nodig werden aanpassingen uitgevoerd. Tenslotte werden de TWT-rasters afgesneden op de grenzen van het uiteindelijke modelgebied.

## HOOFDSTUK 5. TIJD/DIEPTE CONVERSIE

## 5.1. ALGEMEEN

De tijd/diepte conversie werd uitgevoerd op de TWT-rasters en niet op de TWT-interpretaties zoals in het SCAN-rapport van ten Veen et al. (2019). De conversie is gebaseerd op:

- de formule van Japsen (1993):

$$Z_{b2} = \frac{V_{02}}{k_2} \times (e^{k_2 \times Dt_2} - 1) + Z_{t2} \times e^{k_2 \times Dt_2}$$

met

- o  $Z_{b2}$ : de diepte van de basis van de gemodelleerde eenheid (m)
- o  $Z_{t2}$ : de diepte van de top van de gemodelleerde eenheid (m)
- o  $V_{02}$ : de oppervlakt snelheid van de gemodelleerde eenheid (m/s)
- o  $k_2$ : de snelheidsgradiënt van de gemodelleerde eenheid (1/s)
- o  $Dt_2$ : de tijd-dikte van de gemodelleerde eenheid (s) in OWT
- o  $e$ : exponentiële functie
- het Velmod model voor Nederland (van Dalfsen et al., 2006)
- de Velmod v3.1 waarden en kaarten voor  $V_{int}$ ,  $V_0$  en  $k$  (Pluymaekers et al., 2017) met:
  - o  $V_{int} = V_0 + k \times Z_{mid}$
  - o  $V_{int}$ : de intervalsnelheid van de gemodelleerde eenheid (m/s)
  - o  $V_0$ : de oppervlakt snelheid van de gemodelleerde eenheid (m/s)
  - o  $k$ : de snelheidsgradiënt van de gemodelleerde eenheid (1/s)
  - o  $Z_{mid}$ : de diepte van het midden van de gemodelleerde eenheid (m).
- de  $V_0$ - en  $k$ -waarden uit ten Veen et al., 2019

## 5.2. VELMOD MODEL EN VELMOD V3.1

Het Velmod model werd opgesteld door van Dalfsen et al. in 2006. Hierin wordt de stratigrafische kolom van de Nederlandse ondergrond opgedeeld in 9 pakketten met een bepaalde hoofdlithologie. In drie gevallen is er nog een verdere opdeling in sublagen. Figuur 9 geeft deze opdeling weer. Enkel pakketten 1a, 1b, 2, 3b, 6b, 7, 8 en 9 komen voor in het modelgebied. Voor elk van deze eenheden werd er op basis van verschillende typen metingen een waarde bepaald voor de snelheid waarmee het geluid zich door het medium, waaruit de gemodelleerde eenheid bestaat, voortplant. Voor de meeste eenheden bestaat er een (zwakke) correlatie tussen de snelheid en de diepte waarop de eenheid zich bevindt. Deze relatie wordt uitgedrukt in  $V_{int} = V_0 + k \times Z_{mid}$  formule, waarbij  $k$  de toename in snelheid met de diepte weergeeft en  $V_0$  de snelheid die de gemodelleerde eenheid heeft aan de oppervlakte.  $V_{int}$  stelt de intervalsnelheid voor gemeten op een bepaald diepte  $Z_{mid}$ . Gezien de eerder zwakke correlatie met de diepte is  $V_{int}$  niet voor alle meetlocaties gelijk op eenzelfde diepte. Aangezien de snelheidsgradiënt ( $k$ ) aanzien wordt als een constante, varieert ook  $V_0$  van plaats tot plaats. Voor  $V_{int}$  en  $V_0$  zijn er per pakket kaarten beschikbaar op het NLOG portaal die deze variatie ruimtelijk weergeven.



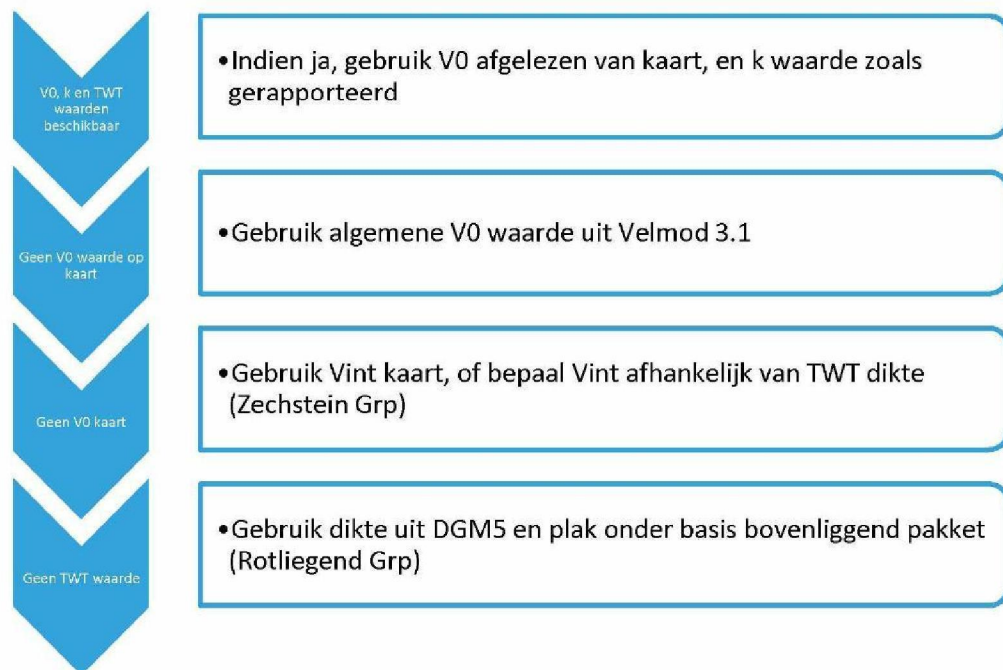
Era	Period	Lithostratigraphy	Sediment Main type	Lithology	Layer	Strat	Area	# Boreholes	# velocity curves	k (s <sup>-1</sup> )	V <sub>0</sub> (m/s)	R <sup>2</sup>
CENOZOIC	Neogene	Upper North Sea Group - NU	a	Clays, silts, fine to coarse grained sands and sandstones	1	N	Dutch territory	1075	2544	0.284	1788	0.30
		Middle North Sea Group - NM	1		1a	NU	Dutch territory	660	1506	0.436	1761	0.32
	Paleogene	Lower North Sea Group - NL	b	Mainly limestones, shales, silt and clays	1b	NM+NL	Dutch territory	757	1763	0.235	1779	0.32
		Chalk Group - CK	2		2	CK	Dutch territory	1160	2556	0.889	2257	0.74
MESOZOIC	Cretaceous	Holland Formation - KNG	a	Argillaceous and sandy deposits, sandstone beds	3	KN	Dutch territory	1225	2710	0.536	2133	0.69
		Rijland Group - KN	b		3a	KNG	Dutch territory	1128	2439	0.737	1907	0.80
		Vlieland subgroup - KNN	c		3b	KNN	Dutch territory	1109	2455	0.428	2217	0.51
		Scheldt Group - SL	4		4	SL	Lower Saxony Basin, Central Netherlands Basin, West Netherlands Basin, Broad Fourteens Basin	458	1016	0.520	2557	0.34
	Jurassic	Altus Group - AT	5	Argillaceous deposits with calcareous concretions, and clastic sediments	4	SL	Vlieland Basin, Terschelling Basin, Step Graben	458	1016	0.520	2120	0.22
	Triassic	Upper Germanic Tria Group - BU	a	Silty claystones, evaporites, carbonates, sandstones and siltstones	4	SL	Dutch Central Graben	458	1016	0.520	1609	0.47
		Lower Germanic Tria Group - LB	b									
		Zechstein Group - ZE	7									
	Permian	Upper Rotliegend Group - RO	8	Evaporites and carbonates	5	AT	Dutch territory	419	951	0.436	2259	0.59
		Lower Rotliegend Group - LG	9	Evaporites and carbonates	6	RN+RB	Dutch territory	817	1792	0.374	3046	0.38
PALAEOZOIC	Carboniferous	Limburg Group - LC	9	Fine grained silty clastic sediments and coal seams	6a	RN	Dutch territory	638	1423	0.361	3079	0.41
		Carboniferous Limestone Group - CL			6b	RB	Dutch territory	937	2026	0.406	3019	0.39
					8	RO	Dutch territory	901	1912	0.309	3209	0.31
					9	DC	Dutch territory	780	1566	0.261	3427	0.44
					9	DCG	Dutch territory	19	36	0.262	3377	0.68

Figuur 14: De opdeling van de stratigrafische kolom in 9 velmod eenheden (van Dalfsen et al., 2006) en de  $V_0$ - en  $k$ -waarden voor de verschillende velmod eenheden uit velmod v3.1 (Pluymaekers et al., 2017).

Pluymaekers et al. (2017) publiceerden een geactualiseerde versie van het velmod model, velmod v3.1. Op basis van meer waarnemingen werden nieuwe  $V_{int}$ ,  $V_0$ - en  $k$ -waarden berekend (zie tabel bij figuur 9). Ook werden nieuwe  $V_{int}$ - en  $V_0$ -kaarten aangemaakt. Voor alle pakketten tot en met de Boven Rotliegend Groep werden in deze studie de waarden en kaarten van velmod v3.1 gebruikt.

Volgende uitzonderingen of specifieke gevallen deden zich hierbij voor (zie ook Figuur 15):

- Waar op de kaarten geen  $V_{int}$  of  $V_0$  aanwezig zijn, is er gebruik gemaakt van de landelijke  $V_{int}$ - en  $V_0$ -waarden zoals opgegeven in de tabel.
- Voor de Zechstein Groep (ZE) werd er geen relatie tussen snelheid en diepte vastgesteld.  $V_0$  en  $k$  zijn bijgevolg niet bepaald. Een  $V_{int}$ -kaart werd wel opgesteld. Op plaatsen waar geen  $V_{int}$  waarden op kaart staan, werden volgende formules gebruikt uit van Dalfsen et al. (2006):
  - $V_{int} = 4500$  bij een TWT-interval  $\geq 280^\circ\text{ms}$
  - $V_{int} = 5500 - 3.57 \cdot \text{TWT}$  bij een TWT-interval  $< 280^\circ\text{ms}$
- Voor de Boven Rotliegend Groep (RO) werd geen tijd/diepte conversie gedaan vanwege het ontbreken van TWT-waarden. Het (RO) is zeer dun binnen het onderzoeksgebied. In diepboring NVG-01 werd de Boven Rotliegend Groep met een dikte van ongeveer  $20^\circ\text{m}$  waargenomen, wat overeenstemt met een TWT-dikte van ongeveer  $12^\circ\text{ms}$  op een  $Z_{mid}$  diepte van ongeveer  $1100^\circ\text{m}$  met een  $V_0$  van  $3209^\circ\text{m/s}$  en een  $k$  van  $0.309^\circ\text{s}^{-1}$  (Pluymaekers et al., 2017). Met deze TWT-dikte is het (RO) op de seismische secties niet te onderscheiden van de reflector die overeenstemt met de basis van de Zechstein Groep.



Figuur 15: Schematisch overzicht van de work flow bij het hanteren van de V0 en k waarden voor de tijd-diepte conversie.

### 5.3. OPPERVLAKTESNELHEID EN SNELHEIDSGRADIËNT VOOR DE LIMBURG GROEP

Voor pakket 9 uit het velmod model werden de  $V_{int}$ ,  $V_0$ - en k-waarden geactualiseerd in ten Veen et al. (2019). Volgende conclusies werden getrokken in het rapport:

- gebruik van één  $V_0$ - en k-waarde voor de Caumer Subgroep en Geul Subgroep
- plaatsafhankelijkheid van  $V_{int}$ ,  $V_0$  en k
  - o opdeling in klassen overeenkomstig de aanwezige lithostratigrafische kolom
  - o opdeling in geïnverteerde en niet geïnverteerde gebieden
- de standaarddeviatie op  $V_{int}$  bedraagt ongeveer 294 m/s, maar varieert per klasse

Tabel 11: De gemiddelde afwijking (Average) van het massacentrum, voor wat  $V_{int}$  van de verschillende klassen betreft, ten opzichte van de regressie lijn en de standaarddeviatie (StDev) van de verschillende klassen op  $V_{int}$  van de Limburg Groep, waarbij blauwe de niet geïnverteerde klassen voorstellen (ten Veen et al., 2019).

w.r. regression	All wells	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6
Average (m/s)	0	-76	-99	-11	203	163	26
StDev (m/s)	294	264	297	261	255	305	207

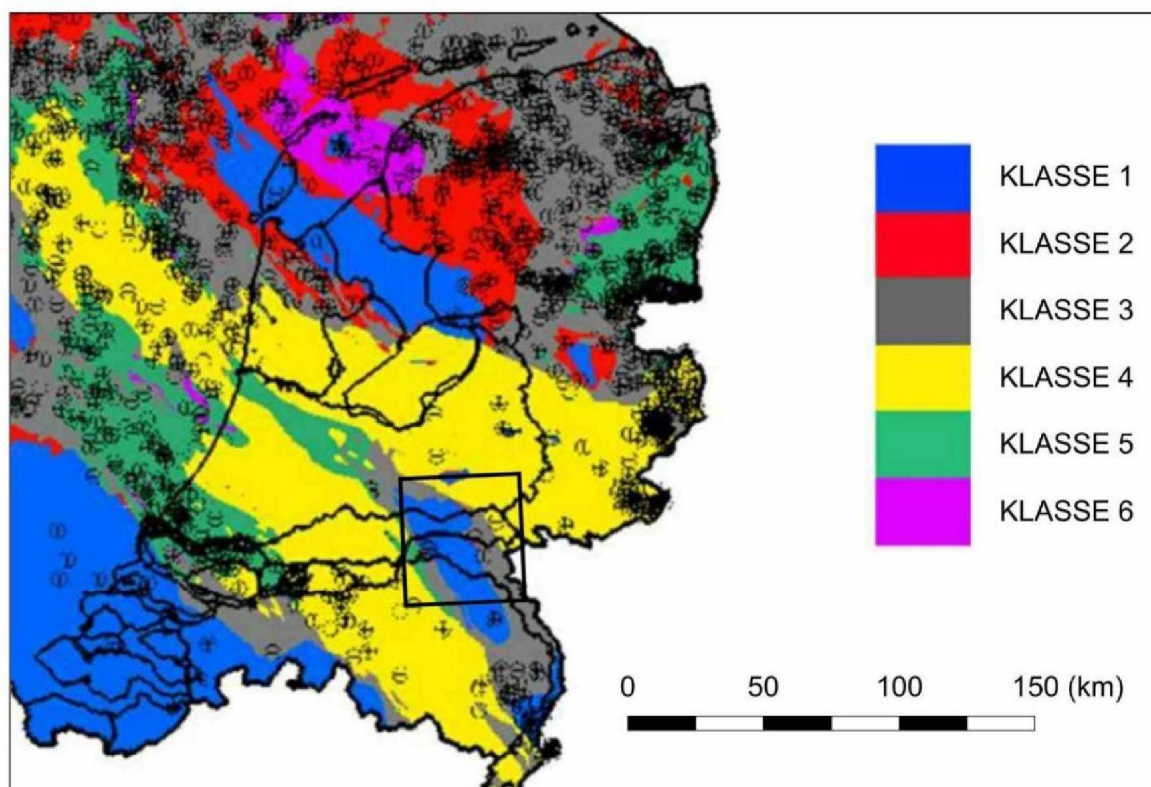
Op basis van alle beschikbare data worden voor de Limburg Groep volgende waarden voor  $V_0$  en k bekomen (all areas):

- $V_0$ : 3448 (m/s)
- k: 0.2524 (1/s)

In geval enkel de observaties in de niet geïnverteerde gebieden in rekening gebracht worden, krijgt men volgende resultaten (non-inverted areas):

- $V_0$ : 3213 (m/s)
- k: 0.3188 (1/s)





*Figuur 16: De situering van het onderzoeksgebied binnen de opdeling in klassen overeenkomstig de aanwezige lithokolom, waarbij klasse 4 en 5 de geïnverteerde gebieden voorstellen (ten Veen et al., 2019).*

Voor de tijd/diepte conversie van de Limburg Groep werd er gekozen voor de “all areas” waarden. Gebaseerd op figuren 12 en 13 uit Kombrink et al. (2012) en figuur 1 uit Bekesi et al. (2020) ligt het modelgebied immers voor 75% binnen het PMC dat gelegen is binnen klassen 1 en 3 en voor 25% in het CNB dat deel uitmaakt van klasse 4. Klassen 1 en 3 behoren tot de niet geïnverteerde gebieden terwijl klasse 4 tot de geïnverteerde gebieden gerekend wordt. Op basis van de gemiddelde standaarddeviatie op  $V_{int}$  (260°m/s) van de 3 klassen kan een inschatting gemaakt worden van de foutenmarge waarmee rekening dient gehouden op elke plaats van het model-raster.

Ter hoogte van de onderzochte sites in Renkum en Nijmegen werd er voor de 3 opties voor de top van de Kolenkalk Groep ook de berekening gemaakt met de  $V_0$ - en  $k$ -waarde voor niet geïnverteerde gebieden alleen. Dit om een idee te geven van de impact die het gebruik van de verschillende waarden heeft op de diepte van de target (zie hoofdstuk 10). Zodoende wordt nog een beter inzicht gekregen op de mogelijke foutenmarge die in rekening dient gebracht bij het lezen van het diepte-model.

## HOOFDSTUK 6. DIEPTE-MODEL

## 6.1. PROCEDURE

Vertrekkend van de TWT tijd-rasters werden via de tijd/diepte conversie met bovenstaande formules en parameterwaarden diepte-rasters aangemaakt. Het referentieniveau van de nieuwe seismische lijnen werd op 0°m NAP gelegd (DUG, 2020). Omzetting van tijd-rasters naar diepte-rasters resulteert bijgevolg rechtstreeks in een diepte-raster in (m) onder NAP. De diepte is dan ook positief uitgedrukt. De diepte van een welbepaalde laag ten opzichte van het maaiveld wordt dus verkregen door de som van de maaiveldhoogte en de waarde van het diepte-raster op de gewenste locatie.

Voor de tijd/diepte conversie van de tijd-rasters naar diepte-rasters werd een Excel-bestand aangemaakt met als brondata de X- en Y-coördinaten, de TWT-waarde van de basis, de  $V_{int}$ -waarde uit de  $V_{int}$ -kaart, de landelijke  $V_{int}$ -waarde, de  $V_0$ -waarde uit de  $V_0$ -kaart, de landelijke  $V_0$ -waarde en de k-waarde van de rasterpunten per model-laag. Hieruit werd vooreerst de TWT-dikte en de TWT-waarde voor de top berekend van elke model-laag. Op basis hiervan werd dan vanaf maaiveld naar onder toe per model-laag het diepte-raster berekend met de formule van Japsen (1993). Hierbij werd het diepte-raster van de eerste eenheid een invoer-gegeven voor de berekening van het diepte-raster van de tweede eenheid, enzovoort (Figuur 17).



Figuur 17: Work flow voor het omzetten van de TWT rasters naar diepterasters.

## 6.2. CALIBRATIE AAN DIEPBORINGEN

Het verkregen diepte-raster werd voor elke model-laag op diepte getoetst aan de diepboringen aanwezig in het rechthoekige model-gebied. Tabel 11 geeft de diepboringen weer samen met de



doorsneden velmod eenheden en de uiteindelijk aangeboorde velmod eenheid volgens van Dalftsen et al. (2006).

*Tabel 12: De diepboringen gebruikt bij de calibratie van het diepte-model, met de verticale diepte van de boringen, de lithocode van de aangeboorde lithologische eenheid en de codes voor de doorboorde en aangeboorde velmod eenheden.*

NAAM	CODE	X (m) RD	Y (m) RD	Z (m) NAP	DIEPTE (m) TVD	LITHOCODE	DOOR VELMOD EENHEDEN	AANGEBOORDE EENHEID
ARNHEM-01	AHM-01	190910	437930	11,01	662	NMRFC	1a	1b
ALTFORST-01	ALT-01	166320	429120	7	654	CKGR	1a, 1b	2
MAASBOMMEL-01	MSB-01	164203	427638	8,5	1713,5	ZEZ3C	1a, 1b, 2, 3a, 6a, 6b	7
MAASBOMMEL-02	MSB-02	164883	429301	9,5	1278	DCCB	1a, 1b, 2, 3a	9
NUMEGEN-VALBURG-01	NVG-01	182939	432783	15,35	1277	DCCU	1a, 1b, 2, 3b, 6b, 7, 8	9
SANADOME-GT-01	SNM-GT-01	185710	425810	15,35	759	CKGR	1a, 1b	2

Voor elk van de gemodelleerde eenheden werd een verschil berekend tussen de diepte in (m) NAP vastgesteld in de diepboring en de diepte in (m) NAP uit de diepte-rasters. Tabel 12 geeft een overzicht van het verschil per diepboring en per velmod eenheid, zoals berekend op basis van de diepte-rasters na de tijd/diepte conversie uit de tijd-rasters, met andere woorden zonder verdere bewerkingen op de rasters. Per diepboring geeft rij 1 de in de boring waargenomen diepte van de velmod eenheid weer zoals gemeten vanaf maaiveld, rij 2 de diepte zoals gemeten ten opzichte van NAP, rij 3 de diepte uit het dgm diep v5 model en rij 4 het verschil in (m) tussen de waarden uit rij 2 en rij 4 of het verschil tussen de waarneming in de diepboring en de diepte uit het dgm diep v5, rij 5 de diepte uit het diepte-raster en rij 6 het verschil in (m) tussen de waarden uit rij 2 en rij 5 of het verschil tussen de waarneming in de diepboring en de diepte uit het model na de tijd/diepte conversie. In de kolom MV wordt de hoogte van het referentieniveau van de diepboring aangegeven zoals afkomstig uit de boorstaten van het NLOG portaal en de hoogte van het maaiveld afkomstig van het AHN.

Uit de tabel komt naar voor dat er zich verschillen tot ongeveer 90°m voordoen. Er worden zowel positieve als negatieve waarden vastgesteld voor elke model-eenheid. Een positieve verschilwaarde geeft aan dat de model-eenheid ter hoogte van de diepboring dieper ligt dan vastgesteld in de diepboring. Een negatieve verschilwaarde geeft aan dat de model-eenheid ter hoogte van de diepboring minder diep ligt dan aangegeven door de waarneming in de diepboring. Waarschijnlijk zijn er meerdere bronnen die aan de basis van deze verschillen liggen zoals; de TWT-interpretatie van een model-eenheid op de seismische secties, de interpolatie van de TWT-waarden tot TWT-rasters, de eerder zwakke correlatie tussen de snelheid en de diepte vervat in de k-waarde van een model-eenheid, de interpolatie van de  $V_0$ - en  $V_{int}$ -waarden tot de  $V_0$ - en  $V_{int}$ -kaarten, ... Het is moeilijk om de concrete bijdrage aan het verschil van elk van deze factoren in te schatten. Er kan wel gesteld worden dat het verschil niet het gevolg is van een systematische verkeerde reflectorkeuze (te diepe of ondiepe) bij de interpretatie, aangezien in dat geval verwacht wordt dat het verschil steeds eenzelfde teken zou hebben.

Het verschil werd aan de hand van een iteratief proces van boven naar onder per model-eenheid verdeeld over de diepte-rasters. Volgende procedure werd hierbij gevolgd:

- het verschil werd proportioneel gemaakt t.o.v. de model-dikte uit het dikte-raster
- een proportioneel verschil-raster werd aangemaakt door middel van een standaard Kriging interpolatie tussen de proportionele verschillen ter hoogte van de diepboringen
- een verschil-raster werd aangemaakt als product van het dikte-raster en het proportionele verschil-raster
- een nieuwe dikte-raster werd gecreëerd aan de hand van de som van het oude dikte-raster en het verschil-raster



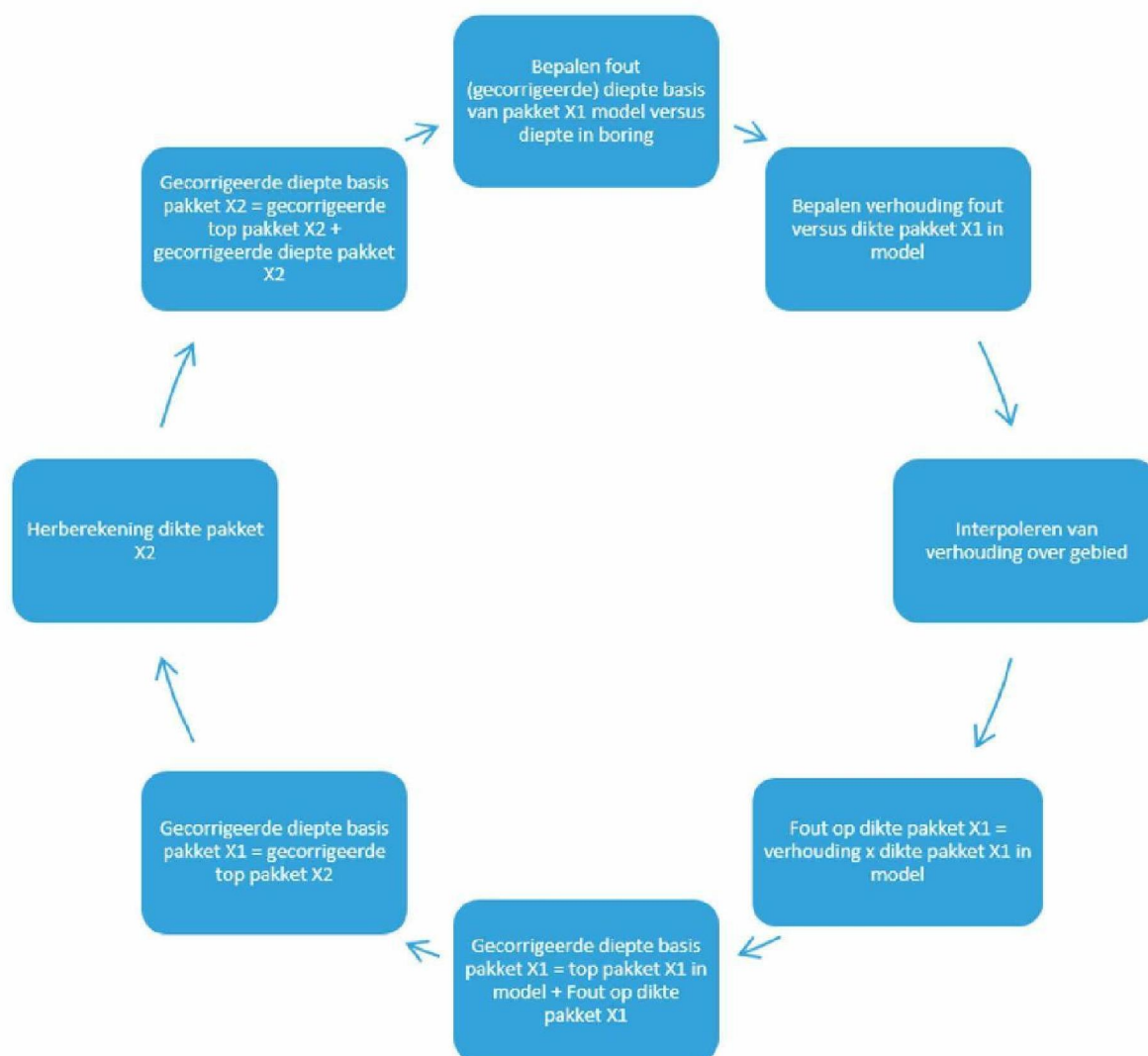
- een nieuwe diepte-raster is het resultaat van de som van het bovenliggend diepte-raster en het nieuwe dikte-raster van de model-eenheid

Tabel 13: De diepboringen met de diepte van de aangeboorde lithostratigrafische eenheden, de diepte in het dgm diep v5 model en de diepte in het model uit dit onderzoek evenals het verschil ten opzichte van de waarneming in de diepboringen bij aanvang van het iteratief proces.

NAAM	RIJ	WAT	MV	NU	NMNL	CK	KN	RB	ZE	RO	DC
AHM-01	1	AHM-01	11,01	501	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	2	NAP	11,01	489,99	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	3	dgm v5		489,67	885,12	-9999	-9999	1049,61	1119,21	1139,09	1139,09
	4	D-V5		-0,32	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	5	model	9,23	478,56	902,54	-9999	-9999	914,78	1024,96	1044,84	1044,84
	6	D-NAP	-1,78	-11,43	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
ALT-01	1	ALT-01	7	288	453	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	2	NAP	7	281	446	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	3	dgm v5		294,56	451,79	1056,42	1115,87	-9999	-9999	-9999	1115,87
	4	D-V5		13,56	5,79	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	5	model	5,47	303	526	1038	1179	-9999	-9999	-9999	1179
	6	D-NAP	-1,53	22	80	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
MSB-01	1	MSB-01	8,5	360	580	1089	1204	1691	-9999	-9999	-9999
	2	NAP	8,5	351,5	571,5	1080,5	1195,5	1682,5	-9999	-9999	-9999
	3	dgm v5		355,29	575	1082	1206,21	1599,26	1758,25	1825,73	1825,73
	4	D-V5		3,79	3,5	1,5	10,71	-83,24	-9999	-9999	-9999
	5	model	4,96	367	590	1079	1215	-9999	-9999	-9999	1215
	6	D-NAP	-3,54	15,5	18,5	-1,5	19,5	-9999	-9999	-9999	-9999
MSB-02	1	MSB-02	9,5	356	500	932	1041	-9999	-9999	-9999	1041
	2	NAP	9,5	346,5	490,5	922,5	1031,5	-9999	-9999	-9999	1031,5
	3	dgm v5		335,78	519,31	933,52	1024,65	-9999	-9999	-9999	1024,65
	4	D-V5		-10,72	28,81	11,02	-6,85	-9999	-9999	-9999	-6,85
	5	model	4	345	517	907	1013	-9999	-9999	-9999	1013
	6	D-NAP	-5,5	-1,5	26,5	-15,5	-18,5	-9999	-9999	-9999	-18,5
NVG-01	1	NVG-01	15,35	427	693	780	889	984	1101	1119	1119
	2	NAP	15,35	411,65	677,65	764,65	873,65	968,65	1085,65	1103,65	1103,65
	3	dgm v5		411,41	676,82	770,15	880,88	964,49	1080,89	1094,01	1094,01
	4	D-V5		-0,24	-0,83	5,5	7,23	-4,16	-4,76	-9,64	-9,64
	5	model	8,56	400	659	812	859	1037	1173	1192	1192
	6	D-NAP	-6,79	-11,65	-18,65	47,35	-14,65	68,35	87,35	88,35	88,35
SNM-GT-01	1	SNM-GT-01	15,35	370	693	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	2	NAP	15,35	354,65	677,65	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	3	dgm v5		356,43	681,1	1173,87	1313,97	1352,78	1365,67	1379,73	1379,73
	4	D-V5		1,78	3,45	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
	5	model	17,35	323	628	1114	1229	1329	1404	1417	1417
	6	D-NAP	2	-31,65	-49,65	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999

In geval van de bovenste model-eenheid is het bovenliggend diepte-raster het 0 (m) NAP raster. Na de aanpassing van het diepte-raster van de bovenste model-eenheid, dient dit resultaat als nieuwe invoer in het Excel-bestand voor een nieuwe tijd/diepte conversie van het onderliggende tijd-raster. Het hieruit resulterende diepte-raster dient opnieuw getoetst aan de diepboringen. Het verschil wordt opnieuw verdeeld over het diepte-raster volgens dezelfde procedure als hierboven beschreven. Dit wordt dan weer herhaald tot de diepte-rasters van alle model-eenheden in overeenstemming zijn met de dieptes waargenomen in de diepboringen. Op deze wijze blijven de ruimtelijke verhoudingen tussen de model-eenheden zoals waargenomen op de seismische secties bewaard in de diepte-rasters. De model-eenheden verdwijnen niet lokaal, noch komen er lokaal voorkomens van model-eenheden bij, zoals bij de verdeling van een absoluut verschil wel het geval zou zijn. Figuur 18 geeft een schematische voorstelling van de gevolgde work flow bij de verdeling van de verschillen weer.





Figuur 18: Schematische voorstelling van de work flow voor het calibreren aan de boringen (correctie op dikte).

## HOOFDSTUK 7. BESPREKING VAN HET DIEPTE-MODEL

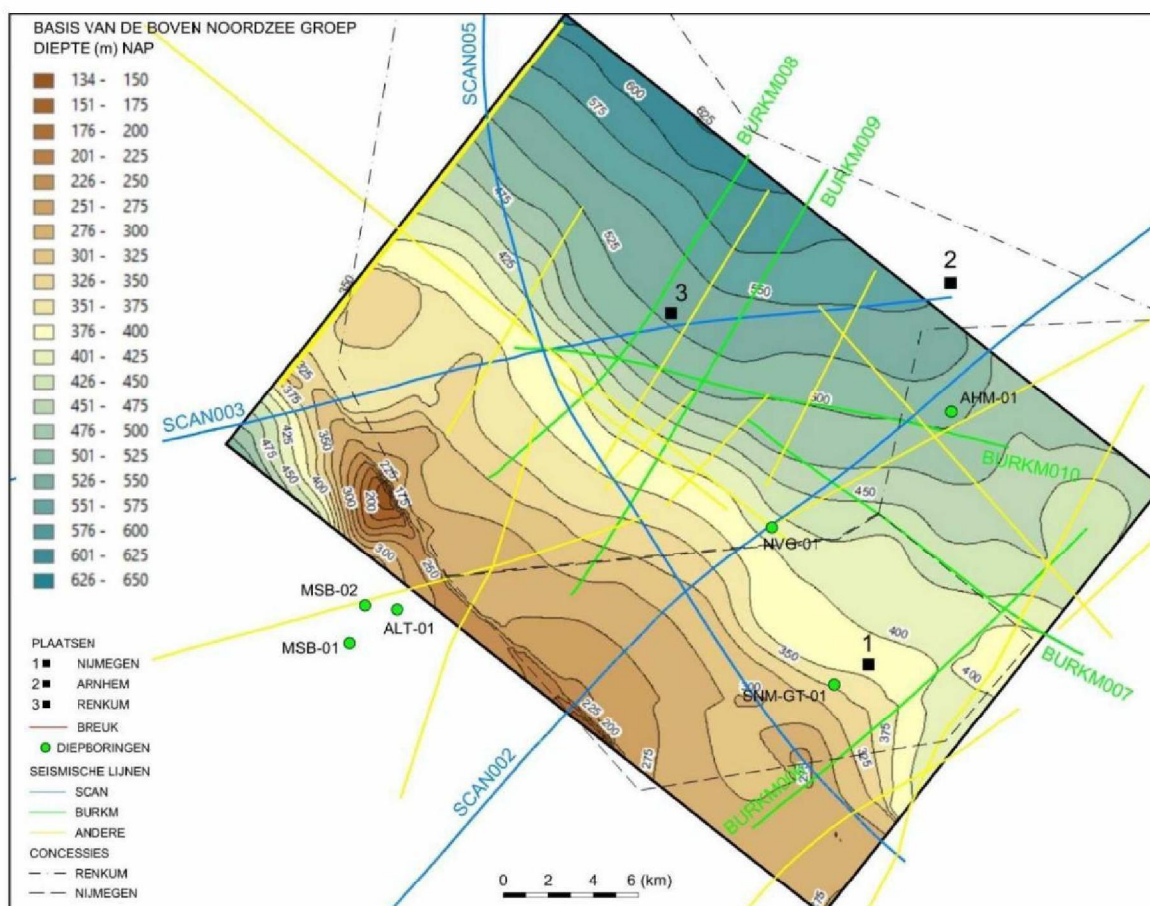
## 7.1. ALGEMEEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de geologische modellering kort besproken. Hierbij worden per model-eenheid de allure van het basisvlak, de aanwezigheid van breuken, het voorkomen binnen het studiegebied en de stratigrafische koppeling aan diepboringen aangehaald. Bij de bespreking handelt het steeds:

- over de oppervlakte binnen het model-gebied, tenzij expliciet anders vermeld
- over de basis van de model-eenheid, tenzij dit expliciet anders vermeld wordt

## 7.2. DE ONDIEPE MODEL-EENHEDEN

In dit rapport worden onder ondiepe model-eenheden alle gesteentepakketten verstaan die boven het topvlak van de Limburg Groep gelegen zijn. Ze worden van boven naar onder behandeld.

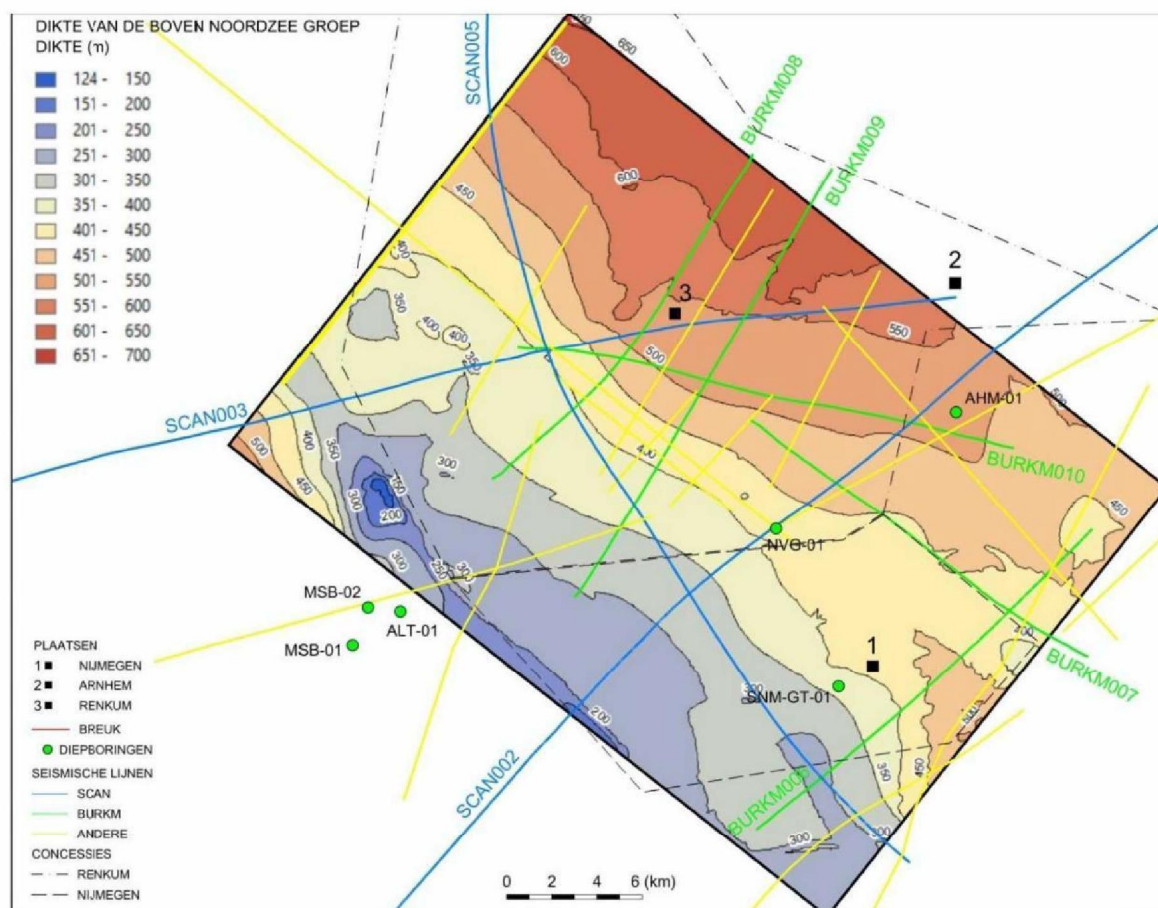


Figuur 19: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Boven Noordzee Groep.



### 7.2.1. BOVEN NOORDZEE GROEP (NU)

De top van de Boven Noordzee Groep wordt gevormd door het huidige maaiveld. Met uitzondering van het noordoosten van het model-gebied boven Renkum en het zuidoosten van het model-gebied onder Nijmegen ligt het maaiveld ongeveer tussen 5°m en 10°m NAP (zie figuur 1). De top van de Boven Noordzee Groep wordt er gevormd door de fluviatiele en alluviale sedimenten van de Maas, Waal en Nederrijn. In de 2 voornoemde zones kan het reliëf tot een hoogte van 90°m opklimmen. De topografie wordt er bepaald door sedimenten van de stuwwallen van het Saale glaciaal. Het basisvlak van de Noordzee Groep ligt op ongeveer 150°m onder NAP in het westen van het model-gebied ten noorden van Maasbommel en daalt naar het noordoosten tot ongeveer 600°m onder NAP op het noordelijke uiteinde van lijnen BURKM008 en BURKM009.

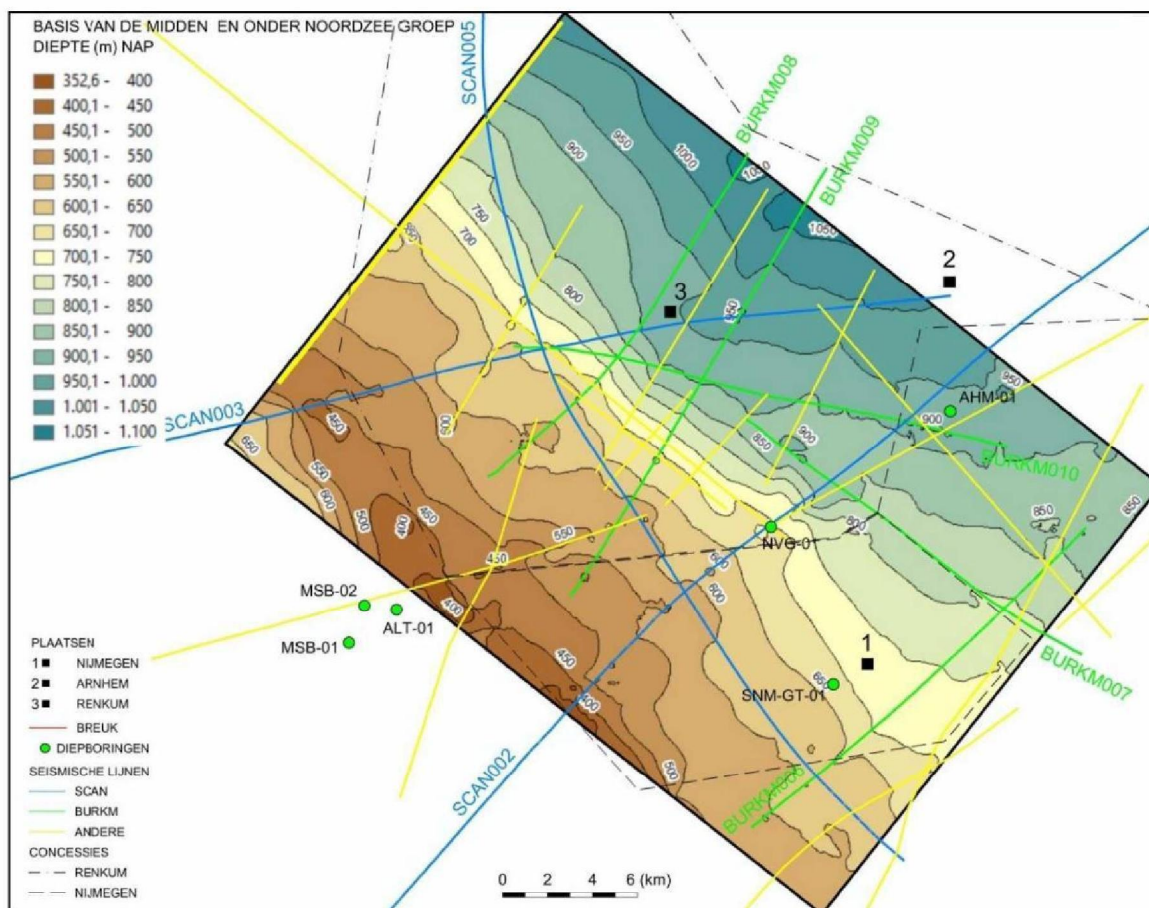


Figuur 20: De dikte (m) van de Boven Noordzee Groep.

Ter hoogte van Renkum, op de kruising tussen lijnen BURKM008 en SCAN003, ligt het vlak op ongeveer 500°m onder NAP. De model-eenheid is ongeveer 150°m dik in het westen en wordt dikker naar het noordoosten toe waar een maximale dikte bereikt wordt van ongeveer 650°m. Hoewel er voorkomen aan de westelijke grens van het model-gebied werden er geen breuken gemodelleerd voor de Noordzee Supergroep (zie 4.1.). Het basisvlak van de Boven Noordzee Groep kon lithostratigrafisch gekoppeld worden aan diepboringen AHM-01, ALT-01, MSB-01, MSB-02, NVG-01 en SNM-GT-01.

### 7.2.2. MIDDEN EN ONDER NOORDZEE GROEP (NMNL)

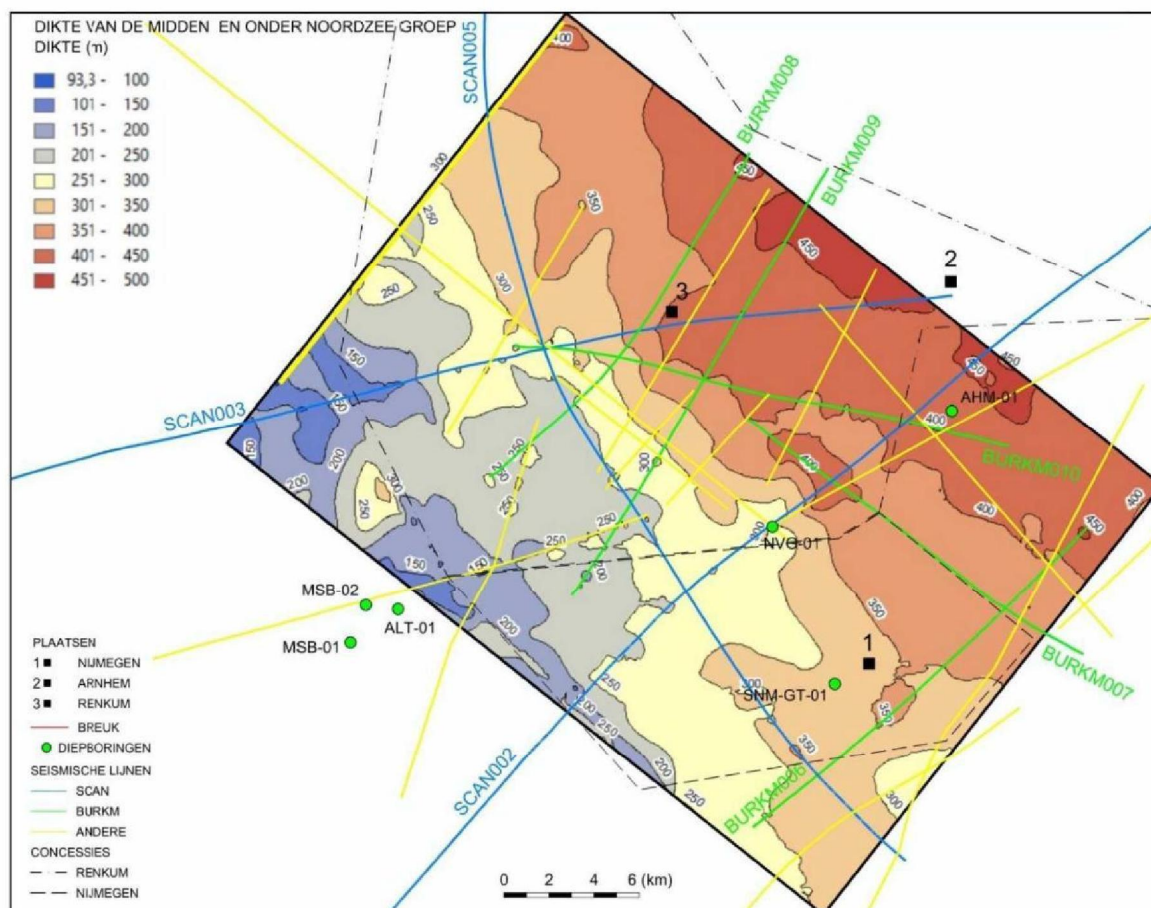
De top van de Midden en Onder Noordzee Groep wordt gevormd door het basisvlak van de Boven Noordzee Groep. Het basisvlak van de Midden en Onder Noordzee Groep ligt op ongeveer 400°m onder NAP in het westen van het model-gebied ten oosten van Altforst. Het basisvlak daalt vandaar naar het noordoosten waar het ter hoogte van de noordelijke uiteinden van lijnen BURKM008 en BURKM009 op een diepte van ongeveer 1050°m onder NAP komt te liggen. Ter hoogte van Renkum ligt de basis op ongeveer 900°m onder NAP.



Figuur 21: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Midden en Onder Noordzee Groep.

In het westen van het model-gebied heeft de gemodelleerde eenheid een minimale dikte van ongeveer 150°m. Net als de Boven Noordzee Groep verdikt deze eenheid naar het noordoosten waar ze nabij de grens van het modelgebied een maximale dikte bereikt van ongeveer 450°m. Hoewel er breuken voorkomen aan de westelijke grens van het model-gebied werden ze niet gemodelleerd voor de Noordzee Supergroep (zie 4.1.). Het basisvlak van de Midden en Onder Noordzee Groep kon lithostratigrafisch gekoppeld worden aan diepboringen ALT-01, MSB-01, MSB-02, NVG-01 en SNM-GT-01.

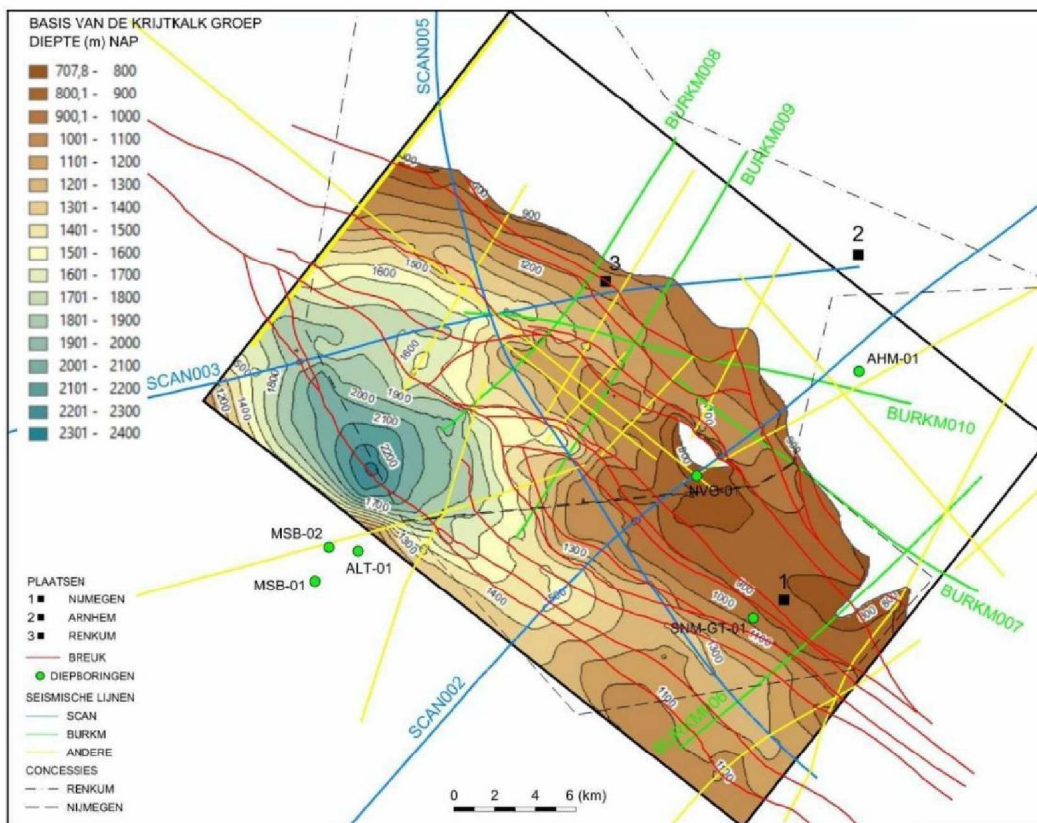




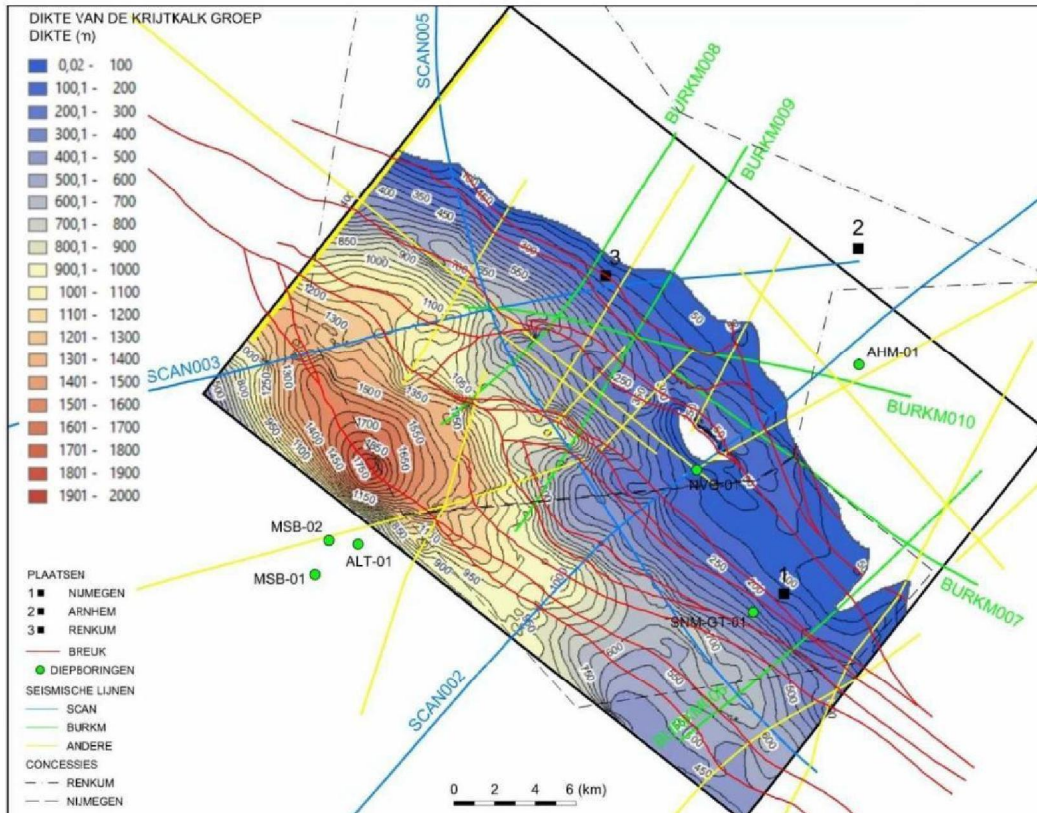
Figuur 22: De dikte van de Midden en Onder Noordzee Groep.

### 7.2.3. KRIJTKALK GROEP (CK)

De Krijtkalk Groep komt voor over drie kwart van het model-gebied. In het noordoosten ontbreekt ze. De subcropgrens van de Krijtkalk Groep onder de Noordzee Supergroep ligt ongeveer ter hoogte van de overgang van het PMC naar het CNB. Het CNB kende tijdens het Krijt een inversieperiode waardoor daar weinig of geen sedimenten van de Krijtkalk Groep afgezet of bewaard zijn. De sedimenten van de Krijtkalk Groep liggen bijgevolg hoofdzakelijk op het PMC. Lokaal, net ten noorden van NVG-01, ontbreekt de Krijtkalk Groep ook op het PMC. De sedimenten zijn daar in een pop-up structuur tegen de noordelijke grensbreuk opgeduwd en later lokaal door pre-Paleogene erosie verwijderd. Door dit venster in de Krijtkalk Groep komt het basisvlak van de Noordzee Supergroep rechtstreeks op de sedimenten van de Onder Germaanse Trias Groep te liggen. Elders vormt dit basisvlak de top van de Krijtkalk Groep. Het basisvlak van de Krijtkalk Groep ligt op ongeveer 800°m onder NAP in het zuidoosten van het model-gebied en duikt algemeen naar het noordwesten tot een diepte van 2300°m onder NAP ten noorden van Maasbommel en Altforst. Meer in detail bestaat het basisvlak uit twee opwellingen of antiforme structuren met een zuidoost-noordwest oriëntatie geflankeerd door drie synforme structuren. Deze structuren worden afgelijnd door een reeks breuken langswaar de opwellingen als pop-up structuren zijn opgeduwd. De naast en tussen gelegen zones zijn laagten gebleven. Ze vormen de synforme structuren en dalen in noordwestelijke richting waar ze ten noorden van Maasbommel en Altforst samenkomen in een komvormig diep.



Figuur 23: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Krijtkalk Groep.



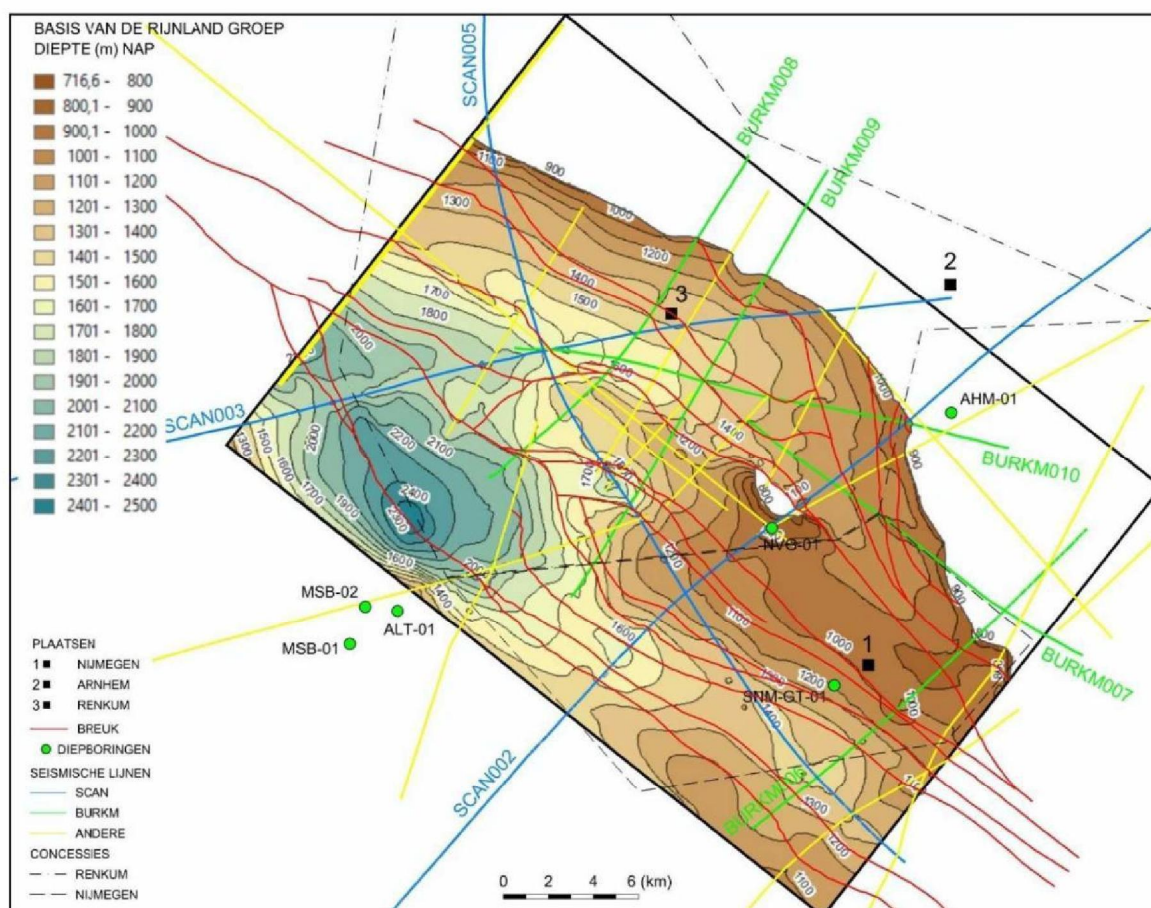
Figuur 24: De dikte van de Krijtkalk Groep.



Ten zuiden van Renkum draaien de pop-up structuren naar het westen en botsen de flankerende breuken op een zuidoost-noordwest georiënteerde breuk die het komvormige diep ten noordoosten afboordt. Nabij Renkum ligt de basis op ongeveer 1200°m onder NAP. De dikte van het pakket loopt van 0°m in het oosten op tot 1900°m in het centrum van het komvormige diep. Meer in detail spiegelt de dikteverdeling de vorm van het basisvlak van de Krijtkalk Groep aangezien de top gevormd wordt door de vrij vlakke en zachthellende basis van de Noordzee Supergroep. Het basisvlak van de Krijtkalk Groep kon lithostratigrafisch gekoppeld worden aan diepboringen MSB-01, MSB-02 en NVG-01.

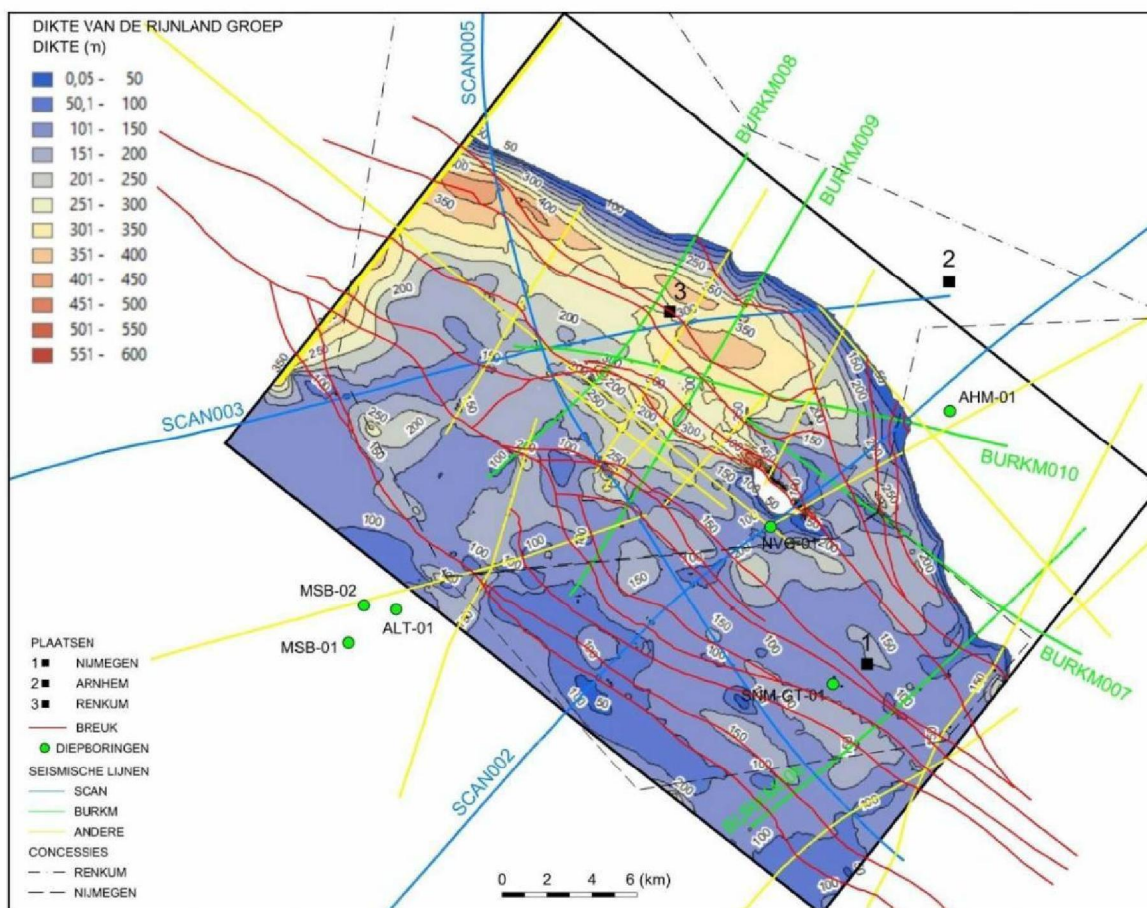
#### 7.2.4. RIJNLAND GROEP (KN)

Net als de Krijtkalk Groep komt de Rijnland Groep voor over ongeveer drie kwart van het modelgebied. De subcropgrens van dit gesteentepakket ligt iets meer naar het noordoosten dan die van de Krijtkalk Groep, maar ligt nog steeds ter hoogte van de overgang van het PMC naar het CNB. Net als voor de Krijtkalk Groep ontbreken de sedimenten van de Rijnland Groep ook net ten noorden van NVG-01 en komen de afzettingen van de Noordzee Supergroep er rechtstreeks op de gesteenten van de Onder Germaanse Trias Groep te liggen. Het basisvlak ligt op ongeveer 900°m onder NAP in het zuidoosten van het model-gebied en duikt algemeen in noordwestelijke richting tot een diepte van 2400°m onder NAP ten noorden van Maasbommel en Altforst. Meer in detail heeft het basisvlak een gelijkaardige structuur als dat van de Krijtkalk Groep. Ter hoogte van Renkum ligt de basis op van de Rijnland Groep op ongeveer 1500°m onder NAP.



Figuur 25: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Rijnland Groep.

De dikte van het gesteentepakket loopt op van 0°m in het oosten bij de subcropgrens tot een quasi constante gemiddelde dikte van ongeveer 150°m onder het voorkomen gebied van de Krijt kalk Groep. Enkel ten noordoosten van de breuk die de noordelijke pop-up structuur langs de noordzijde afboordt, is er noordwaartse toename in dikte tot 400°m nabij de subcropgrens van de Krijt kalk Groep. Deze grotere dikte zou kunnen overeenkomen met de aanwezigheid van de Vlieland zandsteen. Het basisvlak van de Rijnland Groep kon lithostratigrafisch gekoppeld worden aan diepboringen MSB-01, MSB-02 en NVG-01.



Figuur 26: De dikte van de Rijnland Groep.

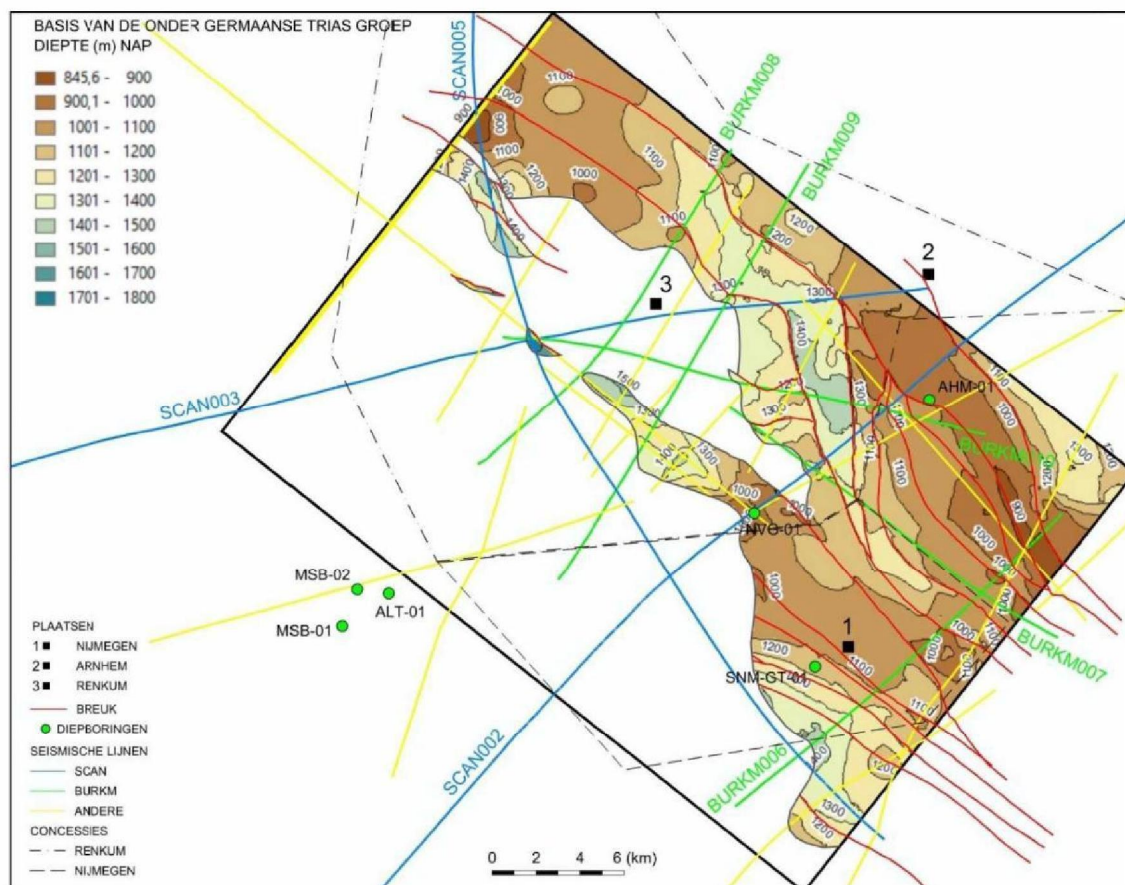
#### 7.2.5. ONDER GERMAANSE TRIAS GROEP (RB)

De Onder Germaanse Trias Groep komt voor in de noordoostelijk helft van het model-gebied. De subcropgrens van het gesteentepakket ligt onder de basis van de Rijnland Groep en ligt iets ten westen van diens subcropgrens. Net als in het geval van de twee vorige model-eenheden ligt deze subcropgrens ongeveer ter hoogte van de overgang tussen het PMC en CNB. De Onder Germaanse Trias Groep ligt binnen het model-gebied dus hoofdzakelijk binnen het CNB.

Het basisvlak van de groep is gelegen tussen 900°m en 1500°m onder NAP en vertoont geen algemene hellingsrichting. De diepteverdeling van de basis wordt voornamelijk bepaald door de aanwezigheid van horst- en graben-structuren en in mindere mate ook door antiforme- en synforme structuren die reeds in de basis van de bovenliggende Rijnland Groep en Krijt kalk Groep zichtbaar

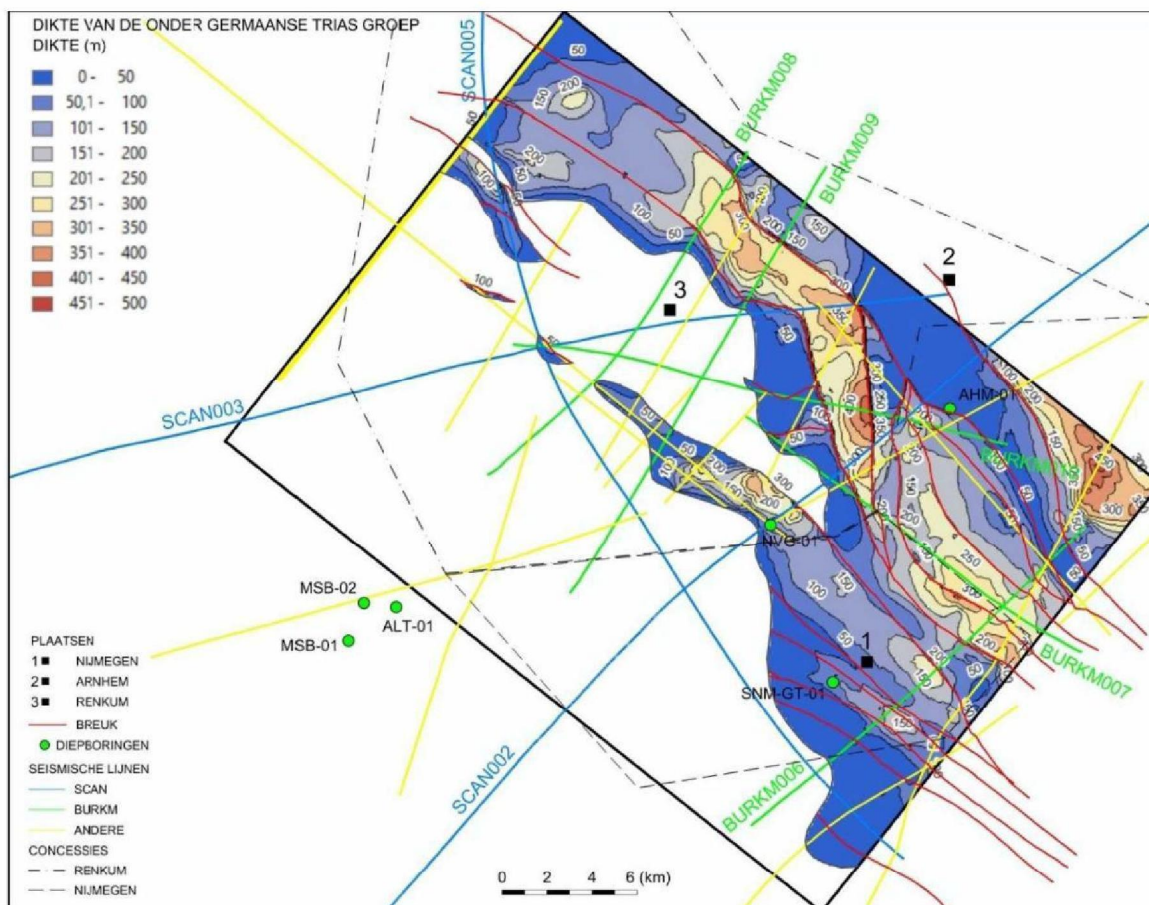


waren. Het basisvlak ligt het minst diep (900°m onder NAP) op een horst in het oostelijke uiteinde van het model-gebied. De westzijde van de horst wordt afgeboord door een zuidoost-noordwest georiënteerde en westhellende breuk die volgbaar is over de ganse lengte van het model-gebied. Naar het westen toe wordt deze breuk vanuit het zuidoosten gevolgd door een drietal oosthellende breuken langswaar de basis van de Onder Germaanse Trias Groep stapsgewijs dieper komt te liggen. Deze lopen in het noorden aan tegen de voornoemde grensbreuk van de horst. De volgende breuk helt naar het westen en vertoont in vergelijking tot voorgaande breuken, het grootste breukverzet. Ze vormt de oostgrens van een diepe zuid-noord georiënteerde graben waarin de basis van de model-eenheid op een diepte van 1400°m onder NAP ligt. Ter hoogte van seismische lijn SCAN003 verandert de graben van oriëntatie en komt er parallel met de grensbreuk van de horst te liggen. Binnen de graben klimt het basisvlak noordwaarts terug op tot 1000°m onder NAP. De westelijke grens van de graben wordt gevormd door een oosthellende breuk met een zuidoost-noordwest oriëntatie lokaal overgaand in een zuid-noord oriëntatie ter hoogte van het diepste deel van de graben. Daar wordt ook het grootste breukverzet aangetroffen (300°m à 400°m). Van daaruit neemt het breukbedrag in zuidelikoostelijke en noordwestelijke richting af en komt het basisvlak zowel binnen als buiten de graben op een diepte van ongeveer 1000°m onder NAP te liggen. Ten westen van de westelijke grabenbreuk wordt het reliëf van het basisvlak voornamelijk bepaald door voornoemde de antiforme en synforme structuren. Op de pop-up structuur wordt in het zuidoosten van het model-gebied een diepte van ongeveer 1000°m onder NAP aangetroffen, in de synforme structuren 1400°m onder NAP. De centrale zone van de noordelijke pop-up structuur geeft de meest westelijke verbreiding van de Onder Germaanse Trias Groep in het studiegebied aan. Binnen deze zone daalt de basis van de model-eenheid van 1000°m tot 1500°m onder NAP in noordwestelijke richting. Ter hoogte van Renkum komt van de Onder Germaanse Trias Groep niet voor.



Figuur 27: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Onder Germaanse Trias Groep.

De dikteverdeling van het pakket wordt voornamelijk bepaald door de horst- en graben-structuren. Op de horst-structuren wordt een dikte vastgesteld tussen 0°m tot 150°m. Centraal op de noordelijke pop-up worden diktes aangetroffen tot 250°m. In de graben-structuren loopt de dikte op tot 450°m. Binnen het model-gebied kon het basisvlak van de Onder Germaanse Trias Groep lithostratigrafisch enkel gekoppeld worden aan diepboring NVG-01.



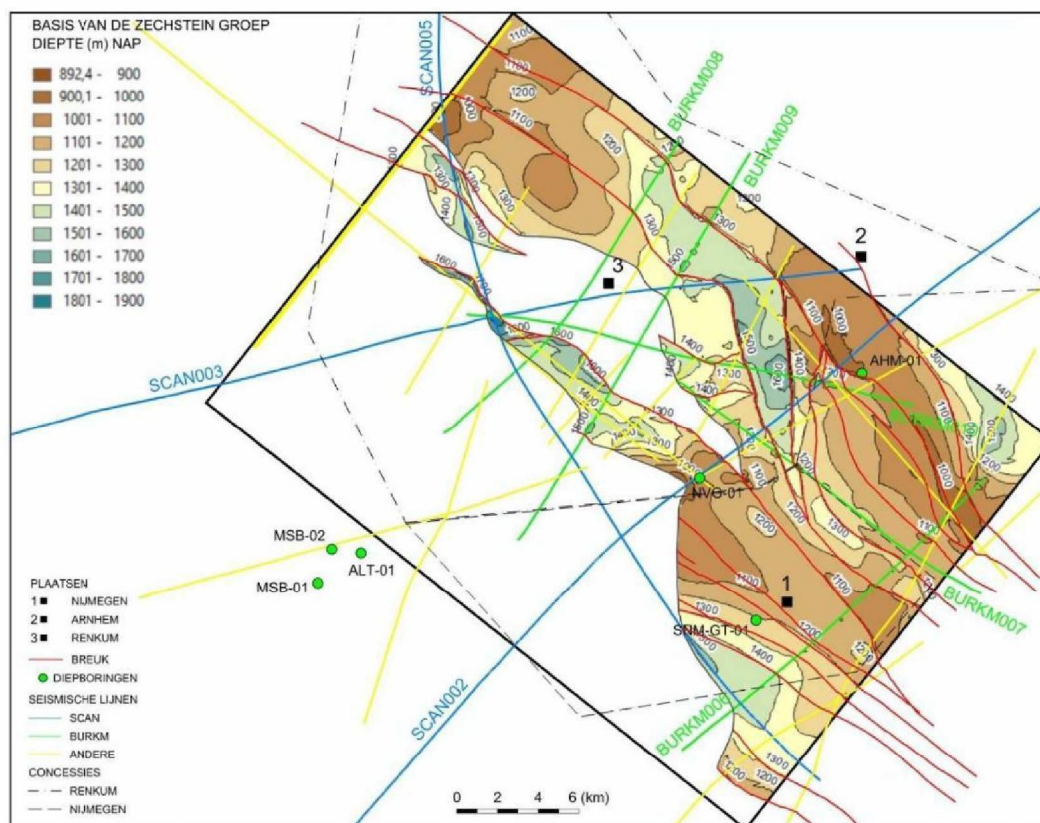
Figuur 28: De dikte (m) van de Onder Germaanse Trias Groep.

### 7.2.6. ZECHSTEIN GROEP (ZE)

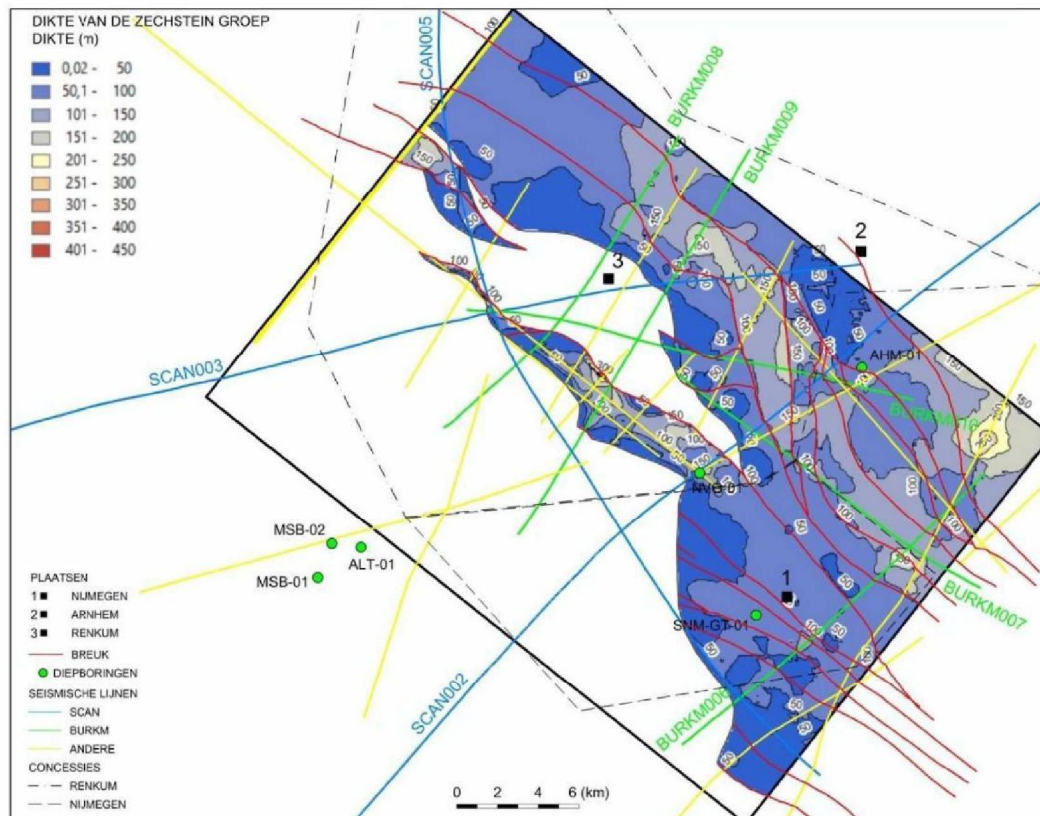
De Zechstein Groep heeft bijna een gelijkaardige verbreiding als de Onder Germaanse Trias Groep. De subcropgrens heeft ook een gelijkaardig verloop, maar ligt iets westelijker, nog steeds in het overgangsgebied tussen het CNB en PMC. De sedimenten van de Zechstein Groep liggen hoofdzakelijk in het CNB. Enkel op de centrale as van de noordelijke pop-up structuur en in het uiterste zuiden van het model-gebied komen de afzettingen nog voor op het PMC.

De basis van het gesteentepakket ligt tussen 1000°m en 1700°m NAP. Ook hier wordt het reliëf van het basisvlak voornamelijk bepaald door de horst- en graben-structuren en in mindere mate door de antiforne- en synforme-structuren. De kleinste diepte wordt aangetroffen op de horst in het oosten (1000°m onder NAP), de grootste diepte in de zuid-noord georiënteerde graben (1600°m onder NAP). De grabenbreuken vertonen er een maximaal breukverzet van 300°m à 400°m.





Figuur 29: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Zechstein Groep.



Figuur 30: De dikte (m) van de Zechstein Groep.

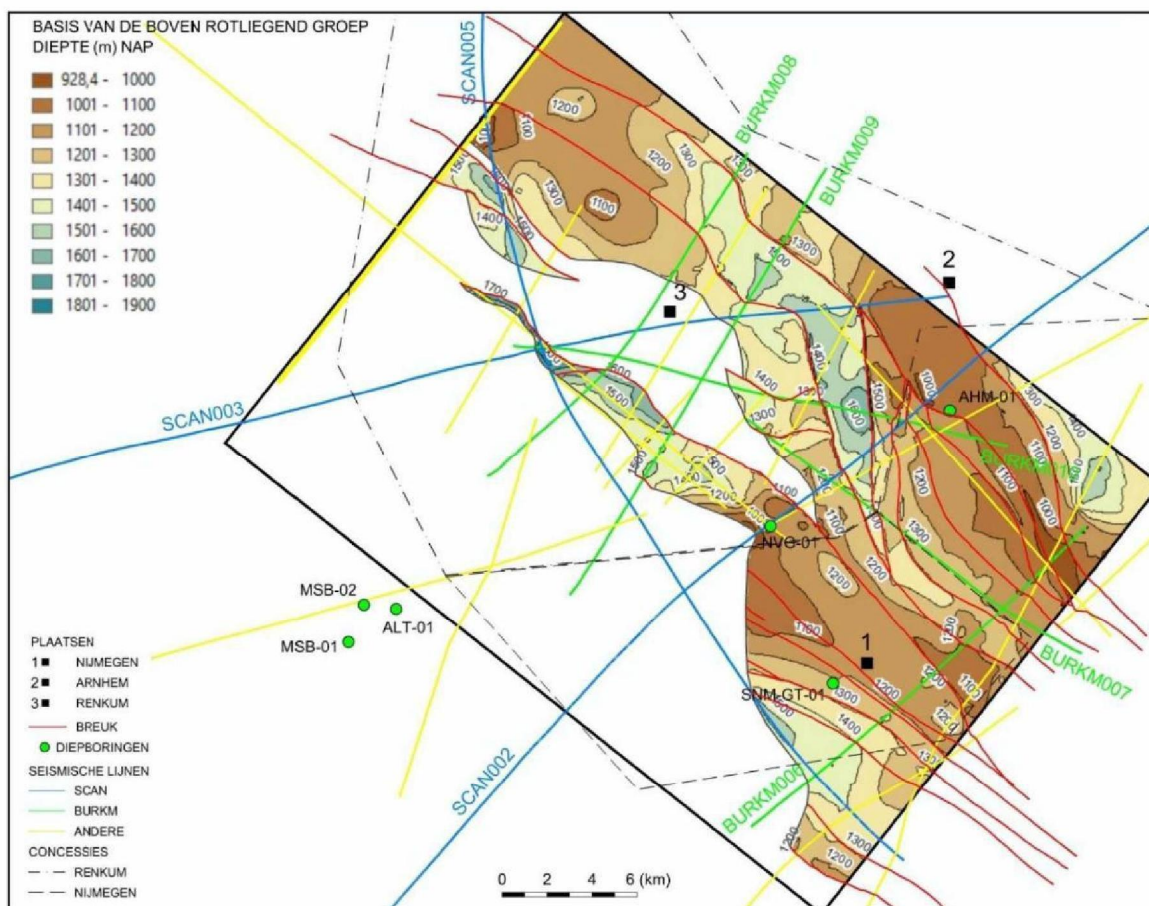
Op het PMC daalt het basisvlak op de noordelijke pop-up structuur van 1100°m naar 1600°m onder NAP in noordwestelijke richting. Verder wordt in de synforme structuur in het uiterste zuiden van het model-gebied een maximale diepte van 1500°m onder NAP aangetroffen. Ter hoogte van Renkum komen er geen sedimenten van de Zechstein Groep voor. De dikteverdeling van de model-eenheid wordt ook hier hoofdzakelijk bepaald door de horst- en graben-structuren. De horst-structuren worden gekenmerkt door een dikte van 0°m tot 50°m. Lokaal komen er diktes tot 100°m voor. In de graben-structuren worden diktes tot 200°m aangetroffen. Centraal op de noordelijke pop-up structuur komen er diktes tot 250°m voor.

Binnen het model-gebied werd het basisvlak van de Zechstein Groep lithostratigrafisch enkel gekoppeld aan diepboring NVG-01.

### 7.2.7. BOVEN ROTLIEGEND GROEP (RO)

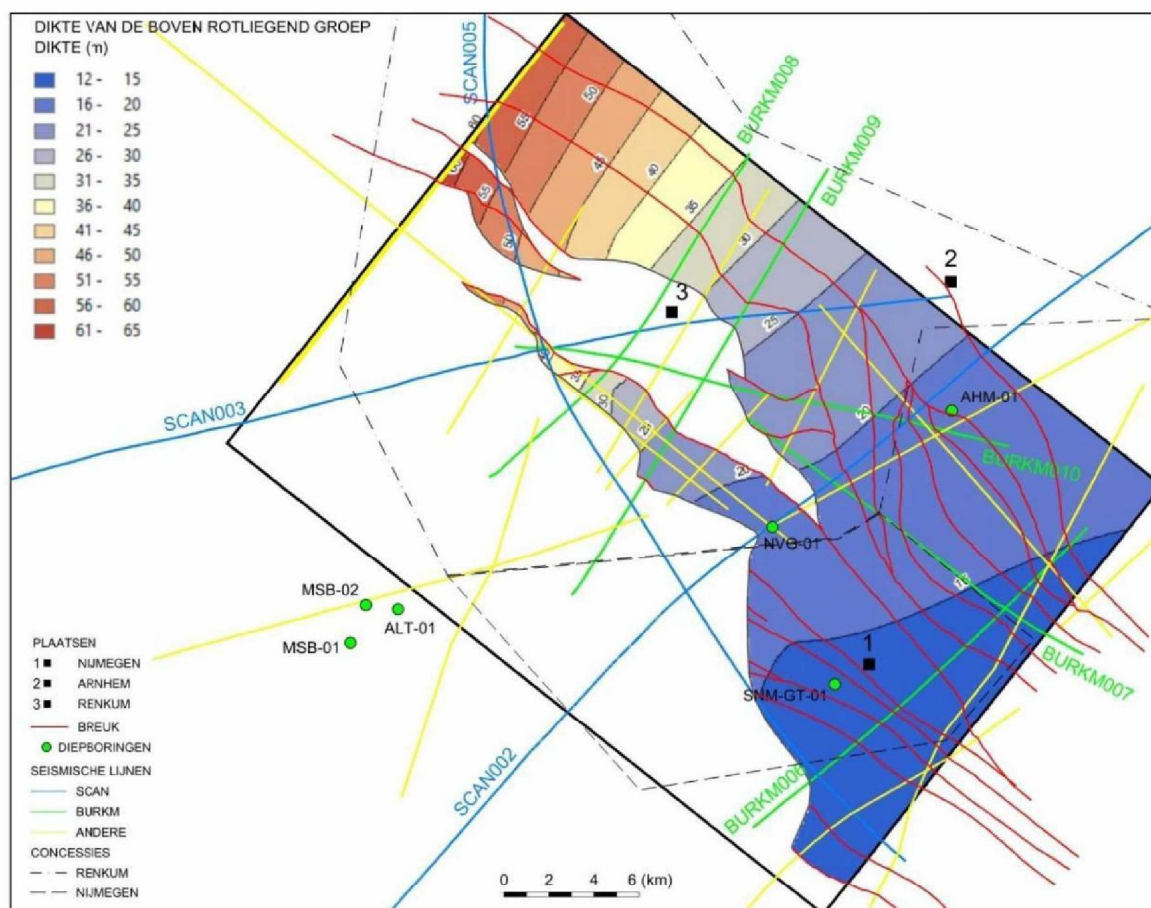
Het beeld verkregen van de Boven Rotliegend Groep is zeer gelijkaardig aan het beeld voor de Zechstein Groep. Het basisvlak vormt er quasi een kopie van, aangezien het is opgebouwd door de som te maken van het diepte-raster van de Zechstein Groep en het dikte-raster van de Boven Rotliegend Groep uit het dgm diep v5 model.

De dikte van de Boven Rotliegend Groep is eerder beperkt binnen het model-gebied en loopt er op van 15°m in het zuidoosten tot 60°m in het noordwesten. De allure van de basis van de Zechstein Groep blijft bijgevolg behouden. Het gesteentepakket komt niet voor ter hoogte van Renkum. De basis is lithostratigrafisch gekoppeld aan diepboring NVG-01.



Figuur 31: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Boven Rotliegend Groep.





Figuur 32: De dikte (m) van de Boven Rotliegend Groep.

### 7.3. DE DIEPE MODEL-EENHEDEN

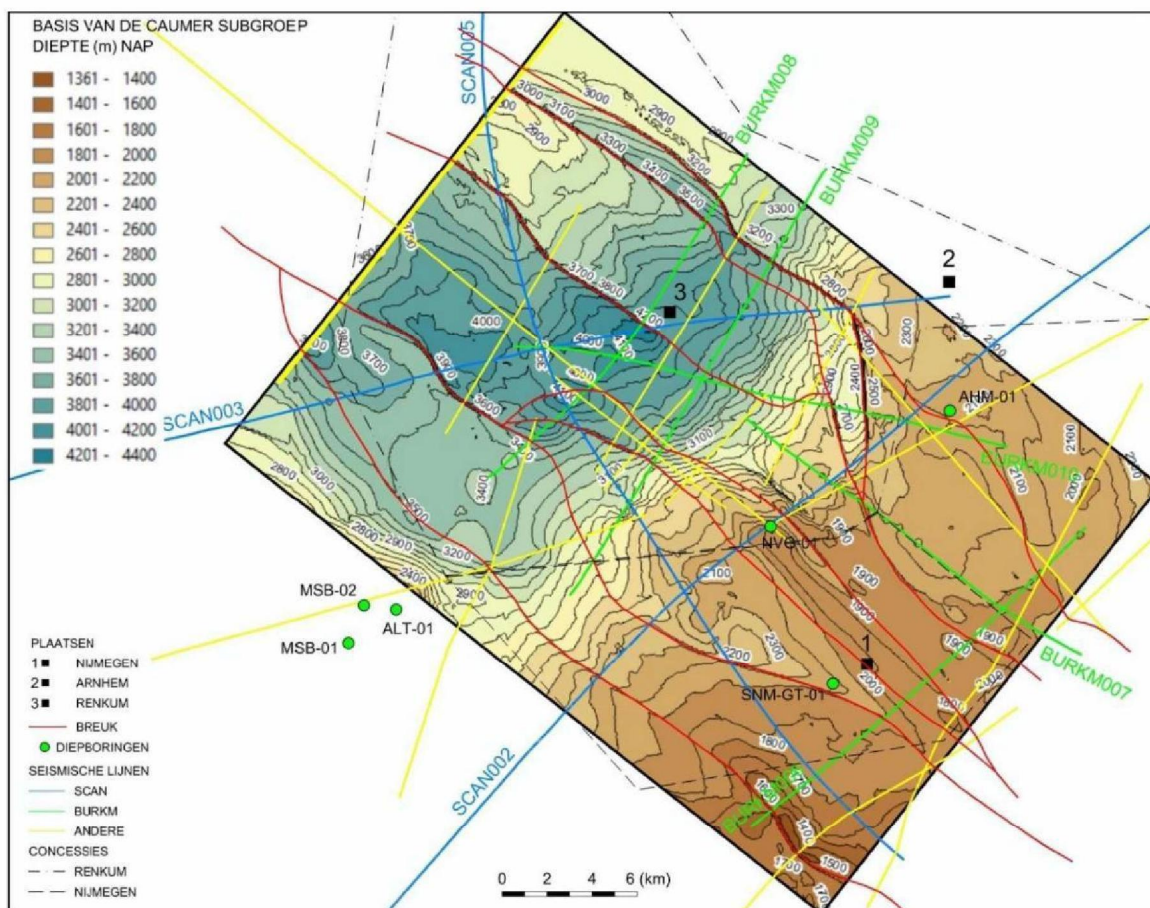
Met diepe model-eenheden worden alle gesteentepakketten bedoeld die onder de top van de Limburg Groep voorkomen. In dit rapport gaat het om model-eenheden; de Caumer Subgroep (DCC) en de Geul Subgroep (DCG). De basis van de Geul Subgroep stelt eveneens de top van de Kolenkalk Groep (CL) voor.

#### 7.3.1. CAUMER SUBGROEP (DCC)

De sedimenten van de Caumer Subgroep komen over het ganse model-gebied voor. Het basisvlak van de subgroep ligt op een minimale diepte rond 1500°m onder NAP in het zuiden en helt af in noordwestelijke richting tot een maximale diepte van 4300°m onder NAP ter hoogte van Renkum. Van daaruit vertoont de basis terug een stijging tot ongeveer 3000°m onder NAP in het noorden. Het basisvlak kan opgedeeld worden in 3 zones.

- een plateau-zone in het zuidoosten met een gemiddelde diepte van 2000°m onder NAP.
- een komvormige diepe zone centraal onder Renkum
- een helling met een zuidwest-noordoost strekking tussen beide voornoemde zones, afhellend in noordwestelijke richting.

Op deze zones zijn de horst- en graben-structuren en de antiforme- en synforme structuren gesuperponeerd. Tussen de breuken die de noordelijke pop-up structuur afboorden is er een zuidoost-noordwest georiënteerde rug zichtbaar die ongeveer 100°m boven de plateau-zone uitsteekt. Deze is volgbaar tot aan de helling-zone ter hoogte van NVG-01. De zuid-noord georiënteerde graben-structuur komt eveneens duidelijk tot uiting met een diepteverschil tot 650°m in vergelijking tot de omliggende plateau-zone. Verder worden er in de plateau-zone nog enkele breuken aangetroffen die slechts een beperkt verzet vertonen in de basis van de Caumer Subgroep. Noordwaarts in de diepe komvormige zone krijgen enkele van deze zuidoost-noordwest georiënteerde breuken toch een verzet dat lokaal zelfs tot 400°m oploopt. Eén van deze breuken doorsnijdt de basis van de Caumer Subgroep ter hoogte van Renkum en heeft er een breukbedrag van ongeveer 350°m.

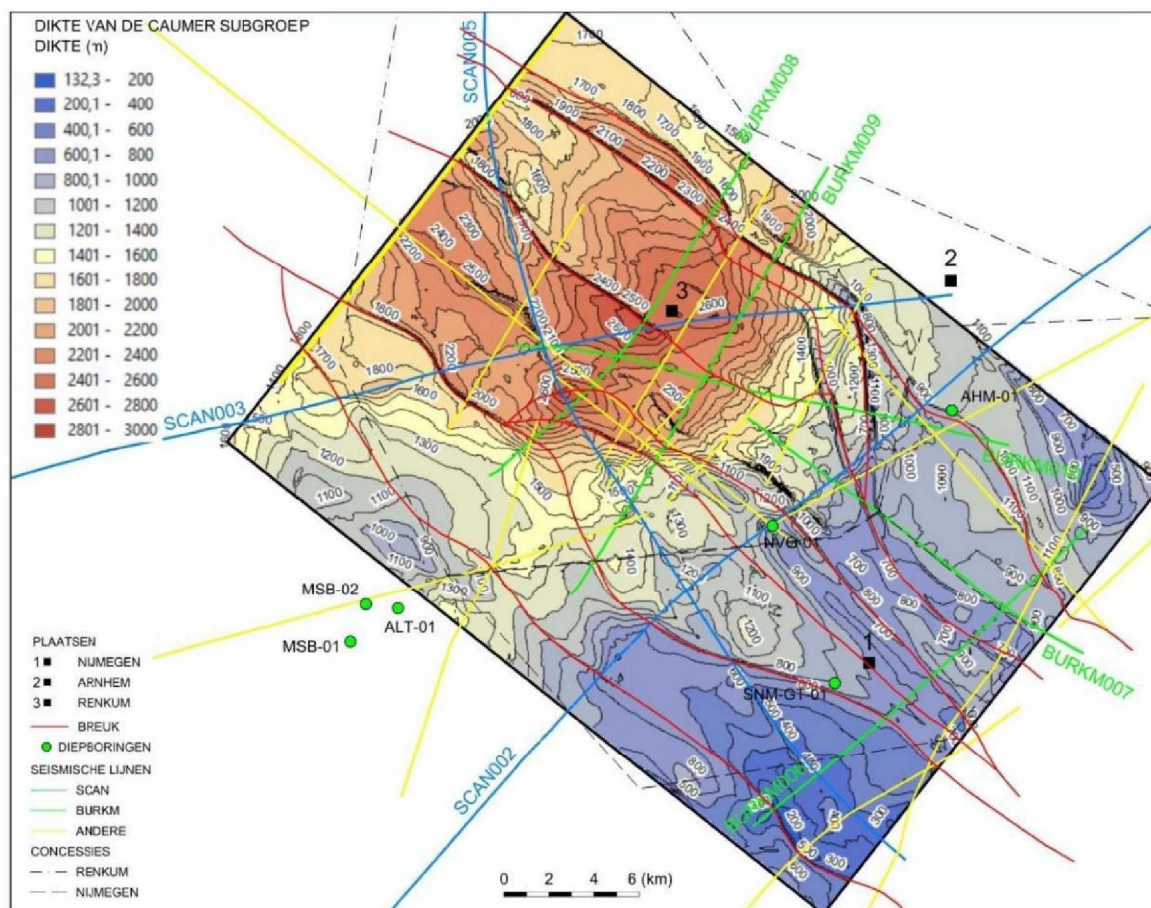


Figuur 33: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Caumer Subgroep.

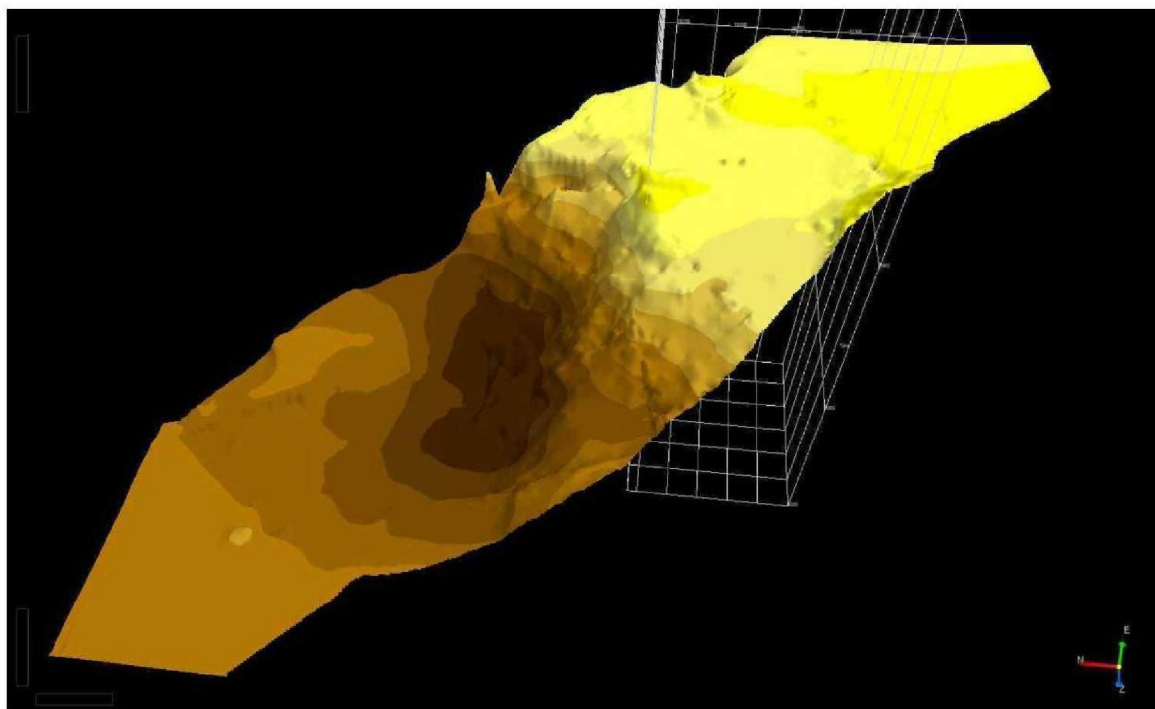
Het gesteentepakket van de Caumer Subgroep heeft een minimale dikte van ongeveer 200°m op de plateau-zone in het zuiden van het model-gebied. Een maximale dikte van 2700°m wordt aangetroffen centraal onder Renkum in de diepe komvormige zone. Ter hoogte van de helling-zone treedt er een plotse diktetoename op van ongeveer 1300°m tot 2300°m over een afstand van ongeveer 4000°m.

Binnen het model-gebied kon het basisvlak van de Caumer Subgroep lithostratigrafisch niet gekoppeld worden aan een diepboring.





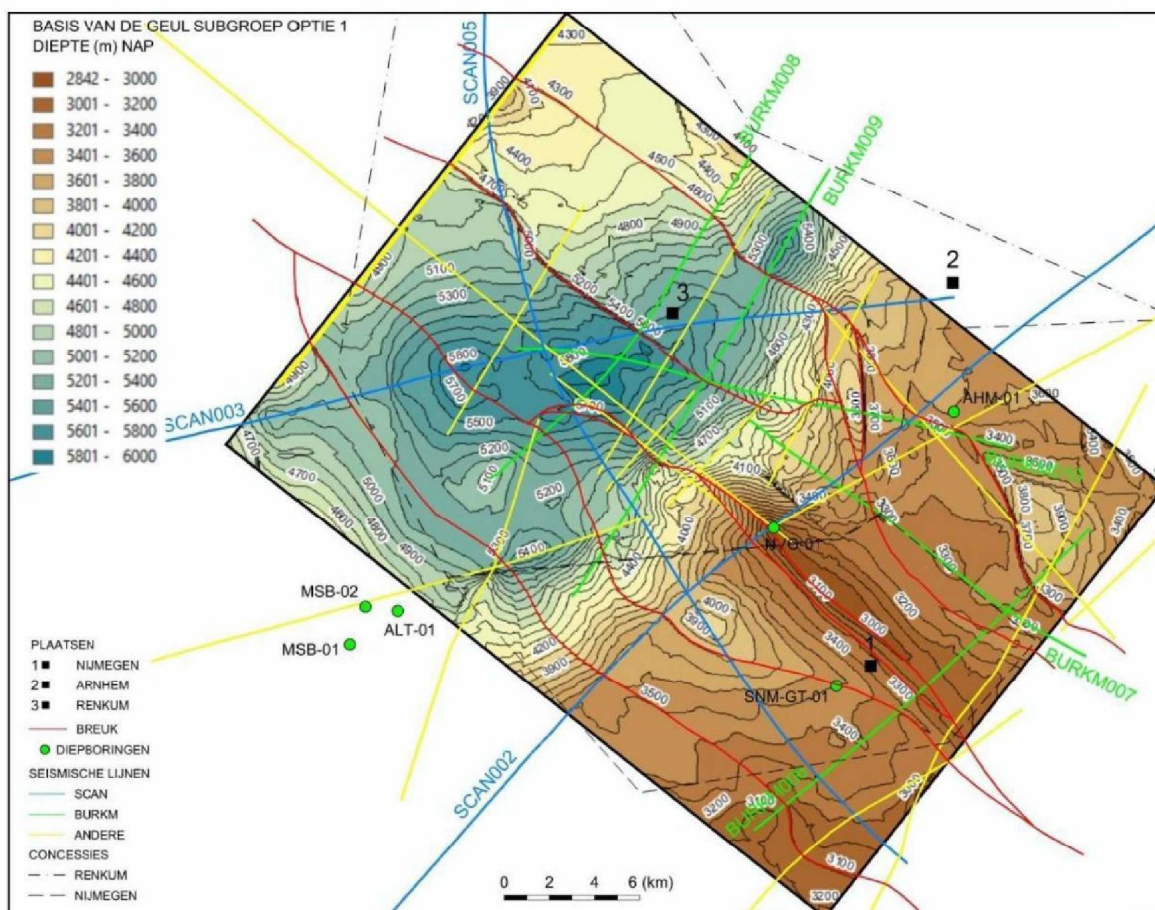
Figuur 34: De dikte (m) van de Caumer Subgroep.



Figuur 35: 3D-zicht vanuit het W op de basis van de Caumer Subgroep (in tijd), met in het geel het plateau in het SE, het donkerbruin het centrale diep in het NW en tussen beide de helling.

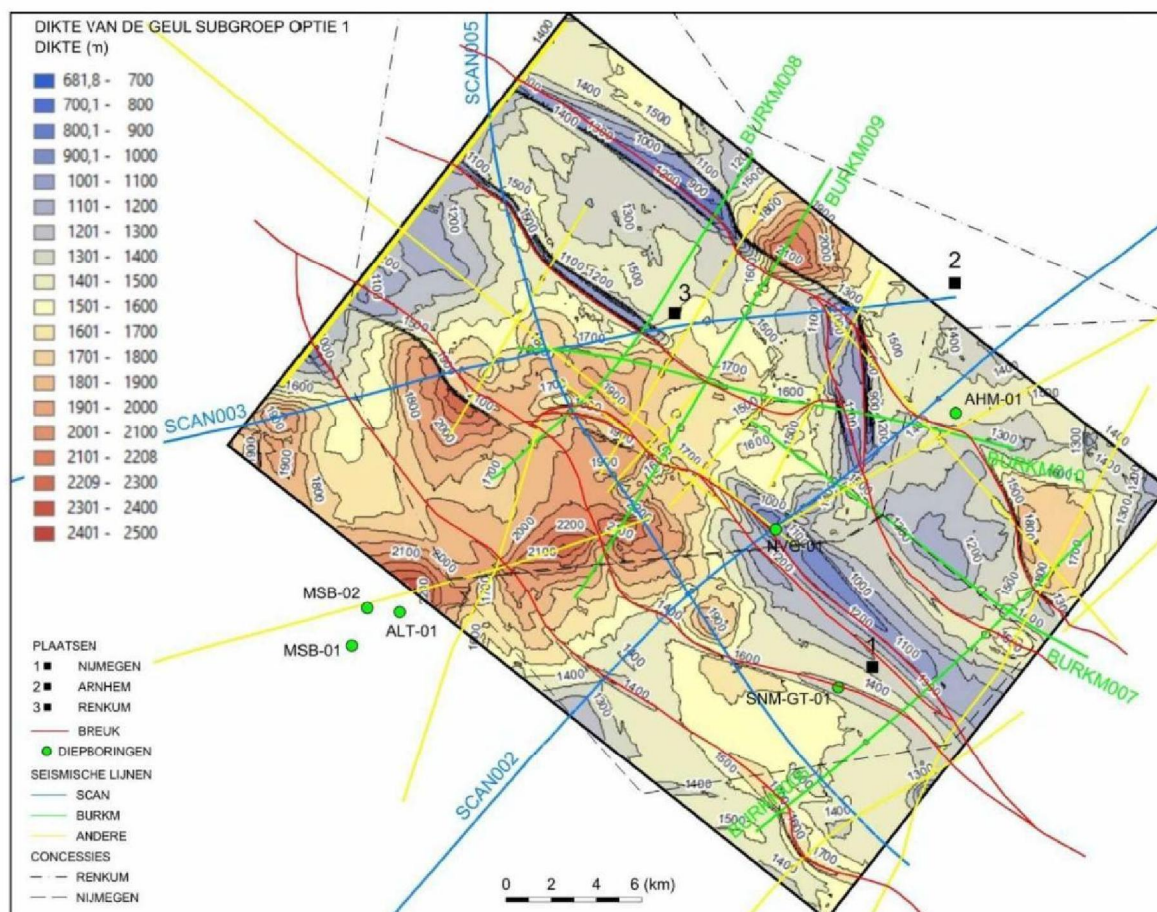
## 7.3.2. GEUL SUBGROEP (DCG) – OPTIE 1

De Geul Subgroep wordt aangetroffen over de oppervlakte van het ganse model-gebied. Het basisvlak van de Geul Subgroep vertoont eenzelfde driedelige opbouw als dat van de Caumer Subgroep. De 3 zones worden ook hier aangetroffen, met daarop gesuperponeerd, maar minder uitgesproken, de horst- en graben structuren en de antiforme- en synforme-structuren. De plateau-zone ligt gemiddeld op 3300°m onder NAP in het zuidoosten. Ter hoogte van de breuken die de noordelijke pop-up structuur afboorden tekent zich een zuidoost-noordwest georiënteerde rug af die ongeveer 300°m boven de plateau-zone uitsteekt. Deze rug wordt gevormd door de opgeperste lagen aan weerszijde van de pop-up structuur. De rug is herkenbaar tot in de helling-zone ten noorden van NVG-01. Ook de zuid-noord georiënteerde graben-structuur is aanwezig in het basisvlak van optie 1 voor de Geul Subgroep, met een verzet tot ongeveer 500°m langs de grabenbreuken. Net als voor de Caumer Subgroep zijn er ter hoogte van de plateau-zone breuken waarneembaar in de gesteenten van de Geul Subgroep zonder dat deze evenwel een belangrijk verzet vertonen. Noordwaarts in de diepe komvormige zone vertonen deze wel een breukbedrag, zij het minder groot dan in de basis van de Caumer Subgroep. Het verzet van de breuk ter hoogte van Renkum bedraagt nog ongeveer 300°m voor de basis van de Geul Subgroep optie 1. Het centrum van de diepe komvormige zone heeft zich langs seismische lijn BURKM008 iets naar het zuidwesten verplaatst tot het gebied tussen lijn BURKM010 en SCAN005. Daar heeft het basisvlak een diepte van ongeveer 5900°m onder NAP.



Figuur 36: De diepte van het basisvlak (m NAP) en de dikte (m) van de Geul Subgroep optie 1.





Figuur 37: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 1.

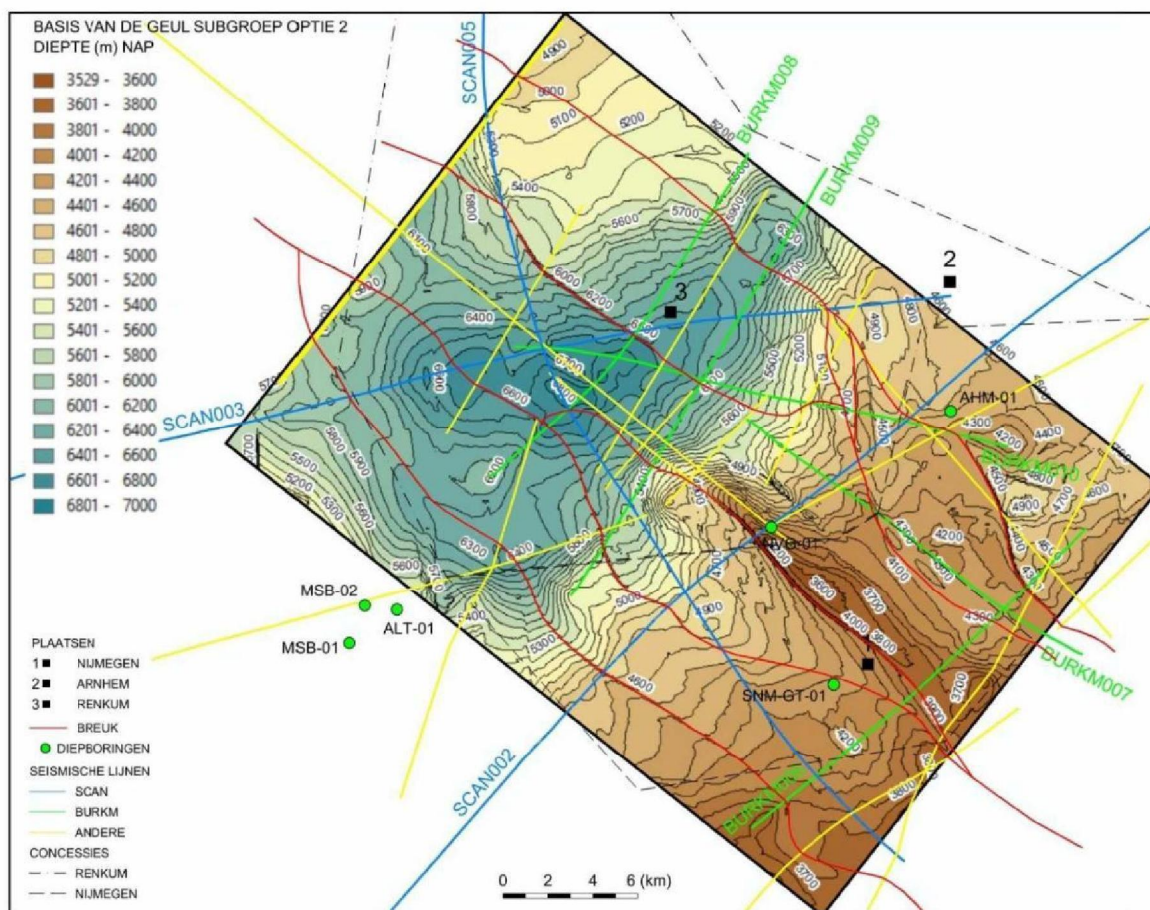
De dikte van het stratigrafisch bereik tussen de basis van de Caumer Subgroep en de basis van de Geul Subgroep optie 1 varieert rond 1300°m à 1400°m ter hoogte van de plateau-zone met een afname in dikte tot ongeveer 1000°m op de zuidoost-noordwest georiënteerde rug. Een gelijkaardige dikte wordt teruggevonden in de zuid-noord georiënteerde graben-structuur. In de diepe komvormige zone worden diktes bereikt tot 2300°m. De grootste diktes hebben zich meer zuidwestelijk verplaatst ten opzichte van het centrum van de diepe komvormige zone. De sterke diktetoeename ter hoogte van de helling-zone, zoals vastgesteld voor de Caumer Subgroep, wordt hier niet waargenomen. Er is eerder een geleidelijke toename in dikte over de helling-zone waar te nemen.

Binnen het model-gebied kon het basisvlak van de Geul Subgroep optie 1 lithostratigrafisch niet gekoppeld worden aan een diepboring.

### 7.3.3. GEUL SUBGROEP (DCG) – OPTIE 2

Optie 2 voor de basis van de Geul Subgroep vertoont eenzelfde driedelige opbouw als de voorgaande pakketten van de Limburg Groep. De scheiding tussen plateau-zone en diepe komvormige zone door de helling-zone wordt evenwel minder uitgesproken. Zeker ten zuiden van de pop-up structuren wordt de helling over een veel grotere afstand zuidwaarts uitgesmeerd. Dit verschijnsel neemt reeds een aanvang in de basis van de Geul Subgroep optie 1. In het zuidoosten van de plateau-zone ligt het basisvlak gemiddeld op 4300°m onder NAP. De zuidoost-noordwest georiënteerde rug steekt hier een 700°m boven uit en loopt door tot in de helling-zone ten noordwesten van NVG-01.





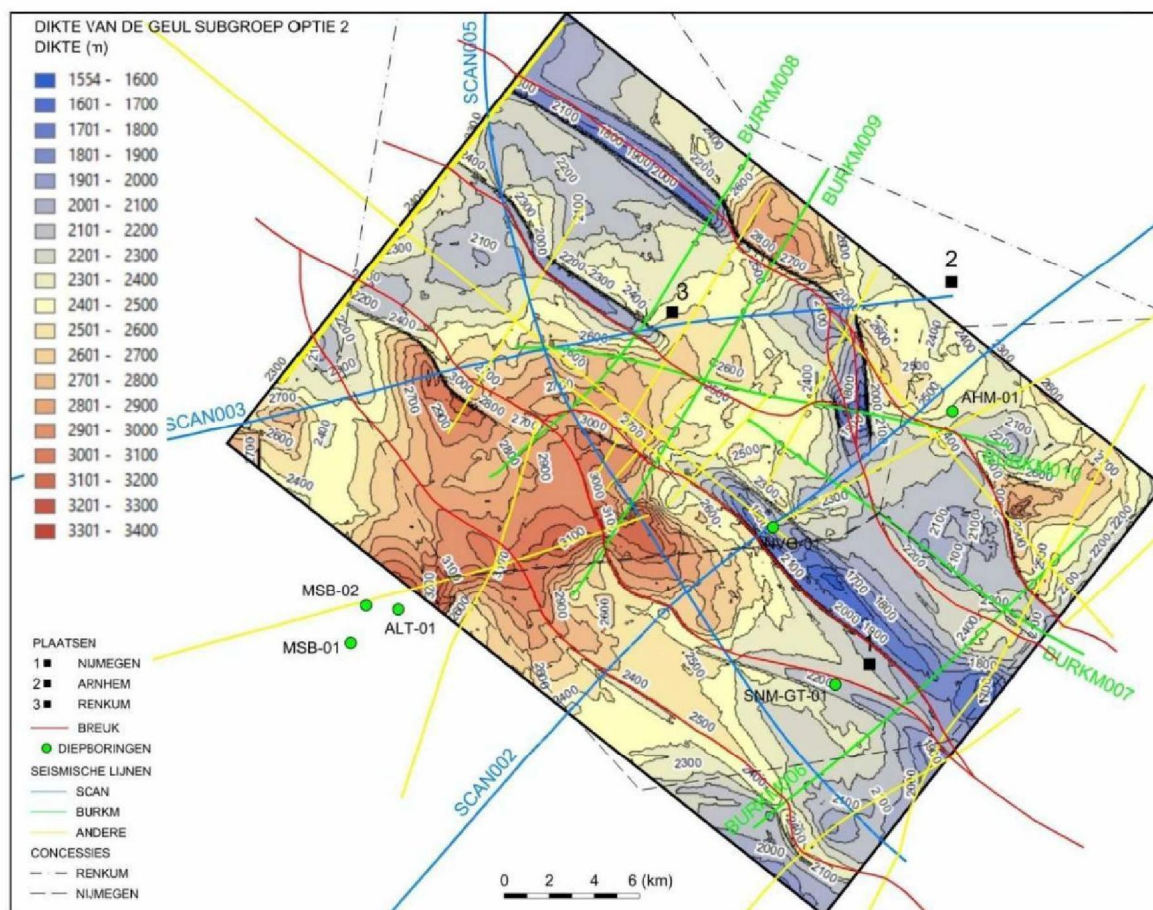
*Figuur 38: De diepte van het basisvlak(m NAP van de Geul Subgroep optie 2.*

De zuid-noord georiënteerde graben-structuur is bijna niet meer herkenbaar in de basis van de Geul Groep optie 2. Alle breuken die zichtbaar zijn binnen de Limburg Groep op de seismische secties hebben slechts weinig of geen verzet meer in dit basisvlak, ook in de diepe komvormige zone. Enkel de breuk ter hoogte van Renkum heeft nog een verzet van ongeveer 200°m. Het diepste punt van de komvormige zone bevindt zich nog steeds op seismische lijn BURKM008 tussen lijnen BURKM010 en SCAN005. De maximale diepte bedraagt er ongeveer 6900°m onder NAP.

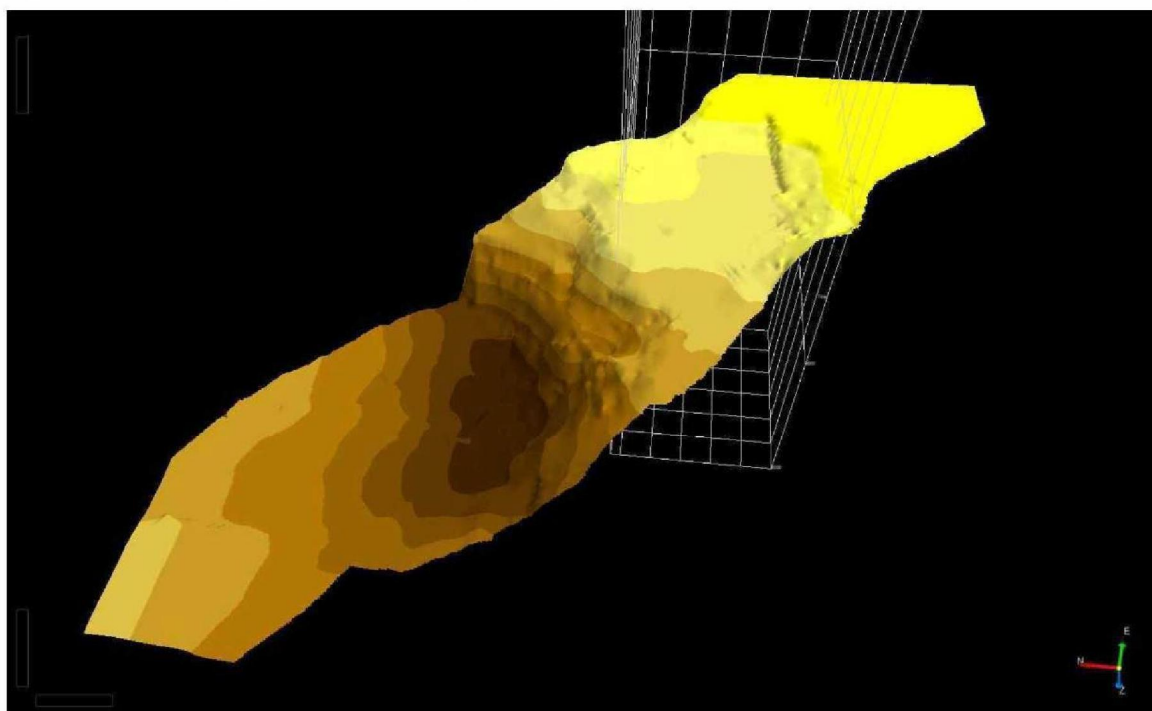
De dikte van het stratigrafisch bereik tussen de basis van de Caumer Subgroep en de basis van de Geul Subgroep optie 2 varieert rond 2100°m à 2200°m ter hoogte van de plateau-zone met een afname in dikte tot ongeveer 1700°m op de zuidoost-noordwest georiënteerde rug. Een gelijkaardige dikte wordt teruggevonden in de zuid-noord georiënteerde graben-structuur. In de diepe komvormige zone worden diktes bereikt tot 3200°m. Net als bij optie 1 hebben de grootste diktes zich meer zuidwestelijk verplaatst ten opzichte van het centrum van de diepe komvormige zone. De sterke diktetoename ter hoogte van de helling-zone, zoals vastgesteld voor de Caumer Subgroep, wordt ook hier niet aangetroffen. Er is eerder een geleidelijke toename in dikte over de helling-zone waar te nemen.

Binnen het model-gebied kon het basisvlak van de Geul Subgroep optie 2 lithostratigrafisch niet gekoppeld worden aan een diepboring.





Figuur 39: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 2.

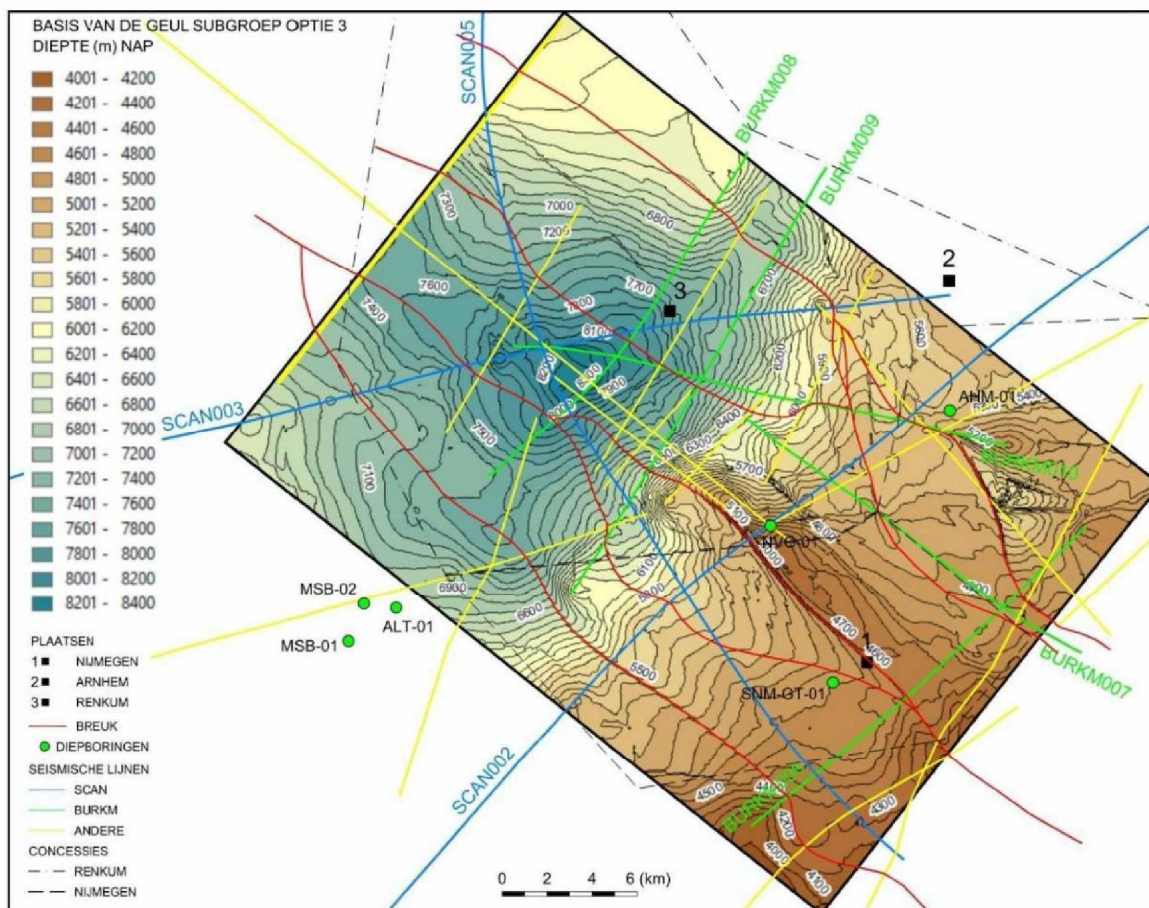


Figuur 40: 3D-zicht vanuit het W op de basis van de Geul Subgroep optie 2 (in tijd), met in het geel het plateau in het SE, het donkerbruin het centrale diep in het NW en tussen beide de helling.

Op basis van de correlatie met de regio rond BHK-01 en de regio rond CAL-GT-01 wordt optie 2 aanzien als zijnde de meest plausibele kandidaat voor de top van de Kolenkalk Groep.

#### 7.3.4. GEUL SUBGROEP (DCG) – OPTIE 3

Optie 3 voor de basis van de Geul Subgroep vertoont eenzelfde driedelige opbouw als de voorgaande pakketten van de Limburg Groep. De uitgesproken scheiding tussen plateau-zone en diepe komvormige zone door de helling-zone wordt verder afgevlakt. Zeker ten zuiden van de pop-up structuren wordt de helling hier over een nog veel grotere afstand zuidwaarts uitgesmeerd. In het zuidoosten van de plateau-zone ligt het basisvlak gemiddeld op 4900°m onder NAP. De zuidoost-noordwest georiënteerde rug steekt hier een 500°m boven uit en loopt door tot in de helling-zone ten noordwesten van NVG-01. De zuid-noord georiënteerde graben-structuur is niet meer herkenbaar in de basis van de Geul Groep optie 3. Alle breuken die zichtbaar zijn binnen de Limburg Groep op de seismische secties hebben weinig of geen verzet meer in dit basisvlak, ook in de diepe komvormige zone. Het verzet langs de breuk ter hoogte van Renkum is ook niet meer meetbaar. Het diepste punt van de komvormige zone bevindt zich nog steeds op seismische lijn BURKM008 tussen lijnen BURKM010 en SCAN005. De maximale diepte bedraagt er ongeveer 8300°m onder NAP.

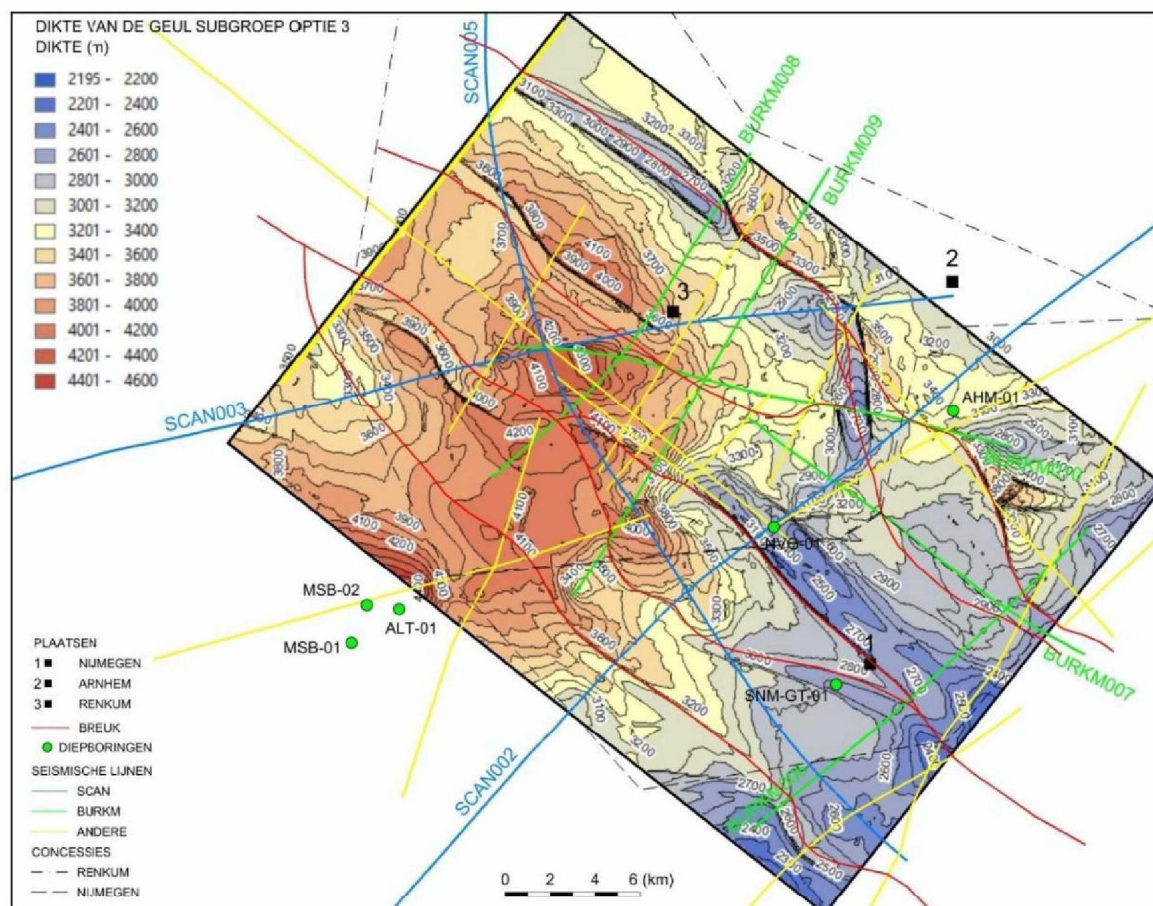


Figuur 41: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Geul Subgroep optie 3.

De dikte van het stratigrafisch bereik tussen de basis van de Caumer Subgroep en de basis van de Geul Subgroep optie 3 varieert rond 2900°m ter hoogte van de plateau-zone met een afname in dikte tot ongeveer 2400°m op de zuidoost-noordwest georiënteerde rug. Een gelijkaardige dikte wordt



teruggevonden ter hoogte van de zuid-noord georiënteerde graben-structuur. In de diepe komvormige zone worden diktes bereikt tot 4300 m. Het centrum met de dikste gesteentepakketten heeft zich in optie 3 terug boven het centrale diepe punt in de komvormige zone tussen seismische lijnen BURKM010 en SCAN005 op lijn BURKM008 gelegd. De sterke diktetoename ter hoogte van de helling-zone, zoals vastgesteld voor de Caumer Subgroep, wordt ook hier niet aangetroffen. Lokaal rond het noordwestelijke uiteinde van de zuidoost-noordwest georiënteerde rug is er wel een sterke diktetoename waar te nemen van 2900 m tot 3900 m over een afstand van 2000 m. Binnen het model-gebied kon het basisvlak van de Geul Subgroep optie 3 lithostratigrafisch niet gekoppeld worden aan een diepboring.



Figuur 42: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 3.

Aangezien optie 2 als de meest plausibele kandidaat voor de top van de Kolenkalk Groep aanzien wordt, bestaat de kans dat optie 3 de top van de Banjaard Groep vormt en bijgevolg het grensvlak tussen het Dinantiaan en het Devoon voorstelt.

## 7.4. CONCLUSIES

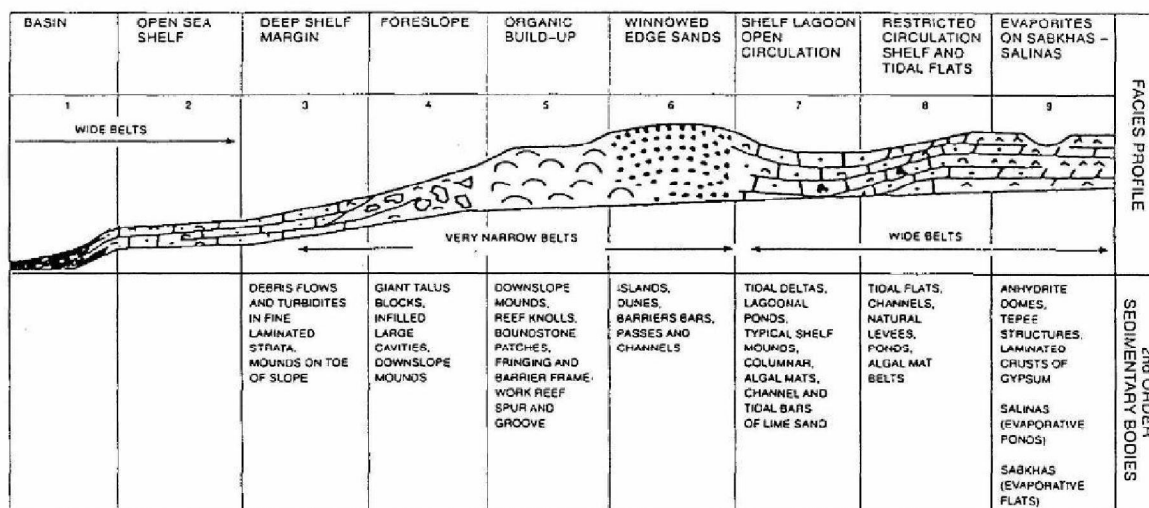
### 7.4.1. ONDIEPE MODEL EENHEDEN

Het beeld verkregen van de ondiep model-eenheden bevestigt grotendeels de bestaande geologische modellen van de ondergrond in het zuiden van Gelderland. Het voorkomen van de verschillende gemodelleerde lithostratigrafische eenheden heeft geen grote wijzigingen ondergaan

ten opzichte van het DGM diep v5. Het nieuwe lokale model van de ondiepe lithostratigrafische eenheden geeft meer detail en laat een complexe structurele opbouw zien, maar past nog steeds binnen het bestaande regionaal geologische kader. De conclusies met betrekking tot het geothermisch potentieel van deze ondiepe eenheden, zoals beschreven in de rapporten van Broothaers & Laenen (2012), Lagrou & Broothaers (2013) en ter Borgh & Mijnlieff (2019) blijven grotendeels behouden.

#### 7.4.2. DIEPE MODEL EENHEDEN

In tegenstelling tot de ondiepe model-eenheden geeft het model van de diepe lithostratigrafische eenheden een nieuw beeld van de diepe ondergrond van het zuiden van Gelderland, een beeld dat enigszins afwijkt van het tot nu toe gekende. Het model van het top-vlak van de gesteenten van de Limburg Groep, of het gecombineerde model-vlak van de basis van de Rijnland Groep en de Zechstein Groep, sluit nog aan bij het gekende model van de ondiepe lithostratigrafische eenheden en het bestaande regionaal geologische kader. De gemodelleerde horizonten onder dit top-vlak hebben evenwel een geheel nieuwe opbouw. Deze horizonten vertonen alle een gelijkaardig paleoreliëf dat geen relatie heeft met het bovenliggend top-vlak van de Limburg Groep. Dit paleoreliëf bestaat uit een "plateau" in het zuidoosten en een "diep" in het noordwesten met daartussen een zuidwest-noordoost georiënteerde steile "helling" afhellend in noordwestelijke richting over een afstand van 3 à 4°km. De vorm van dit paleoreliëf doet enigszins denken aan de opbouw van een carbonaat-platform overeenkomstig het depositionele facies model van Wilson (1975; zie ook Tucker, 1985 en Flügel, 2004). Hierbij vormt het "plateau" de "*organic build-up*", de "helling" de "*foreslope*" en het "diep" de "*deep shelf margin*" en/of de "*open sea shelf*", elk met zijn typische carbonaat sedimenten (Figuur 43).



Figuur 43: Het depositionele carbonaat facies model volgens Wilson (1975).

Het voorgaande is evenwel zeer speculatief. Immers, de vorm van het paleoreliëf wordt zowel in de basis van de Caumer Subgroep als in de basis van de 3 opties voor de basis van de Geul Subgroep aangetroffen. De dikte van de pakketten tussen de verschillende gemodelleerde basis-vlakken is steeds groter in het "diep" dan op het "plateau" en het diepteverschil tussen "plateau" en "diep" neemt van boven naar onder toe per gemodelleerde lithostratigrafische eenheid. De steilte van de "helling" neemt algemeen gezien eveneens stratigrafisch toe van boven naar onder (van gemiddeld 10° voor de basis van de Caumer Subgroep tot 30° voor de basis van de Geul Subgroep Optie 3). Dit wijst op een door subsidentie gecontroleerde afzetting, waarbij onder invloed van gravitatie dikkere sedimentpakketten in het zakkende "diep" afgezet zijn. Deze trend staat dwars op de verwachting



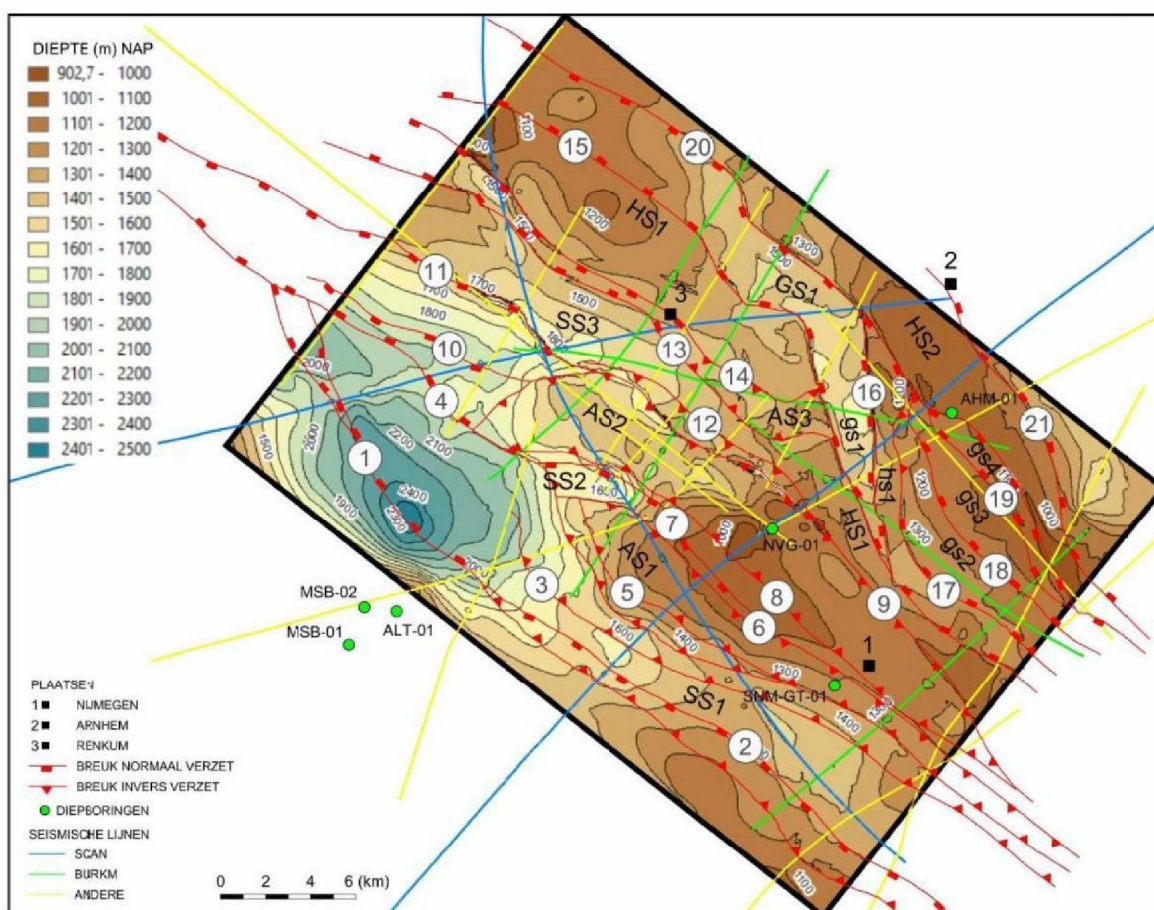
volgens het model van Wilson (1975), dat de dikte van de carbonaatgesteenten het grootst is in de “*organic build-up*” aan de zijde van het “plateau” en afneemt in de richting van de “*deep shelf margin*” aan de zijde van het “diep”.

Mogelijk is er, naast subsidentie, ook nog een tektonische component aanwezig in de vorm van dit paleoreliëf.

## HOOFDSTUK 8. STRUCTURELE OPBOUW VAN DE DIEPE ONDERGROND

## 8.1. ALGEMEEN

Het studiegebied ligt voor drie kwart binnen het PMC en één kwart binnen het CNB. De structurele grens ligt ongeveer ter hoogte van de zone waar de afzettingen van de Krijtkalk Groep en Rijnland Groep overlappen met de Onder Germaanse Trias Groep, Zechstein en Boven Rotliegend Groep (zie figuur 2). Het zuidwestelijke deel van het studiegebied waar de Krijtkalk Groep en de Rijnland Groep voorkomen behoort tot het PMC. Het noordoostelijk deel waar de Onder Germaanse Trias Groep, de Zechstein Groep en Boven Rotliegend Groep voorkomen behoort eerder tot het CNB. Beide delen hebben dan ook een structureel verschillende allure. De opbouw wordt toegelicht aan de hand van de structuren zichtbaar in de topvlak van de Limburg Groep.

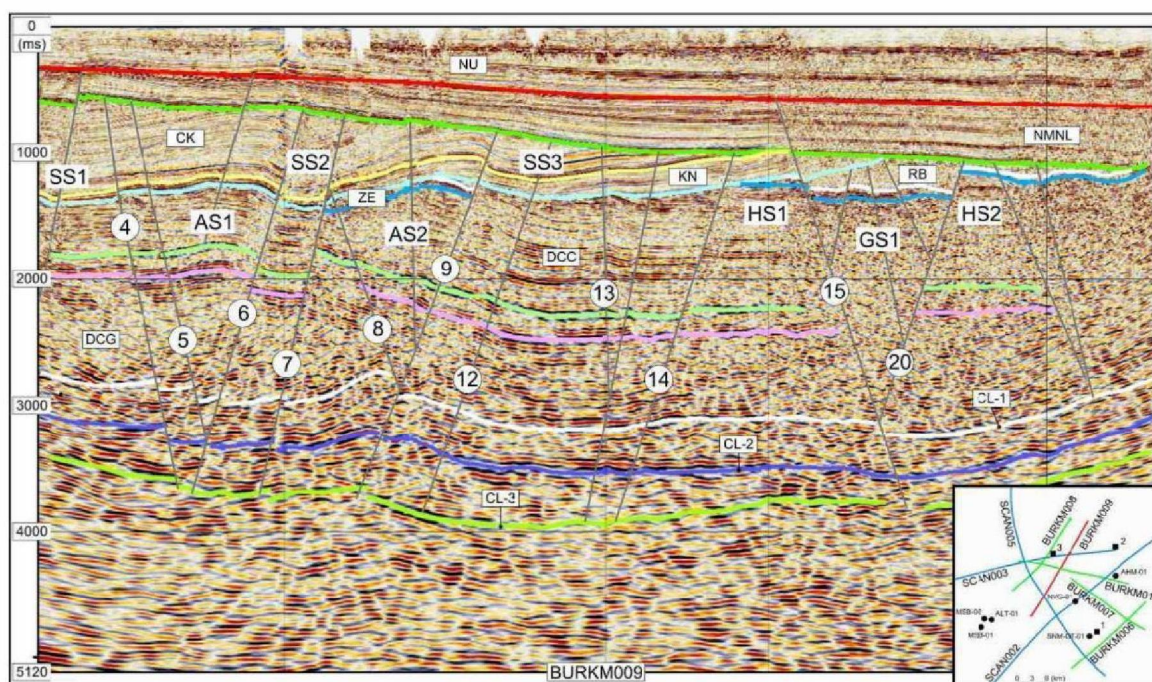


Figuur 44: De situering van de structuren en breuken aan de top van de Limburg Groep binnen het model-gebied.



## 8.2. STRUCTUREN

Het topvlak van de Limburg Groep wordt gevormd door de combinatie van de basisvlakken van de Rijnland Groep in het zuidwesten en de Boven Rotliegend Groep in het noordoosten van het model-gebied. Daar waar voornamelijk de basis van de Rijnland Groep het topvlak uitmaakt, wordt de structurele opbouw bepaald door twee antiforme structuren geflankeerd door drie synforme structuren. Een derde kleine antiforme structuur (AS3) wordt aangetroffen binnen de noordelijke synforme structuur in het overgangsgebied waar de Rijnland Groep en de Boven Rotliegend Groep elkaar overlappen. Daar waar hoofdzakelijk de basis van de Boven Rotliegend Groep het topvlak uitmaakt, wordt de structurele opbouw eerder bepaald door horst- en graben-structuren. Al deze structuren worden afgelijnd door breuken waarvan de werking binnen de Limburg Groep kort aangehaald wordt. Deze is niet noodzakelijk dezelfde voor de bovenliggende lithostratigrafische eenheden.



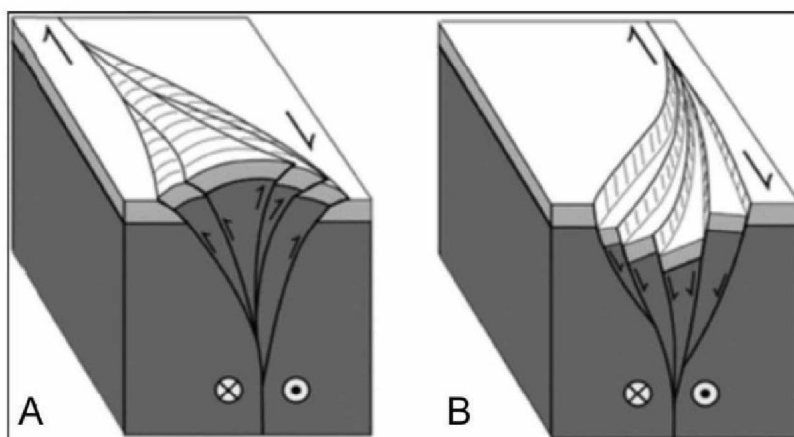
Figuur 45: De situering van de structuren en breuken op seismische lijn BURKM009.

Seismische lijn BURKM009 staat dwars op de structurele opbouw van het gebied en geeft een goed beeld van de structuren binnen het model-gebied. In het zuidwesten vangt deze lijn aan met een brede eerste synforme structuur (SS1) in de top van de Limburg Groep, bedekt door sedimenten van Rijnland Groep. Deze wordt gevolgd in noordoostelijke richting door een eerste antiforme structuur (AS1), vervolgens een nauwe tweede synforme structuur (SS2) en een tweede antiforme structuur (AS2), die op zich gevolgd wordt door een brede derde synforme structuur (SS3). Verder wordt de top van de Limburg Groep in noordoostelijke richting bedekt door sedimenten van de Boven Rotliegend Groep. Daar vangt het topvlak aan met een eerste horst-structuur (HS1), gevolgd door een graben-structuur (GS1) en een tweede horst-structuur (HS2). De graben-structuur en de tweede horst structuur zijn op zich verder in blokken opgedeeld door één of meerdere breuken. Naar het zuidoosten toe, op seismische lijnen SCAN002 en BURKM006, verbreedt de graben-structuur en wordt deze nog verder opgedeeld in verschillende breukgebonden gesteenteblokken. Van het westen naar het oosten kunnen 5 blokken onderscheiden worden; het diepste deel van de graben-



structuur (gs1), een kleine horst-structuur (hs1), twee kleine halfgraben-structuren (gs 2 en gs 3) en een kleine graben-structuur (gs4).

De helling en de werking van de breuken verschilt naargelang de structuur die ze aflijnen. De antiforme structuren worden langs de zuidwestelijke zijde afgeboord door één of twee noordoost hellende breuken en langs de noordoostelijke zijde door zuidwest hellende breuken. Het gesteenteblok daarbinnen is opgeperst langs deze breuken, zodat de breuken een inverse werking vertonen. Beide antiforme structuren zijn pop-up structuren geflankeerd door drie synforme structuren, gevormd door de gesteenteblokken waartegen de pop-up structuren zijn opgeduwd. De grabenstructuur wordt (eigenlijk gelijkaardig aan de pop-up structuren) langs de zuidwestelijke zijde afgeboord door een noordoost hellende breuk en aan de noordoostelijke zijde door een zuidwesthellende breuk. Het gesteenteblok daarbinnen is (in tegenstelling tot de pop-up structuren) tussen en langs deze breuken gezakt zodat de sedimenten er dieper komen te liggen dan op de flankerende horsten. De breuken vertonen in dit geval een normale werking.



Figuur 46: Positive Flower Structure (A) en Negative Flower Structure (B) (Nanda, 2016).

De antiforme/synforme structuren zijn mogelijk het gevolg van een compressioneel regime, terwijl de horst/graben structuren eerder op een extensioneel regime duiden. Beide type structuren lijken bijgevolg op een ander moment in de geologische geschiedenis van de regio gevormd. De mogelijkheid bestaat ook dat beide type structuren toch op eenzelfde moment ontstaan zijn als gevolg van “strike-slip” bewegingen langs breuken. Hierbij ondergaan in het ene geval de betrokken blokken een opwaartse beweging en vormt er zich een “positive flower structure” (Fig. 46 A), terwijl in het andere geval de betrokken blokken een neerwaartse beweging ondergaan en een “negative flower structure” ontstaat (Fig. 46 B).

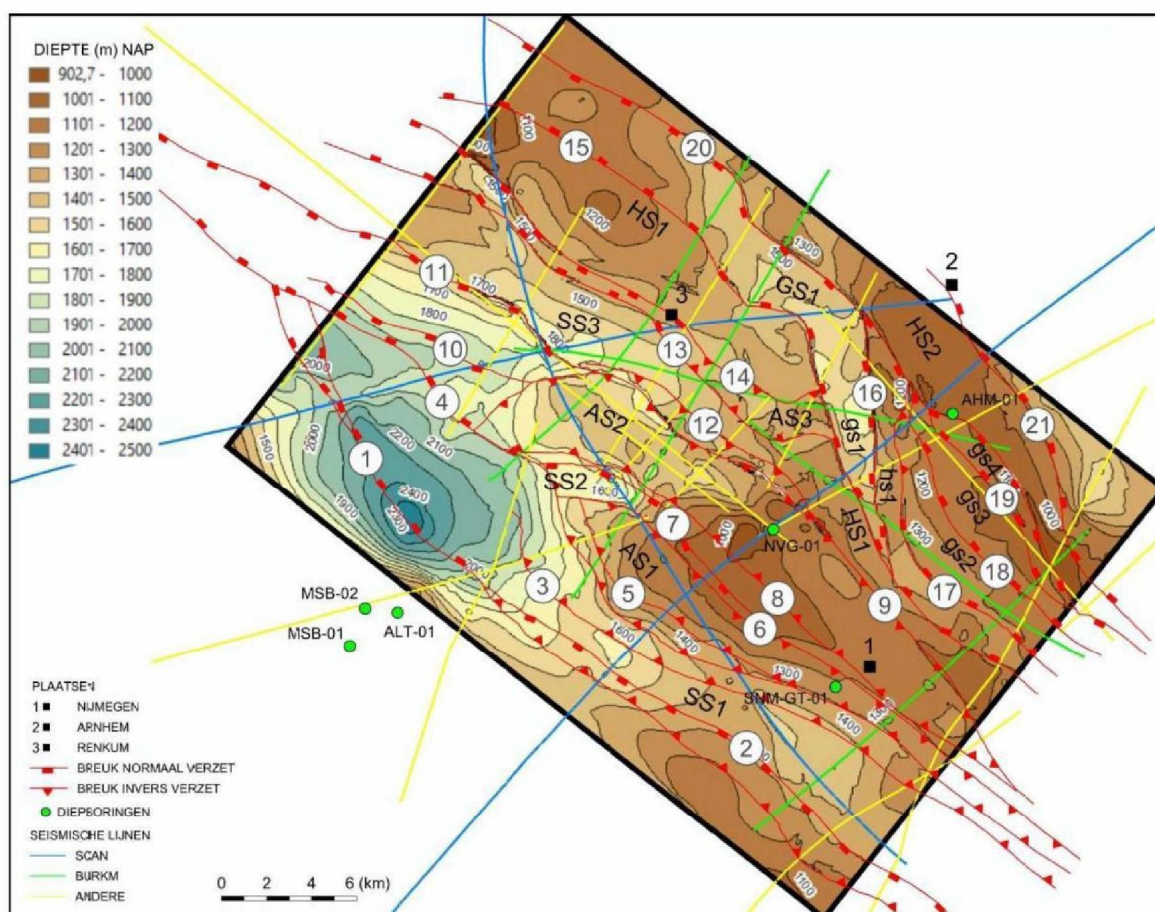
### 8.3. BREUKEN

#### 8.3.1. ORIËNTATIE

De breuken hebben algemeen een zuidoost-noordwest oriëntatie en hellen ongeveer een 60° à 70° in zuidwestelijke of noordoostelijke richting. Diegene die de pop-up structuren aflijnen buigen aan hun noordwestelijk uiteinde af in een oost-west oriëntatie. Ze botsen daar op de breuk die de noordoostelijke begrenzing van de eerste synforme structuur vormt. Voor de derde kleine pop-up structuur geldt iets gelijkaardigs maar dan voor het zuidoostelijk uiteinde. De breuken waarbinnen deze pop-up structuur zich heeft ontwikkeld botsen er op de breuk die de zuidwestelijke begrenzing



vormt van de graben-structuur. De breuken die de graben-structuur afgrenzen hebben lokaal, ter hoogte van het grootste breukverzet, een zuid-noord oriëntatie.



*Figuur 47: De situering van de structuren en breuken aan de top van de Limburg Groep binnen het model-gebied.*

### 8.3.2. NUMMERING

De breuken werden binnen het model-gebied genummerd van het zuidwesten naar het noordoosten. Ze worden kort besproken voor wat betreft de helling en het verzet of de werking ter hoogte van de top van de Limburg Groep:

- Breuk 1: helt naar het noordoosten en vormt de zuidwestelijke afboording van de eerste synforme structuur (SS1). Deze breuk heeft in het noordwesten een normale tot zwak inverse werking aan de top van de Limburg Groep die sterker wordt naar het zuidoosten nabij SCAN006.
- Breuk 2: helt naar het zuidwesten en leunt aan tegen breuk 1, ze heeft een normale werking aan de top van de Limburg Groep.
- Breuk 3: helt naar het noordoosten en heeft een zwak inverse beweging ter hoogte van de top van Limburg Groep.
- Breuk 4: helt naar het noordoosten en heeft eveneens een zwak inverse beweging voor de topvlak van de Limburg Groep in het zuiden, maar krijgt een eerder zwakke normale werking naar het noorden toe.

- Breuk 5: helt naar het noordoosten, vormt samen met breuk 4 de zuidwestelijke rand van de eerste pop-up structuur (AS1) en vertoont eveneens een zwak inverse beweging aan de top van de Limburg Groep.
- Breuk 6: helt naar het zuidwesten, vormt de noordoostelijke rand van de eerste pop-up structuur (AS1) en vertoont een inverse beweging voor het topvlak van de Limburg Groep.
- Breuk 7: helt naar het zuidwesten en loopt parallel aan breuk 6, ze vormt de noordoostelijke begrenzing van de tweede synforme structuur (SS2) en vertoont een normale beweging voor de top van de Limburg Groep.
- Breuk 8: helt naar het noordoosten, vormt de zuidwestelijke rand van de tweede pop-up structuur (AS2) en vertoont een inverse beweging in het topvlak van de Limburg Groep.
- Breuk 9: helt naar het zuidwesten, vormt de noordoostelijke rand van de tweede pop-up structuur (AS2) en vertoont inverse bewegingen aan de top van de Limburg Groep.
- Breuk 10: helt naar het zuidwesten, vormt een eerste afsplitsing van breuk 9 in het noordwesten waar deze laatste van oriëntatie verandert, en vertoont een zwakke normale werking voor het topvlak van de Limburg Groep.
- Breuk 11: helt naar het zuidwesten, vormt een tweede afsplitsing van breuk 9 in het noordwesten waar deze laatste van oriëntatie wijzigt, en vertoont een zwakke normale beweging aan de top van de Limburg Groep.
- Breuk 12: helt naar het zuidwesten, loopt parallel aan breuk 9 en vertoont geen verzet in de top van de Limburg Groep, maar wel een zwak inverse beweging binnen de Limburg Groep.
- Breuk 13: staat quasi verticaal, maar helt over het algemeen licht noordoostwaarts en lokaal naar het zuidwesten, ze vertoont een zeer zwakke inverse of normale beweging afhankelijk van de hellingsrichting.
- Breuk 14: helt naar het zuidwesten en vertoont quasi geen verzet aan het topvlak van de Limburg Groep, lokaal lijkt er een inverse beweging aanwezig zeker aan het zuidoostelijke einde waar ze de noordoostelijke rand van de derde pop-up structuur (AS3) vormt, maar vanaf seismische lijn BURKM009 vertoont ze in noordwestelijke richting belangrijke normale bewegingen binnen de Limburg Groep.
- Breuk 15: helt naar het noordoosten, vormt de zuidwestelijke rand van de graben-structuur (GS1) (of de noordoostelijke rand van de eerste horst-structuur HS1) en vertoont normale bewegingen met een maximaal verzet voor de top van de Limburg Groep tot 300°m dat zowel in noordwestelijke als zuidoostelijke richting afneemt.
- Breuk 16: helt naar het zuidwesten, vormt de noordoostelijke rand van het diepste deel van de graben (gs1), sluit aan op breuk 15 in het zuiden en op de randbreuk (breuk 20) van de graben in het noorden, en vertoont normale bewegingen met een maximaal verzet van ongeveer 350°m dat zowel in noordwestelijke als zuidoostelijke richting afneemt.
- Breuk 17: helt naar het noordoosten, sluit aan op breuk 20, vormt de noordoostelijke rand van een kleine horst (hs1) (of zuidwestelijke rand van een kleine halfgraben gs2) binnen de breder wordende graben en vertoont een inverse beweging voor de top van de Limburg Groep, maar een normale beweging binnen de Limburg Groep.
- Breuk 18: helt naar het noordoosten, sluit aan op breuk 20, vormt de noordoostelijke rand van een kleine halfgraben (gs3) binnen de breder wordende graben en vertoont een normaal verzet in de top van de Limburg Groep dat snel afneemt naar het zuidoosten.
- Breuk 19: helt naar het noordoosten, sluit aan op breuk 20, vormt de noordoostelijke rand van een kleine graben (gs4) binnen de breder wordende graben en vertoont een normaal verzet in de top van de Limburg Groep.
- Breuk 20: helt naar het zuidwesten, vormt de noordoostelijke randbreuk van de graben en vertoont een normaal verzet tot 300°m voor de top van de Limburg Groep, dat uitdooft naar het zuidoosten en het noordwesten van het studiegebied.



- Breuk 21: helt naar het noordoosten, maakt deel uit van de rand van de horst (HS2) die het noordoosten van het studiegebied afboordt en heeft in het oosten een normaal verzet voor de top van de Limburg Groep van ongeveer 150°m.

### 8.3.3. BREUKVERZET/BREUKWERKING

Met uitzondering van de graben-breuken vertonen de meeste breuken binnen de Limburg Groep slechts een beperkt verzet. Naar onder neemt het breukverzet nog af tot er geen breuken meer herkenbaar zijn ter hoogte van de basis van de Limburg Groep. Voor de meeste breuken varieert het verzet langsheen het breuktraject. De werking langs de breukvlakken verandert eveneens, met andere woorden een breuk met een normale werking over de grootste lengte van het traject kan lokaal inverse bewegingen vertonen. Verder is het duidelijk uit de seismische secties dat breuken gedurende verschillende perioden in de geologische geschiedenis werkzaam zijn geweest en dit niet altijd met eenzelfde zin. Sommige breuken vertonen een normaal werking in de basis van de Noordzee Supergroep, een inverse werking in de basis van de Rijnland Groep en geen breukwerking of een normale breukwerking binnen in de Limburg Groep. Andere breuken vertonen geen breukwerking in de basis van de Noordzee Supergroep, een inverse werking in de basis van de Rijnland Groep, een normaal werking in de basis van de Boven Rotliegend Groep en geen breukwerking binnen de Limburg Groep. De verschillende breukwerkingen doorheen de geologische geschiedenis lijken ervoor gezorgd te hebben dat in vele gevallen er geen of slechts een beperkt verzet in de Limburg Groep waarneembaar. Tegengestelde breukwerkingen lijken zich vereffend te hebben binnen de Limburg Groep. Figuur 47 geeft de helling van en de belangrijkste beweging langs de breuken weer aan de hand van de symbolen.

Zoals gezegd is er op de meeste breuken binnen de Limburg Groep moeilijk een verzet te plaatsen. Enerzijds varieert het verzet langs het breuktraject en anderzijds neemt het verzet ook af met de diepte. Voor enkele breuken kan er toch een richtwaarde gegeven worden die geldt voor de basis van de Caumer Subgroep:

- de noordoostelijke graben-breuk (20) vertoont een normaal neerwaarts verzet tot 650°m in zuidwestelijke richting ter hoogte van het plateau in het zuid-oosten. Noordwaarts neemt het breukbedrag af tot 300°m ter hoogte van seismische lijn BURKM008. Nog verder in noordwestelijke richting lijkt dit verzet helemaal uit te doven.
- de zuidwestelijke graben-breuk (15) vertoont een maximaal normaal neerwaarts verzet van ongeveer 400°m in noordoostelijke richting ter hoogte van seismische lijn BURKM010. Noordwaarts verdwijnt dit breukverzet ter hoogte van seismische lijn SCAN003 om na BURKM008 terug toe te nemen tot een 300°m.
- de breuk (14) die ter hoogte van Renkum seismische lijnen SCAN003 en BURKM008 snijdt vertoont daar een normaal neerwaarts verzet van ongeveer 300°m in zuidwestelijke richting. Dit bedrag neemt noordwestwaarts toe tot 400°m nabij SCAN005. In zuidoostelijke richting neemt het breukbedrag snel af tot quasi 0°m ter hoogte van BURKM009. Nog verder naar het zuiden, waar de breuk een oost-west oriëntatie krijgt en tegen de zuidwestelijke graben-breuk aanloopt, wordt een zwak invers opwaarts verzet in noordoostelijke richting aangetroffen. De breuk vormt daar de noordoostelijke aflijning van de kleine derde pop-up structuur.
- de breuk langs de zuidwestelijke rand van de eerste pop-up structuur (4) vertoont op seismische lijn BURKM006 een normaal neerwaarts verzet van ongeveer 50°m in noordoostelijke richting. Ter hoogte van SCAN005 is het breukbedrag toegenomen tot 200°m en ter hoogte van SCAN002 is het verzet terug afgenomen tot minder dan 50°m. Verder op noordwestwaarts neemt het breukbedrag terug toe tot ongeveer 400°m ter hoogte van SCAN003.

- de meest zuidwestelijk gelegen breuk (1) vertoont over het grootste deel van het traject een normaal neerwaarts verzet rond 50°m in noordoostelijke richting. In het zuidoostelijke uiteinde nabij seismische lijnen SCAN006 en MZ85-57 vertoont deze breuk een inverse opwaartse beweging in zuidwestelijke richting tot ongeveer 250°m. Daar lijkt er zich een nog pop-up structuur te ontwikkelen. Ter hoogte van MZ88-53 is de inverse beweging en de ontwikkeling van een pop-up structuur ook zichtbaar voor de top van de Limburg Groep, terwijl dit voor de basis van de Caumer Subgroep niet duidelijk is.
- de belangrijkste breukzone (8 en 9) in het studiegebied wordt gevormd door de breuken die de tweede pop-up structuur aflijnen. Daarbinnen worden de gesteenten van de Limburg Groep geplooid en opgedrukt. Het verzet voor de basis van de Caumer Subgroep lijkt eerder beperkt en is ook niet eenduidig opwaarts langs de breuken. Voor de dieper gelegen pakketten is het evenwel duidelijk dat hier belangrijke vervormingen plaats gevonden hebben. Zelfs de basis van de Geul Subgroep optie 3 is er geplooid en wordt er ter hoogte van seismische lijn SCAN002 doorbroken met een neerwaarts verzet van 600°m in zuidwestelijke richting.

Algemeen kan nog gezegd worden dat op de nieuwe seismische secties in het zuidwesten van het gebied er breuken zijn die tot in de sedimenten van de Boven Noordzee Groep kunnen getraceerd worden. Dit is niet of veel minder het geval in het noordoosten van het onderzoeksgebied waar de breuken slechts tot aan de basis van de Onder Noordzee Groep kunnen gevolgd worden. Dit laat vermoeden dat het zuidwesten van het model-gebied langer onderhevig geweest is aan tektonische bewegingen dan het noordoosten. Mogelijke hedendaagse breukactiviteit op zich kan niet uit seismische surveys afgeleid worden.



## HOOFDSTUK 9. TEMPERATUUR-MODEL

### 9.1. AANPAK

De temperatuur op 3 locaties binnen het modelgebied werd ingeschat aan de hand van een eendimensionaal thermisch geleidbaarheidsmodel. Voor elke locatie werd het temperatuurverloop tot aan de basis van de Geul Subgroep berekend voor modeloptie 2. De gebruikte berekeningsmethode gaat uit van de lokale warmteflux en de thermische geleidbaarheid en warmtegeneratie van het gesteente. Deze waarden werden ingeschat aan de hand van 8 boringen waarvoor lithologs en temperatuurgegevens beschikbaar zijn op het [NLOG-datacenter](#) (Tabel 14). De boringen Maasbommel-02 en Nijmegen-Valburg-01 liggen in het modelgebied. De andere boringen werden toegevoegd om een beeld te krijgen van de thermische geleidbaarheid en warmtegeneratie van de verschillende lithostratigrafische eenheden en van de regionale spreiding op de geschatte warmteflux. Er werden enkel boringen geselecteerd in de nabijheid van het projectgebied, die zich in een vergelijkbare geologische context bevinden, of een gelijkaardige opeenvolging vertonen. De boringen in het glastuinbouwgebied Californië werden daarom niet geselecteerd. De boring Winterswijk-01 werd wel mee opgenomen omwille van de grotere diepte die er werd bereikt.

Een belangrijke invoerparameter is de lokale warmteflux aan de oppervlakte. Deze warmteflux werd voor elke boring berekend aan de hand van een 1D thermisch model (conductie). In het model wordt de flux berekend door middel van een beste fit van een berekend temperatuursprofiel aan de gemeten temperatuurswaarden op die locatie.

In de volgende secties wordt de berekeningswijze van de lokale warmteflux en de gebruikte invoerparameters besproken. Daarna volgt een bespreking van de resultaten en tenslotte een bespreking van de berekende temperaturen aan de basis van de Geul Subgroep.

Tabel 14: Boringen die gebruikt werden voor het opstellen van het temperatuurmodel.

Boring	einddiepte (TVD)	eindformatie	BHT
Bronkhorst-01	1553 m	Formatie van Maurits	58°C
Buurmalsen-01	2189,25 m	Caumer Subgroep	74°C
Gewande-01(-S01)	1990,2 m	Onder-Röt Randkleisteen Laagpakket	82,4°C
Maasbommel-01	1713,5 m	Z3 Carbonaat Laagpakket	62°C
Maasbommel-02	1278 m	Formatie van Baarlo	45°C
Nijmegen-Valburg-01	1277 m	Formatie van Maurits	53,2°C
Varik-01	1807.25 m	Röt Randzandsteen Laagpakket	79,1°C
Winterswijk-01	5003 m	Banjaard groep (inf.)	184°C

#### 9.1.1. BEREKENINGSWIJZE

De warmteflux werd berekend aan de hand van een ééndimensionaal conductief warmtetransport-model met warmtegeneratie. De algemene vergelijking voor deze vorm van warmteoverdracht is:

*Vergelijking 1*

$$k \times \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_g = \rho \times c_p \times \frac{\partial T}{\partial t}$$

Met  $q_g$  de interne warmtegeneratie per eenheid van volume en tijd ( $\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ ),  $k$  de thermische geleidbaarheid ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ),  $\rho$  de dichtheid van het gesteente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en  $c_p$  de specifieke warmtecapaciteit van het gesteente ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ). In het geval van *steady-state* blijft de temperatuur in het gesteentevolume constant. In dit geval is  $\delta T / \delta t = 0$ . De warmteflux doorheen het gesteentevolume uitgedrukt in  $\text{W}/\text{m}^2$  wordt dan bepaald door het temperatuurverschil over het gesteentevolume, de thermische geleidbaarheid van het gesteente en de interne warmtegeneratie in het gesteentevolume:

Vergelijking 2

$$\dot{Q} = \frac{Q}{A} = k \times \frac{dT}{dz} + q_g \times dz$$

Met  $A$  het oppervlak van het gesteentevolume ( $\text{m}^2$ ) loodrecht op de transportrichting van  $Q$ . Voor een homogeen gesteentepakket kan de warmteflux bijgevolg berekend worden uit het verschil in de temperatuur tussen de basis en de top en de interne warmtegeneratie. Omgekeerd wordt de temperatuur op een gegeven punt  $i$  bepaald door de temperatuur van twee punten op een afstand  $\Delta z_{i-1}$  en  $\Delta z_{i+1}$ , de lokale warmteflux en de temperatuurverhoging ten gevolge van interne warmtegeneratie:

Vergelijking 3

$$2 \times T_i = T_{i-1} + q_{\overrightarrow{i,i-1}} \times \frac{\Delta z_{i-1}}{k_{\overrightarrow{i,i-1}}} + T_{i+1} - q_{\overrightarrow{i,i+1}} \times \frac{\Delta z_{i+1}}{k_{\overrightarrow{i,i+1}}} + \Delta T_g$$

Voor een laagvormig lichaam met homogene interne warmtegeneratie geldt:

Vergelijking 4

$$\Delta T_g = \frac{q_g \times d^2}{2 \times k}$$

Met  $d$  de dikte van de laag ( $\text{m}$ ) en  $k$  de thermische geleidbaarheid van de laag ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ).

De warmteflux op de locatie van de boringen waarvoor temperatuurgegevens beschikbaar zijn werd berekend door Vergelijking 3 te fitten aan de gemeten temperaturen. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de implementatie van de TNC minimalisatiemethode binnen SciPy versie 1.4.1 (Nash, 1984). De grenswaarden voor de minimalisatie zijn geven in Tabel 15.

Tabel 15: Grenswaarden gebruikt voor het fitten van het ééndimensionale temperatuurmodel met de temperatuurswaarden gemeten in de boringen.

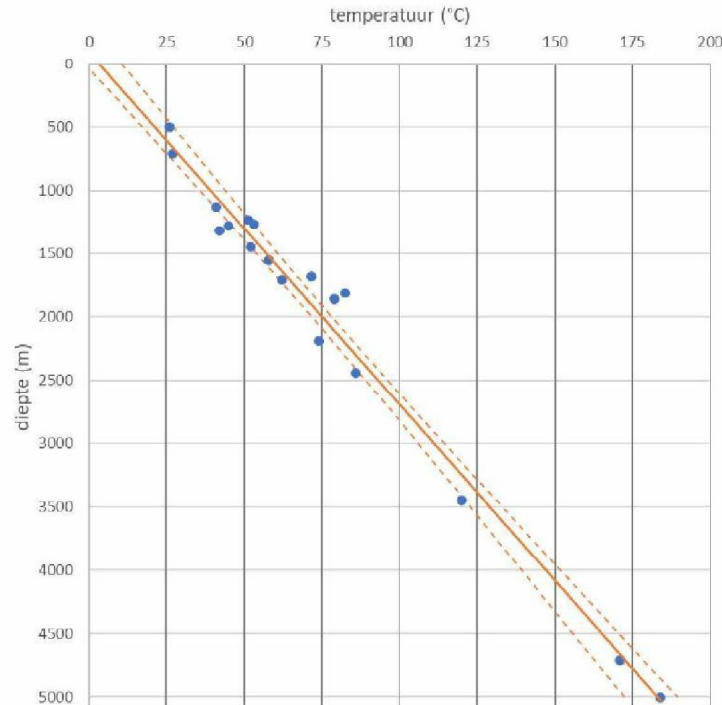
Parameter	Minimale waarde	Maximale waarde
$\dot{Q}_b$	0.01 $\text{W}/\text{m}^2$	0.15 $\text{W}/\text{m}^2$

Voor de berekening van de warmteflux werd gebruik gemaakt van de lithostratigrafische indeling van de boringen die terug te vinden in op het NLOG Datacenter.



### 9.1.2. BEPALING VAN DE OPPERVLAKTETEMPERATUUR

De toename van de temperatuur met de diepte vastgesteld in de 8 boringen is weergegeven in Figuur 48. Voor boringen Bronkhorst-01 en Varik-01 zijn naast punctuele gegevens ook temperatuurlogs beschikbaar. De trend geobserveerd in deze logs wijkt duidelijk af van de gemiddelde trend: de logs tonen significant hogere temperaturen op geringe diepte. Dit wijst er op dat het temperatuurprofiel rond het boorgat nog beïnvloed is door de circulatie van de boorspoeling. Voor deze boringen werd enkel rekening gehouden met de maximaal geregistreerde temperatuur nabij einddiepte. Voor de andere boringen werd maximale sectietemperaturen van boorgatmetingen gebruikt. Indien mogelijk werd een Horner-correctie uitgevoerd. De gebruikte temperatuurdata is weergegeven in bijlage.



*Figuur 48: Temperatuur – diepte trend vastgesteld in de 8 boringen. De onderbroken lijnen tonen het 95% betrouwbaarheidsinterval van de geschatte waarde op basis van de lineaire regressie.*

De geothermische gradiënt berekend op basis van de boringen bedraagt  $0,0353 \pm 0,0026$  °C per meter (95% betrouwbaarheidsinterval). De geschatte oppervlaktetemperatuur bedraagt  $4,5 \pm 6,1$  °C. De waarde is aanmerkelijk lager dan de 10°C die vaak wordt aangehouden als oppervlaktetemperatuur. Op basis van het eindrapport van SCAN Dinantien WP2.3 Temperatuur Model werd voor deze studie een oppervlaktetemperatuur van 8°C aangenomen (Békési et al. 2020; Veldkamp & Hegen, 2020). Een waarde van 8°C resulteert in een kleinere misfit van gemodelleerde waarden met de metingen op geringe diepte (< 2000 m). De lage temperatuur in ondiepe grondlagen is toe te schrijven aan de lage gemiddelde temperatuur gedurende de laatste ijstijd. (Békési et al., 2020). De gemiddelde gradiënt van 35,3°C/km ligt iets hoger dan die gerapporteerd door Bonté et al. (2012) van 31,3°C/km (voor gans Nederland) op basis van boorgatmetingen. Ook Békési et al. (2020) vermelden een gemiddelde gradiënt van 31°C/km.

### 9.1.3. THERMISCHE GELEIDBAARHEID

De thermische geleidbaarheid voor de verschillende lithostratigrafische eenheden werd berekend op basis van de mineralogische samenstelling en geschatte porositeit en data voor de thermische geleid-

baarheid van gesteenten en mineralen uit Clauser & Huenges (1995). Voor de meeste gesteentetypes neemt porositeit af met de begravingsdiepte. In vergelijking met de meeste mineralen is de thermische geleidbaarheid van water laag. Dit verschil resulteert in een toename van de thermische geleidbaarheid met dalende porositeit. Voor gesteenten met een isotrope warmtegeleidbaarheid resulteert dit in een toename van de thermische geleidbaarheid met de diepte.

Bepaalde mineralen, waaronder kleien, vertonen grote verschillen in warmtegeleiding naargelang de richting van het warmtetransport ten opzichte van de kristalstructuur. Wanneer deze mineralen een voorkeursoriëntatie aannemen in een gesteentelaag, resulteert dit in verschillende thermische geleidbaarheden voor horizontaal en verticaal warmtetransport. Een voorbeeld hiervan zijn kleiafzettingen. In eerste instantie neemt de thermische geleidbaarheid toe doordat de porositeit sterk daalt en water uitgedreven wordt. Naarmate de begraving toeneemt, worden de kleiblaadjes samengedrukt en komen ze meer en meer parallel te liggen met de gelaagdheid. De meeste kleimineralen vertonen een uitgesproken anisotrope warmtegeleidbaarheid: de warmtegeleidbaarheid loodrecht op de kleiblaadjes is tot een factor 10 lager dan die parallel aan de blaadjes (Clauser & Huenges, 1995). Door de toenemende mate van oriëntatie van de kleideeltjes keert de relatie met de diepte op een gegeven begravingsdiepte om. Een afname van de thermische geleidbaarheid met de diepte treedt op in de kleirijke afzettingen van het Boven-Carboon.

De samenstelling van een lithostratigrafische eenheden werd afgeleid uit boorgatmetingen. Eerst werd de kleifractie ( $V_{sh}$ ) berekend aan de hand van de totale GR op basis van de gamma ray index ( $I_{GR}$ ).  $V_{sh}$  voor Tertiaire gesteenten werd vervolgens berekend met het model voorgesteld door Clavier et al. (1971). Voor oudere gesteenten werd het model van Larionov (1969) gebruikt.

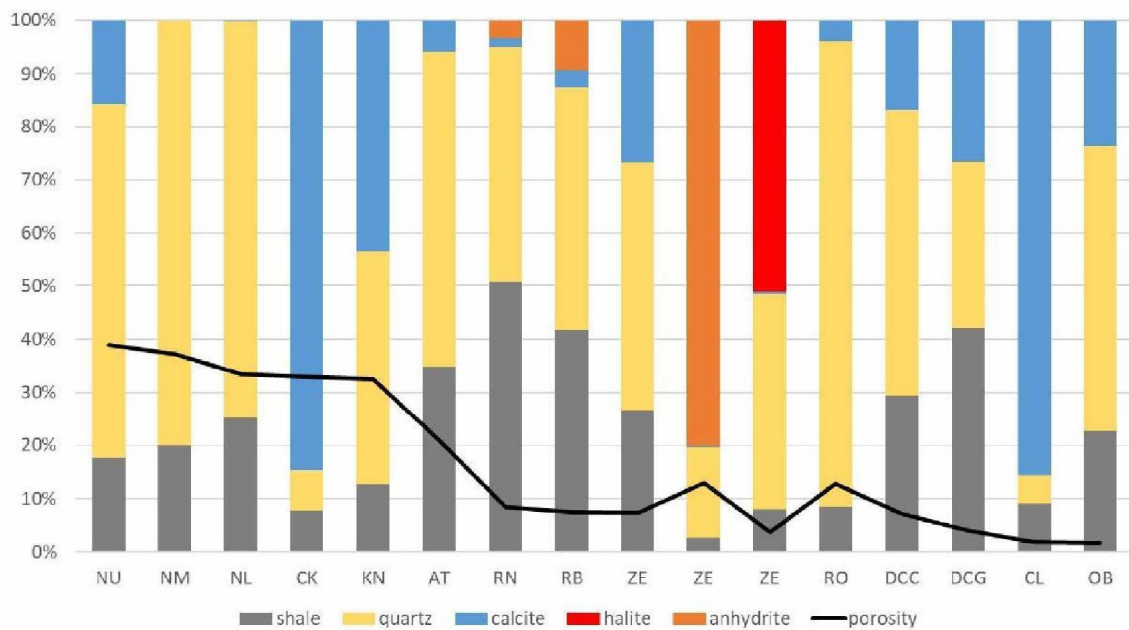
*Vergelijking 5*

$$0 \leq I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{shale} - GR_{min}} \leq 1$$

Met  $GR_{log}$  de gemeten gamma-ray waarde,  $GR_{shale}$  de gamma-ray reading voor zuivere klei(steen) en  $GR_{min}$  de waarde voor zuiver(e) zand(steen) of kalksteen. Voor  $GR_{shale}$  werd een waarde van 200 API aangenomen. Voor  $GR_{min}$  werd een waarde van 15 API gebruikt.

Vervolgens werd aan de hand van de densiteit en sonic log de fractie kwarts en kalk vastgesteld. Voor de Zechstein Groep werd onderscheid gemaakt tussen siliciclastische eenheden, en zout- en anhydrietrijke eenheden. Op basis van de bekomen mineralogie werd de matrixdensiteit en matrixtraagheid berekend. Deze waarden werden gebruikt om porositeit in te schatten op basis van de densiteit en sonic logs. De gemiddelde mineralogie en porositeit voor de verschillende lithostratigrafische (sub)groepen is weergegeven in Figuur 49.





*Figuur 49: Gemiddelde mineralogische samenstelling en porositeit voor de lithostratigrafische (sub-) groepen.*

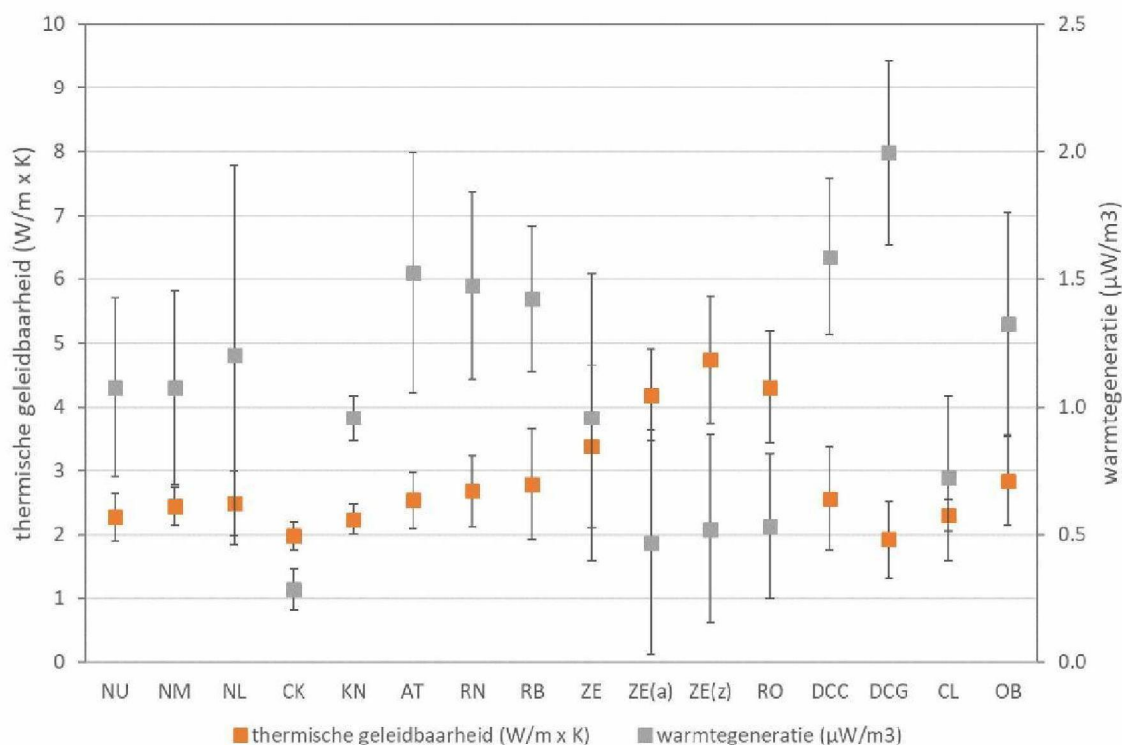
Uit de geschatte mineralogie en porositeit werd vervolgens de thermische geleidbaarheid voor de matrix berekend (Clauser & Huenges, 1995). De thermische geleidbaarheid voor het gesteente is het product-verhouding van de thermische geleidbaarheid van de matrix en van de poriënvloeistof. De thermische geleidbaarheid van water is merkkelijk lager dan die van de meeste matrixmineralen. Ze werd berekend aan de hand van de formule:

*Vergelijking 6*

$$TC_w = 0.4781 * T^{0.0794}$$

Met  $TC_w$  de thermische geleidbaarheid in W/m x K en T de temperatuur in °C.

Het resultaat voor de verschillende lithostratigrafische eenheden aangetroffen in de boringen gaat in Figuur 50. Uit de berekende waardes werden dieptetrends afgeleid die gebruikt werden om de thermische geleidbaarheid in te schatten op locaties waar geen boorgegevens beschikbaar zijn.



Figuur 50: Berekende thermische geleidbaarheid en warmtegeneratie voor de lithostratigrafische (sub)groepen.

#### 9.1.4. WARMTEGENERATIE

De warmteflux op een bepaalde plaats wordt niet alleen bepaald door de (tektonische) warmteflux vanuit de mantel naar het aardoppervlak. In de aardkorst bevinden zich immers gesteenten die zelf ook warmte produceren. Deze warmte is afkomstig van het natuurlijk radioactief verval van sommige elementen of isotopen, zoals Uranium ( $U^{238}$ ), Thorium ( $Th^{232}$ ) en Kalium ( $K^{40}$ ). Deze elementen zijn net aangerijkt in de aardkorst. De warmteflux aan het oppervlak is de som van de tektonische warmteflux (warmte afkomstig uit de mantel) en de warmte gegenereerd door de gesteenten in de korst.

De mate van radiogene warmtegeneratie van een gesteente hangt af van de samenstelling van het gesteente en wordt bepaald door de concentratie aan radioactieve isotopen. Rybach (1986) stelde een formule op waarbij de warmtegeneratie berekend wordt op basis van de concentraties aan  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  en  $K^{40}$ , in combinatie met de densiteit van het gesteente. Spectrale gammametingen (*Gamma Ray* of GR) worden niet standaard gedaan bij het uitvoeren van boorgatmetingen. Met uitzondering van de boringen Maasbommel-01 en Maasbommel-02 zijn voor alle boringen volledige totale GR logs beschikbaar. Bucker & Rybach (1996) stelden een empirische relatie op voor de radiogene warmtegeneratie in functie van de totale GR meting. Dit is mogelijk omdat de gevoeligheid van de GR meetsondes voor U, Th en K in dezelfde proporties liggen als de constanten in de formule op basis van de spectraalmetingen. Deze benadering is geldig zolang de verhoudingen Th/U en K/U vrij constant blijven.

Vergelijking 7

$$A = 0.0158 \times (GR[API] - 0.8)$$



Hierbij zijn:

- A: radiogene warmtegeneratie in  $\mu\text{W}/\text{m}^3$
- GR [API]: totale GR meting in API eenheden

Vergelijking 5 werd gebruikt om per boring de warmtegeneratie voor de verschillende lithostratigrafische eenheden te berekenen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 50 en in bijlage A.

#### 9.1.1. WARMTEFLUX

De oppervlaktewarmteflux berekend voor de verschillende boringen is weergegeven in Tabel 16. De meeste waarden vallen rond  $0,07 \text{ W}/\text{m}^2$ . De warmteflux voor Nijmegen-Valburg-01 en Gewande-01 liggen rond  $0,08 \text{ W}/\text{m}^2$ . De resultaten voor de verschillende boringen zijn weergegeven in bijlage B.

Tabel 16: Oppervlaktewarmteflux berekend voor de geselecteerde boringen.

boring	warmteflux ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	standaarddeviatie ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
Bronkhorst-01	0.0719	0.0084
Buurmalsen-01	0.0678	0.0042
Gewande-01	0.0838	0.0012
Maasbommel-01	0.0648	0.0051
Maasbommel-02	0.0651	0.0038
Nijmegen-Valburg-01	0.0818	0.0009
Varik-01	0.0765	0.0055
Winterswijk-01	0.0709	0.0085

#### 9.2. TEMPERATUUR AAN DE TOP VAN DE GEUL SUBGROEP

Het temperatuurprofiel tot aan de top van de Geul Subgroep werd berekend voor 3 locaties: de boringen Maasbommel-02 en Nijmegen-Valburg-01 en een locatie op de terreinen van Smurfit Kappa Parengo in Renkum.

De lithostratigrafische indeling voor deze locaties werd overgenomen uit het dieptemodel. Voor de twee boring in het modelgebied werd de aangeboorde sequentie verdiept tot aan de basis van de Geul Subgroep. Op deze locaties werd het model gefit aan de geobserveerde temperaturen. Voor de locatie Smurfit Kappa werd er uitgegaan van een warmteflux aan het oppervlakte van  $0,0695 \pm 0,0045 \text{ W}/\text{m}^2$ . De verwachte lithostratigrafische opeenvolging is weergegeven in (zie Tabel 17). De geschatte temperaturen inclusief 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Tabel 18.

Het berekende temperatuurprofiel voor de locatie Smurfit Kappa (Renkum) is weergegeven in bijlage C.

Tabel 17: Diepte van de basis van de lithostratigrafische eenheden op de locatie Smurfit Kappa.

	Smurfit Kappa
maaiveld	+3,3 m NAP
Boven-Noordzee Groep	530
Midden en Onder-Noordzee Groep	940
Krijtkalk Groep	1043
Rijnland Groep	1336
Onder-Germaanse Trias Groep	-
Zechstein Groep	-
Boven-Rotliegend Groep	-
Caumer Subgroep	3911
Geul Subgroep optie 1	5401
Geul Subgroep optie 2	6395
Geul Subgroep optie 3	7502

Tabel 18: Geschatte temperatuur aan de basis van de Geul Subgroep met 95% betrouwbaarheidsinterval uitgaande van optie 2 van het dieptemodel.

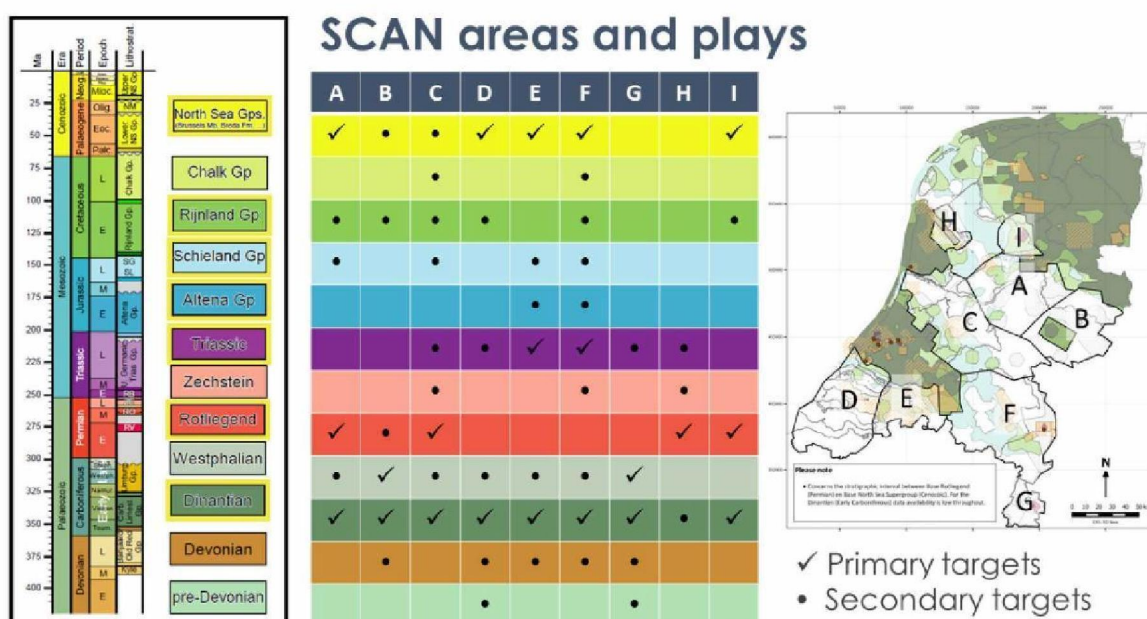
Boring	diepte	temperatuur
Maasbommel-02	5082 m	181 +/-17°C
Nijmegen-Valburg-01	4021 m	162 +/- 7°C
Smurfit Kappa	6395 m	243 +/- 33°C



## HOOFDSTUK 10. POTENTIËLE LOCATIES VOOR GEOTHERMIE

## 10.1. ALGEMEEN

Er zijn in de ondergrond in de regio meerdere geologische formaties die in meer of mindere mate potentieel bieden voor geothermie. ter Borgh & Mijnlieff (2019) hebben een overzicht gemaakt van primaire en secundaire targets in het gebied (Figuur 51). Voor de ruime regio zijn in die studie de Rotliegend Groep en de Kolenkalk Groep als primaire targets aangeduid. Er zijn echter meerdere secundaire targets. Hun geschiktheid in de omgeving van Nijmegen en Renkum is afhankelijk van hun eigenschappen, dikte en temperatuur.



Figuur 51: Overzicht van primaire en secundaire targets voor geothermie (ter Borgh & Mijnlieff, 2019). De regio Renkum-Nijmegen maakt deel uit van gebied C, waarvoor de Rotliegend Groep en de Kolenkalk Groep als primaire targets en het bovenste deel van de Limburg Groep (Westfaal), Zechstein, Trias en Rijnland groepen als secundaire targets zijn aangeduid.

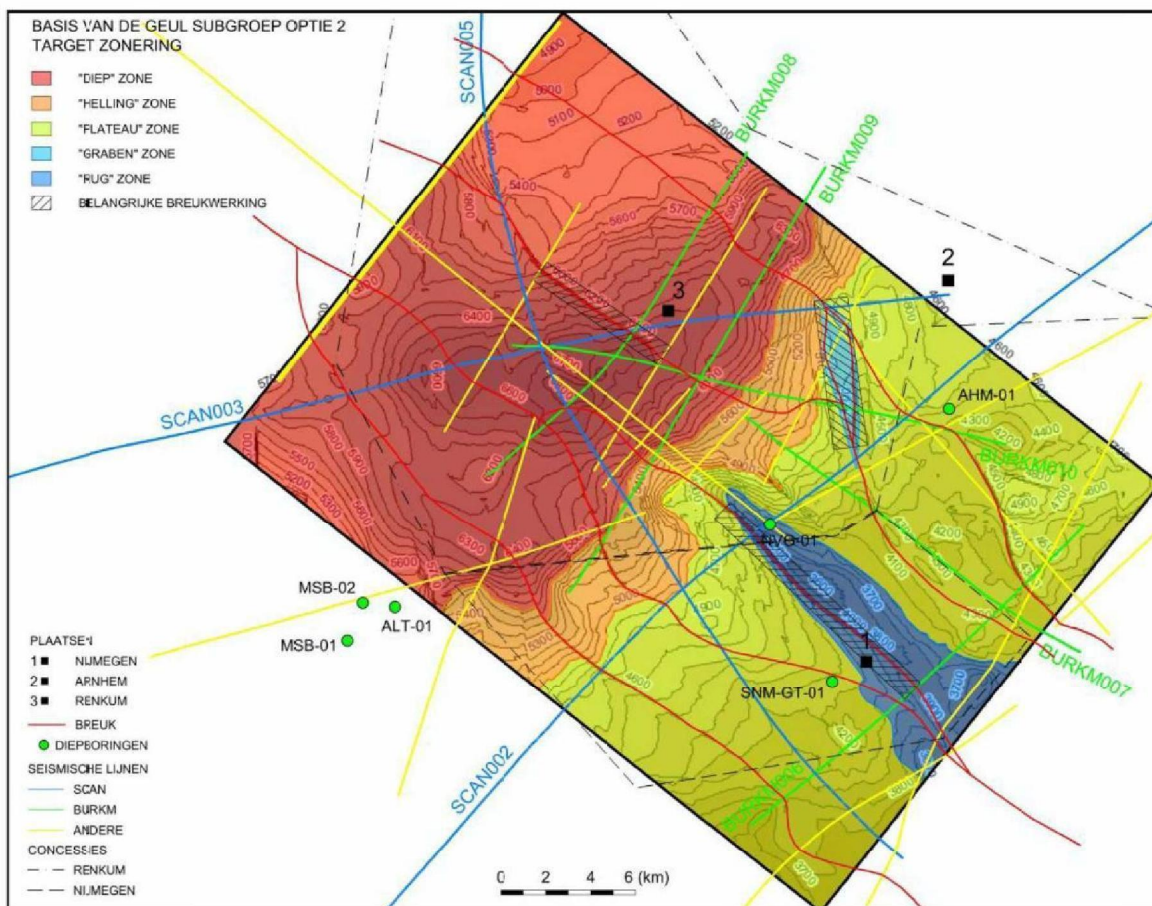
## 10.1.1. ONDIEPE TARGETS

De inschatting van de samenstelling en reservoirkarakteristieken van de ondiepe formaties (of targets) is grotendeels ongewijzigd op basis van deze studie. Enkel de inschatting van de diepte is voor sommige (diepe) pakketten significant bijgesteld, voor andere (ondiepe) pakketten is de diepte nagenoeg ongewijzigd. Aan de hand van het geactualiseerd geologische model zijn temperatuur-berekeningen uitgevoerd voor enkele locaties in het gebied. Deze geven aan wat de temperatuur is voor de verschillende potentiële reservoirs. Die is voor de meeste targets eerder aan de lage kant. Aan de hand van geschatte temperatuur kan een idee bekomen worden van hun potentieel en geschiktheid voor de winning van aardwarmte, afhankelijk van het type toepassing en de warmtevraag. De diepte en temperatuur van de ondiepere targets zijn mee opgenomen in het overzicht per locatie.

De enige ondiepe primaire target geselecteerd door ter Borgh & Mijnlieff (2019) in de ruime regio (SCAN gebied C) is de Rotliegend Groep. Deze ontbreekt echter ter hoogte van de site in Renkum. De Vlieland zandsteen (Rijnland Groep) vormt één van de secundaire targets. Dit pakket zou mogelijk aanwezig kunnen zijn aan de basis van de Rijnland Groep in het gebied nabij Renkum, waar deze sequentie een grotere dikte vertoont. De inschatting van de diepte en temperatuur van dit pakket in de omgeving van Renkum is weergegeven in Tabel 19.

#### 10.1.2. TARGETS IN DE KOLENKALK GROEP

Voor de top van de Kolenkalk Groep is een zonering opgesteld die een algemene indicatie geeft omtrent de mogelijke geschiktheid als target voor (ultra)diepe geothermie. Op basis van de diepte van het top-vlak van de Kolenkalk Groep, het (zeer speculatieve) mogelijk faciës (primaire porositeit) van het gesteente van de Kolenkalk Groep volgens het model van Wilson (1975) en de aanwezigheid van breuken (secundaire porositeit) aan de top van de Kolenkalk Groep zijn 5 kleurenzones afgebakend. Het belang van het breukverzet aan het top-vlak van de Kolenkalk Groep (arcering) is als apart criterium binnen de zonering weergegeven. Aangezien de temperatuur reeds 137°C bedraagt op de plaats waar het top-vlak van de Kolenkalk Groep het minst diep ligt, wordt er van uitgegaan dat dit de minimale temperatuur is voor gans het model-gebied. De temperatuur wordt bijgevolg niet als onderscheidende factor aanzien.



Figuur 52: Zonering van het top-vlak van de Kolenkalk Groep in het model-gebied.

Zone 1 of de "diep" zone ligt, zoals de naam zegt, ter hoogte het "diep" in het top-vlak van de Kolenkalk Groep. De zone wordt door enkele breuken doorsneden maar enkel breuk (14) nabij de



Smurfit Kappa site vertoont een belangrijk breukverzet ter hoogte van het top-vlak van de Kolenkalk Groep.

Zone 2 of de “helling” zone neemt qua diepte en lithologie van de Kolenkalk Groep een intermediaire positie aan tussen zone 1 en zone 3.

Zone 3 of de “plateau” zone bevindt qua positie van het top-vlak van de Kolenkalk Groep op een goede diepte om de nodige temperatuur te halen. De zone wordt ter hoogte van het top-vlak van de Kolenkalk Groep doorsneden door enkele breuken. De breuken met het belangrijkste verzet bevinden zich hier ter hoogte van de “rug” en de “graben” die als aparte zones weergegeven worden. Zone 4 of de “graben” zone bevindt zich op het “plateau” en beschikt bijgevolg over dezelfde karakteristieken. Het onderscheid met de “plateau” zone ligt in het samenkomen van verschillende breuken aan de top van de Kolenkalk Groep, met een hogere kans op secundaire porositeit.

Zone 5 of de “rug” zone bevindt zich eveneens op het “plateau” en beschikt bijgevolg ook over dezelfde karakteristieken. Het onderscheid zit hier enerzijds in de enkele honderden meters dat de top van de Kolenkalk Groep er minder diep zit en anderzijds in het samenkomen van verschillende breuken ter hoogte van de top van de Kolenkalk Groep, met de mogelijkheid dat het gesteente er sterk opgebroken is en bijgevolg een hogere kans heeft op secundaire porositeit. Verder vertonen breuken (8) en (9) in deze zone een belangrijk breukverzet aan de top van de Kolenkalk Groep.

Op basis van het faciësmodeel van Wilson (1975) zou zone 1 (diep) minder gunstig zijn qua lithologie, en zone 3 (plateau) net meer gunstig. Hierbij dient wel vermeld dat dit faciës criterium een zeer speculatief criterium is, aangezien het paleoreliëf aan de top van de Kolenkalk eerder een gevolg lijkt te zijn van een door subsidentie gecontroleerde sedimentatie, dan een gevolg van de opbouw van een carbonaatplatform. Bovendien verwijst dit criterium ook enkel naar de primaire porositeit, die volgens Mozafari et al. (2019) overal beperkt zou zijn. Het model van Wilson (1975) geeft geen indicaties wat betreft het voorkomen van secundaire porositeit en permeabiliteit.

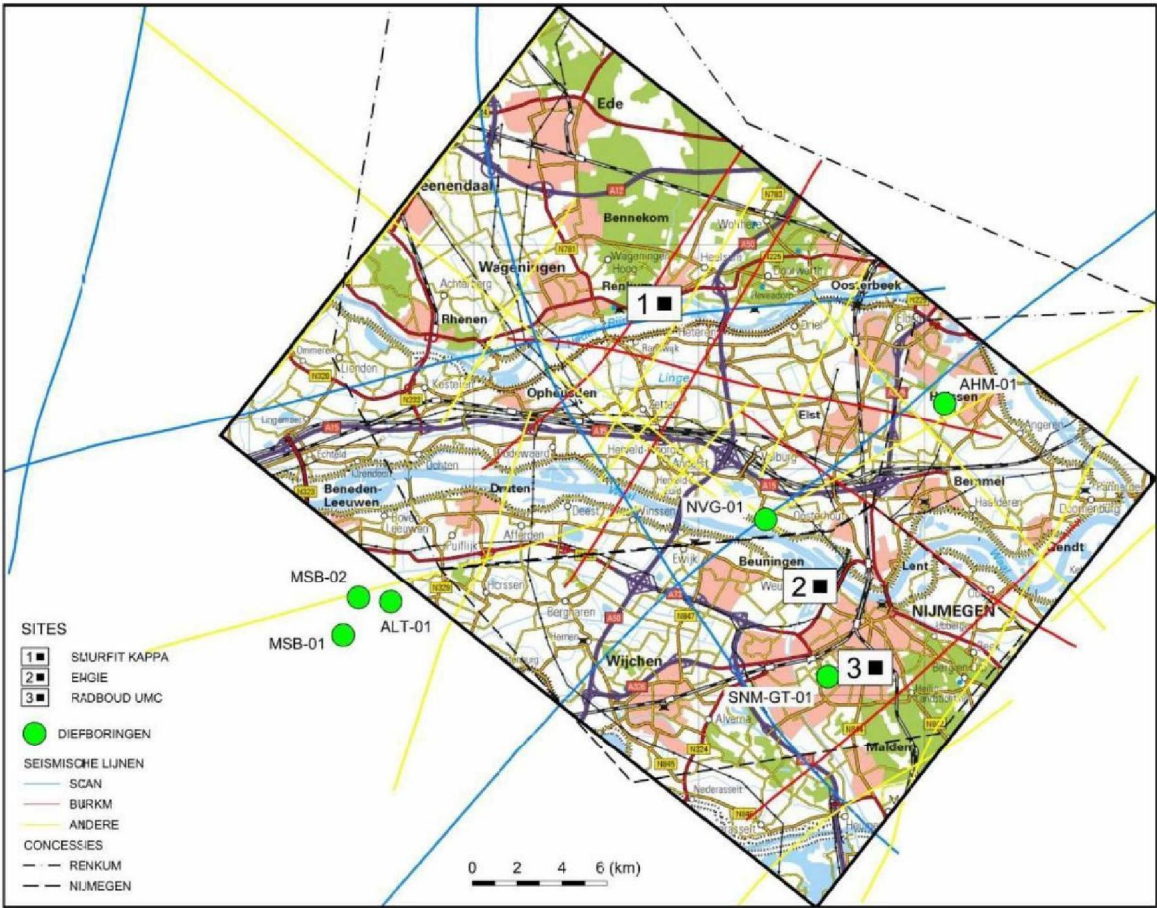
## 10.2. ONDERZOCHE SITES

Voor 3 sites is de diepte van en de temperatuur aan de top van de Kolenkalk Groep (voor de 3 opties) bepaald:

- Site 1: SMURFIT KAPPA te Renkum met approximatieve RD-coördinaten (178550, 442350).
- Site 2: ENGIE ten noorden van Nijmegen, aan de samenkomen van de Waal en het Maas-Waalkanaal, met approximatieve RD-coördinaten (185450, 429850).
- Site 3: RADBOUD UMC in het centrum van Nijmegen met approximatieve RD-coördinaten (187850, 426250).

### 10.2.1. SMURFIT KAPPA

De Smurfit Kappa site is gelegen op de noordoever van de Neder-Rijn te Renkum. Volgende tabel geeft de diepte en de temperatuur weer die er ter hoogte van het basis-vlak van de verschillende lithostratigrafische eenheden verwacht wordt. Hierbij is voor de temperatuur ook het 95% betrouwbaarheidsinterval ( $2 \times \text{StDev}$ ) weergegeven.



Figuur 53: Situering van de sites ten opzichte van het model-gebied, de seismische data en diepboringen.

Tabel 19: De diepte en temperatuur ter hoogte van de basis van de verschillende gemodelleerde lithostratigrafische eenheden ter hoogte van de Smurfit Kappa site te Renkum.

Smurfit Kappa Site			
Lithostratigrafische eenheid	Diepte (m) NAP	Temperatuur (°C)	2 x StDev (°C)
Boven Noordzee Groep	530	26	+ 2
Midden en Onder Noordzee Groep	940	39	+ 4
Krijtkalk Groep	1043	43	+ 5
Rijnland Groep	1336	53	+ 6
Onder Germaanse Trias Groep	-	-	-
Zechstein Groep	-	-	-
Boven Rotliegend Groep	-	-	-
Caumer Subgroep	3911	128	+ 16
Geul Subgroep - optie 1	5401	185	+ 24
Geul Subgroep - optie 2	6395	243	+ 33
Geul Subgroep - optie 3	7502	332	+ 48



Temperaturen hoger dan 100°C worden pas bereikt binnen de gesteenten van de Caumer Subgroep. De temperaturen en het bijhorende 95% betrouwbaarheidsinterval voor de gesteenten van de Limburg Groep zijn berekend op basis van de diepte vastgelegd met de “all areas” waarden voor  $k$  en  $V_0$  overeenkomstig ten Veen et al. (2019). Bij deze diepte hoort eveneens een 95% betrouwbaarheidsinterval berekend aan de hand van de standaarddeviatie op de  $V_{int}$ -waarde. Hiervoor wordt het gemiddelde (260 m/s) van de standaardafwijking op  $V_{int}$  genomen van de klassen 1, 3 en 4 uit ten Veen et al. (2019) waarbinnen het model-gebied gelegen is (zie hoofdstuk 6). Onderstaande tabel geeft de berekende waarden voor het 95% betrouwbaarheidsinterval bij de diepte weer voor de verschillende geïnterpreteerde horizonten binnen de Limburg Groep.

*Tabel 20: De diepte van de basis van de Caumer Subgroep en van de 3 opties voor de basis van de Geul Subgroep, met opgave van de standaarddeviatie op de diepte, de dikte, de intervalsnelheid en de tijd-dikte van het pakket bij gebruik van de “all areas” waarden voor de oppervlakesnelheid en de snelheidsgradiënt voor de Limburg Groep.*

Smurfit Kappa Site "all areas"	$V_0$ (m/s) = 3448	$k$ (1/s) = 0,2524	StDev op $V_{int}$ (m/s) = 260		
Horizont	Diepte (m NAP)	2 x StDev (m)	Dikte (m)	$V_{int}$ (m/s)	Tijd-dikte (ms)
Caumer Subgroep	3911	$\pm 326$	2580	4110	1256
Geul Subgroep Optie 1	5401	$\pm 168$	1491	4623	645
Geul Subgroep Optie 2	6395	$\pm 272$	2488	4749	1048
Geul Subgroep Optie 3	7502	$\pm 383$	3602	4888	1474

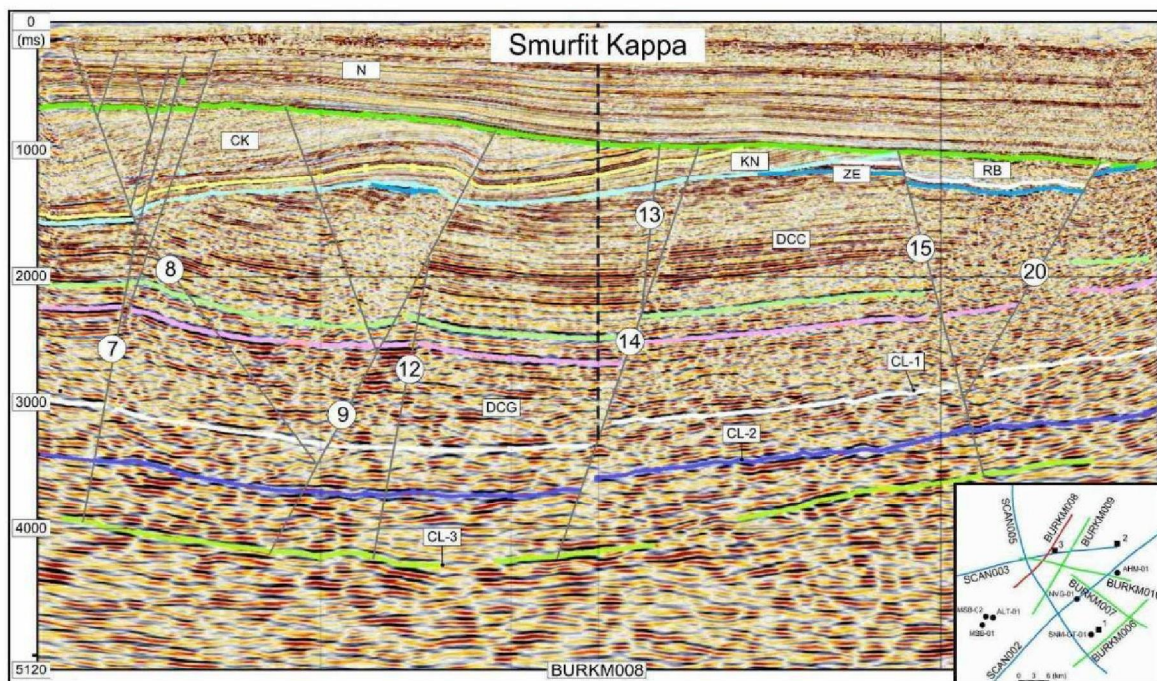
Worden de dieptes berekend met de “non-inverted areas” waarden voor  $k$  en  $V_0$  overeenkomstig ten Veen et al. (2019), dan wordt het betrouwbaarheidsinterval bepaald met het gemiddelde (262,5 m/s) van de standaardafwijking op  $V_{int}$  genomen van de klassen 1 en 3 uit ten Veen et al. (2019) waarbinnen het 2/3 van het model-gebied gelegen is (zie hoofdstuk 6). In dat geval geeft onderstaande tabel de berekende waarden voor het 95% betrouwbaarheidsinterval bij de diepte weer voor de verschillende geïnterpreteerde horizonten binnen de Limburg Groep. Voor de top van de Kolenkalk Groep (basis Geul Subgroep Optie 2) levert dit een verschil in diepte van ongeveer 60 m op, wat ruimschoots binnen de grenzen van het 95% betrouwbaarheidsinterval ( $\pm 272$  m) valt. De impact van het gebruik van de andere  $k$ - en  $V_{int}$ -waarden lijkt bijgevolg beperkt te zijn. Dit is zeker het geval wanneer het diepteverval relatief wordt uitgezet ten opzichte van de totale diepte ( $< 1\%$ ) waarop de basis van het pakket zich bevindt.

*Tabel 21: De diepte van de basis van de Caumer Subgroep en van de 3 opties voor de basis van de Geul Subgroep, met opgave van de standaarddeviatie op de diepte, de dikte, de intervalsnelheid en de tijd-dikte van het pakket bij gebruik van de “non inverted areas” waarden voor de oppervlakesnelheid en de snelheidsgradiënt voor de Limburg Groep.*

Smurfit Kappa Site "non inverted areas"	$V_0$ (m/s) = 3213	$k$ (1/s) = 0,3188	StDev op $V_{int}$ (m/s) = 262,5		
Horizont	Diepte (m NAP)	2 x StDev (m)	Dikte (m)	$V_{int}$ (m/s)	Tijd-dikte (ms)
Caumer Subgroep	3865	$\pm 330$	2538	4042	1256
Geul Subgroep Optie 1	5426	$\pm 169$	1516	4701	645
Geul Subgroep Optie 2	6454	$\pm 275$	2549	4865	1048
Geul Subgroep Optie 3	7615	$\pm 387$	3721	5050	1474



De temperatuur weergegeven voor de basis van de Geul Subgroep Optie 3 stelt de temperatuur voor aan de top van de Kolenkalk in geval optie 3 daar de meest plausibele kandidaat voor zou zijn. De opgegeven waarde stelt niet de temperatuur aan de basis van de Kolenkalk Groep voor, in het geval optie 2 de top van de Kolenkalk zou voorstellen en optie 3 het grensvlak zou vormen tussen de gesteenten van het Dinantiaan en het Devoon. Om die temperatuur te berekenen dienen er andere waarden voor de thermische geleidbaarheid en de warmtegeneratie gebruikt te worden, eigen aan de sedimenten van de Kolenkalk Groep, en niet de waarden eigen aan de sedimenten van de Geul Subgroep zoals nu het geval is.



Figuur 54: Situering van de Smurfit Kappa site op seismische lijn BURKM008 ten opzichte van breuk (14) en de verschillende opties voor de basis van de Geul Subgroep.

Naast de temperatuur speelt de porositeit en de permeabiliteit van het gesteente van de Kolenkalk Groep een zeer belangrijke rol wat betreft geothermisch potentieel. Deze parameters kunnen ingeschat worden aan de hand van pompproeven, geofysische boorgatmetingen en/of testen op gesteentemonsters. Seismisch onderzoek op zich is niet in staat om deze parameters te kwantificeren. Op basis van de zeer speculatieve correlatie van het “plateau”, de “helling” en het “diep” met de “organic build-up”, “foreslope” en “deep shelf margin” volgens het carbonaat facies model van Wilson (1975, zie ook Tucker, 1985 en Flügel, 2004) zijn er beperkte kwalitatieve uitspraken mogelijk met betrekking tot porositeit en permeabiliteit. Verwacht wordt dat de primaire porositeit het grootst is in de “organic build-up”, opgebouwd uit rifvormende organismen. De “foreslope” is opgebouwd uit grove afbraak producten van de “organic build-up”, opgevulde holtes en kleinere “downslope mounds”. De “deep shelf margin” bestaat hoofdzakelijk uit fijn gelamineerd puinmateriaal en turbidieten. De primaire porositeit zal dan ook hellingafwaarts afnemen. Aangezien de Smurfit Kappa site zich boven het “diep” bevindt, zal de primaire porositeit daar bijgevolg eerder beperkt zijn. Hierbij moet opgemerkt worden dat op basis van het Wilson model enkel uitspraken kunnen gedaan worden over de primaire porositeit. Volgens Mozafari et al. (2019) is deze sowieso eerder beperkt en moet gezocht worden naar plekken met een verhoogde secundaire porositeit.



Daar kunnen op basis van het Wilson model geen uitspraken over gedaan worden. Bovendien zijn er aanwijzingen dat de diepteverschillen aan de top van de Kolenkalk eerder een gevolg lijken te zijn van een door subsidentie gecontroleerde sedimentatie, dan een gevolg van de opbouw van een carbonaatplatform.

De studie van Mozafari et al. (2019) stelt dat vroege neerslag van mariene en meteorische calcië in de matrix van de Dinantiaan kalksteen geresulteerd heeft in verstopping of vermindering van de primaire poriën. De matrixporositeit in de kalkstenen is derhalve laag en zo ook de permeabiliteit. Carlson (2019) geeft op basis van petrofysische analyses aan dat de porositeit meestal minder dan 2% bedraagt en over lange intervallen kleiner is dan 1%. Lokaal, over korte intervallen, komen zones voor met een hogere porositeit (2 à 6% en zeer lokaal tot 25 à 32%). Het gaat hier om zones met secundaire porositeit die geassocieerd zijn met karst en dolomitatie en die de permeabiliteit kunnen verhogen. Dolomitatie wordt hoofdzakelijk aan de basis van de Kolenkalk Groep verwacht. Karst komt eerder voor op de overgang naar de Limburg Groep, maar kon op de nieuwe seismiek niet onmiddellijk vastgesteld worden.

De meest permeabele zones binnen de Kolenkalk Groep worden verwacht nabij scheuren en breuken. Ter hoogte van de Smurfit Kappa site worden de gesteenten van de Limburg Groep en de Kolenkalk Groep doorsneden door een zuidwest hellende breuk (14) met een verzet van ongeveer 200°m voor de basis van de Geul Subgroep Optie 2. Zones rond breuken in carbonaatgesteenten worden opgebroken waardoor er breccie en spleten gevormd worden (Cain et al., 1996). Deze beschadigde zone is meestal uitgebreider dan de breuk zelf en kan hydraulisch gezien een belangrijke bijdrage leveren wat betreft bulk permeabiliteit (Loveless et al., 2014). Binnen de brosse gesteenten van de Kolenkalk Groep vormen deze zones rond breuken dan ook belangrijke stromingskanalen. Kanalen langswaar hydrothermale vloeistoffen kunnen circuleren en langswaar verkarsting kan optreden met een verhoging van de secundaire porositeit als gevolg. Dit in tegenstelling tot klastische gesteenten waarbij vervorming rond en in breuken plaatsvindt in smalle banden waarbinnen cataclasis (verpletteren, vermalen, uitsmeren van het oorspronkelijke gesteente en breken, rollen en schuiven van korrels) optreedt. Dit zorgt voor reductie van porositeit en bijgevolg ook van permeabiliteit. Is hierbij nog klei aanwezig in het oorspronkelijke gesteente, dan kan deze langs het breukvlak uitgesmeerd worden en de breuk afdichten. Verwacht wordt bijgevolg, dat de breukzone binnen de carbonaatgesteenten van de Kolenkalk Groep tot een verhoging van de permeabiliteit zal bijdragen, terwijl het omgekeerde het geval is binnen de klastische gesteenten van de Limburg Groep. Het is echter onbekend of de gecreëerde permeabiliteit langs breukzones nog steeds aanwezig is, of na het stoppen van de breukwerking weer teniet gedaan is door diagenetische processen (precipitatie van mineralen).

---

HOOFDSTUK 11. CONCLUSIES

---

Met als doel een beter inzicht in de opbouw van de ondergrond te verkrijgen voor wat betreft aardwarmtewinning, zijn in de omgeving van Renkum en Nijmegen, als onderdeel van het SCAN programma, nieuwe seismische data vergaard binnen de regionale seismische survey L2EBN2019A en de lokale seismische survey L2EBN2020B. Deze nieuwe data geven een beeld van de ondergrond tot op ongeveer 5000°ms of 10°km diepte.

Aan de hand van een seismostratigrafische en structurele interpretatie van de nieuwe data is een lokaal geologisch 3D-tijdmodel opgesteld van 24 bij 34°km. Dit tijdmodel is met behulp van de formule van Japsen (1993) en op basis van de  $k$ -,  $V_0$ - en  $V_{int}$ -waarden van Pluymaekers et al. (2017) en ten Veen et al. (2019) geconverteerd naar een geologisch 3D-dieptemodel. Door een iteratief proces, waarbij verschillen in diepte tussen model-vlakken en bestaande waarnemingen worden weggewerkt, is het 3D-dieptemodel gekalibreerd en opgehangen aan diepboringen binnen het onderzoeksgebied.

Dit lokale dieptemodel bevestigt de opbouw van de ondergrond in het zuiden van de provincie Gelderland voor de ondiepe lithostratigrafische eenheden (Boven Noordzee Groep, Midden en Onder Noordzee Groep, Krijt kalk Groep, Rijnland Groep, Onder Germaanse Trias Groep, Zechstein Groep en Boven Rotliegend Groep), zoals gekend uit het bestaande geologische model DGM-diep v5. De stratigrafische en structurele opbouw van de voornoemde ondiepe eenheden is in dit lokale model meer in detail uitgewerkt, maar past volledig binnen het gekende regionaal geologische kader.

Het top-vlak van de gesteenten van de Limburg Groep is doorsneden door een reeks zuidoost-noordwest georiënteerde breuken die verschillende structurele elementen aflijnen. In het zuidwesten van het model-gebied zijn een drietal antiforme en synforme structuren aanwezig, het noordoostelijke deel daarentegen is gekenmerkt door een paar horst- en graben-structuren. De breuken die de horst- en graben-structuren begrenzen hebben een normaal verzet, de breuken die de antiforme en synforme structuren begrenzen vertonen hoofdzakelijke inverse bewegingen. Mogelijk zijn de antiforme structuren als “positive flower structures” te aanzien en de graben structuren als “negative flower structures”, beide gekoppeld aan “strike-slip” bewegingen langs de aangrenzende breuken. Aan de hand van de huidige positie en de verandering in dikte van de gemodelleerde pakketten blijkt dat de zin van de breukbewegingen in de loop van de geologische geschiedenis meermaals gewijzigd is.

Het model toont een geheel nieuwe opbouw voor wat de diepe lithostratigrafische eenheden onder het top-vlak van de gesteenten van de Limburg Groep betreft (Caumer Subgroep en 3 opties voor de Geul subgroep). Het basis-vlak van de 4 gemodelleerde diepe horizonten bestaat uit een “plateau” in het zuidoosten en een “diep” in het noordwesten van het model-gebied, met daartussen een zuidwest-noordoost georiënteerde “helling” met een gemiddelde steilte van 20° over een afstand van 3 à 4°km. De vorm van dit paleoreliëf doet denken aan de opbouw van een carbonaatplatform overeenkomstig het depositionele facies model van Wilson (1975). Echter, op basis van de diepteverdeling, dikteverdeling en de toename, stratigrafisch gezien, van boven naar onder in dikte en hellingsgraad per pakket, wordt de vorm van dit paleoreliëf aanzien als zijnde een gevolg van een hoofdzakelijk door subsidentie gecontroleerde sedimentatie.



Aan de hand van een correlatie langs seismische lijnen (MZ88-53, SCAN005, SCAN 002, SCAN016 en 09-02(10002)) zijn de diepe eenheden stratigrafisch gekoppeld aan diepboringen (MSB-02, NVG-01, BHK-01, WSK-01 en CAL-GT-01). Hieruit volgt dat de seismostratigrafische horizont die het basis-vlak van de Geul Subgroep Optie 2 voorstelt, de meest plausibele kandidaat is voor de top van de Kolenkalk Groep. Het top-vlak van de Kolenkalk Groep ligt bijgevolg op een gemiddelde diepte van 4300°m NAP op het “plateau” in het zuidoosten van het model-gebied en op een diepte van ongeveer 6800°m NAP in het centrale deel van het “diep” in het noordwesten. Langs het steilste deel bereikt de “helling”, over een afstand van ongeveer 4°km, een (huidige) gemiddelde hellingsgraad van 20°. Hierbij wordt bijgevolg een hoogteverschil van om en bij 1500°m overbrugd tussen “plateau” en “diep”. Centraal op het “plateau” vertoont het top-vlak van de Kolenkalk Groep een zuidoost-noordwest georiënteerde rugvormige structuur die tot een 700°m boven de gemiddelde hoogte van het “plateau” uitsteekt. Deze rug is de uitdrukking van het oppersen van de diepe gesteentepakketten langs de breuken van de “positive flower structures”. De rug vormt als het ware de wortels van de pop-up structuur in het top-vlak van de gesteenten van de Limburg Groep en heeft bijgevolg een tektonische origine.

Voor 3 locaties (2 diepboringen en 1 voorgestelde site) is de temperatuur aan de basis van de verschillende geologische pakketten tot aan de top van de Kolenkalk Groep geschat aan de hand van een ééndimensionaal thermisch geleidbaarheidsmodel. Dit model steunt op de lokale warmteflux, de thermische geleidbaarheid van en de warmtegeneratie in het gesteente, ingeschat op basis van 8 diepboringen binnen en in de omgeving van het model-gebied. Hieruit is een lokale gemiddelde geothermische gradiënt van  $35,3 \pm 2,6^\circ\text{C}/\text{km}$  en een lokale warmteflux aan het oppervlak van ongeveer  $0,0700 \pm 0,0045^\circ\text{W}/\text{m}^2$  berekend. Dit levert een temperatuur op van rond de  $53^\circ\text{C}$  aan de top van de Limburg Groep, die verder oploopt tot  $243 \pm 33^\circ\text{C}$  (diepte  $6395 \pm 272^\circ\text{m}$  NAP) aan de basis van de Limburg Groep (top Kolenkalk Groep) voor de Smurfit Kappa site.

Op basis van de nieuwe data is er een inschatting gemaakt van het geothermisch potentieel van de site. De Smurfit Kappa site is gelegen te Renkum boven het “diep” in de top van de Kolenkalk Groep. Naast de voornoemde temperatuur spelen hierbij de porositeit en de permeabiliteit een belangrijke rol. Deze parameters kunnen niet gekwantificeerd worden aan de hand van de nieuwe seismische data. De inzichten op stratigrafisch en structureel vlak uit de nieuwe data kunnen wel op kwalitatief vlak enige informatie opleveren. Aangezien de primaire porositeit en de bijhorende permeabiliteit van de Dinantiaan kalkstenen zeer laag is (Mozafari et al., 2019; Carlson, 2019), wordt er gezocht naar locaties met een hoge kans op secundaire porositeit. Ter hoogte van de voorgestelde site is deze gevonden langs een breukzone. Voor de Smurfit Kappa site gaat het om breuk (14) met een normaal verzet van ongeveer 200°m aan de top van de Kolenkalk Groep. De kans bestaat evenwel dat de secundaire porositeit sinds het ontstaan van de breuksystemen teniet gedaan is als gevolg van neerslag van mineralen.

---

HOOFDSTUK 12. AANBEVELINGEN

---

Het ontbreken van (een) diepboring(en) met informatie over de diepe gesteentepakketten (Caumer Subgroep, Geul Subgroep en Kolenkalk Groep) in de onmiddellijke omgeving van het onderzoeksgebied bemoeilijkt enigszins de lithostratigrafische interpretatie van de seismische secties. Op dit moment is het toekennen van een lithostratigrafische interpretatie aan seismische reflectoren gebaseerd op onrechtstreekse correlaties met ver afgelegen diepboringen en stratigrafische extrapolaties van diepboringen die de voornoemde diepe pakketten niet of slechts over een korte lengte aanboren. Zelfs de seismostratigrafische correlatie vanuit het Venlo (Californië) gebied blijft onzeker 1) omwille van de grote afstand die dient overbrugd te worden, 2) omwille van het ontbreken op seismische lijn (SCAN016) van de reflector die de top van Kolenkalk voorstelt op lijn (09-02) en 3) omwille van de vele breuken die langs het traject tussen het Venlo (Californië) gebied en het Renkum-Nijmegen gebied dienen gepasseerd te worden. De kans op een foute correlatie blijft alleszins reëel. Niet alleen qua lithostratigrafische interpretatie is het ontbreken van een diepboring tot in de voornoemde gesteentepakketten een knelpunt, ook wat betreft de tijd/diepte conversie van de geïnterpreteerde horizonten, stelt dit een probleem. Hiervoor dient er op dit moment eveneens teruggevallen te worden op informatie, in dit geval met betrekking tot snelheid, uit ver afgelegen diepboringen. Bovenop de onzekerheid qua lithostratigrafische interpretatie levert ook dit een onzekerheid op naar diepte waarop de geïnterpreteerde horizonten zich bevinden. Om deze onzekerheden te reduceren zou bijgevolg een diepboring (met Vertical Seismic Profiling) in het model-gebied een belangrijke stap voorwaarts zijn. Bovendien geeft dit de kans om een zicht te krijgen op het type gesteente, het facies van de carbonaatgesteenten overeenkomstig het depositionele model van Wilson (1975), waaruit de Kolenkalk Groep is opgebouwd. Verder kan een diepboring tot in de Kolenkalk Groep inzicht geven in de mogelijke aanwezigheid van karstverschijnselen, spleten en breukjes in het gesteente en laat deze ook toe om de porositeit en de permeabiliteit van het gesteente beter in te schatten.

Met het oog op potentiële targets voor (ultra-)diepe geothermie is het belangrijk om de locatie van de breuken (tot) aan de top van de Kolenkalk Groep goed in kaart te brengen. Aangezien de Smurfit Kappa site langs 3 zijden, elk op een afstand van minder dan 1°km, omgeven is door seismische lijnen (SCAN003, BURKM008 en BW81-11) is de locatie van breuk (14) vrij goed gekend. Een lokale 3D-seismische survey ter hoogte van de site kan echter wel een nog beter inzicht geven in de positie van deze target en andere targets.

Voor mogelijke ondiepere targets zoals het bovenste deel van de Limburg Groep, de Rotliegend, Zechstein, Trias en Rijnland groepen, bestaan eventuele vervolgstapen voor het beter inschatten van het potentieel uit het analyseren van putten in de ruime regio, het boren van een exploratieput, en het analyseren en vergelijken van de seismische karakteristieken van deze pakketten.



## LITERATUURLIJST

Békési E., Struijk M., Bonté D., Veldkamp H., Limberger J., Fokker P.A., Vrijlandt M. & van Wees J.-D., 2020. An updated geothermal model of the Dutch subsurface based on inversion of temperature data. *Geothermics* 88, 1-17.

Bonté D., van Wees J.-D. & Verweij J.M., 2012. Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling. *Netherlands Journal of Geosciences* 91, 194-515.

Bouroullec R., Nelskamp S., Kloppenburg A., Abdul Fattah R., Foeken J., ten Veen J., Geel K., Debacker T. & Smit J., 2019. Burial and Structural Analysis of the Dinantian Carbonates in the Dutch Subsurface. SCAN report, 170p.

Boxem T.A.P., Veldkamp J.G. & van Wees J.-D., 2016. Ultra-diepe geothermie: overzicht, inzicht & to-do ondergrond. TNO report, TNO 2016 R10803, 53p.

Broothaers M. & Laenen B., 2012. Geologische evaluatie geothermie voor glastuinbouwcluster Bergerden. VITO rapport 2012/SCT/R/4, 53p.

Caine J., Evans J.S.P., Forster C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24, 1025-1028.

Carlson T., 2019. Petrophysical report of the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface. SCAN report. 26p.

Clavier C., Hoyle W. & Meunier D., 1971. Quantitative Interpretation of Thermal Neutron Decay Time Logs: Part I. Fundamentals and Techniques. SPE-2658-A-PA, Volume 23/06.

<https://www.dinoloket.nl/>

DUG, 2020. 2D Land processing of 5 seismic lines, URKM lines, The Netherlands – GTO-19-C031-01 SCAN acquisition seismic processing order #1 – Processing report. sCAnPr\_005, 62p.

Duin E., Doornenbal J., Rijkers R., Verbeek J. & Wong T.E., 2006. Subsurface structure of the Netherlands – results of recent onshore and offshore mapping. *Netherlands Journal of Geosciences* 85, 245-276.

Flügel E., 2004. Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation and application. Springer, 976p.

Japsen P., 1993. Influence of lithology and Neogene uplift on seismic velocities in Denmark: implications for depth conversion of maps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 77, 194-211.

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

Laenen B., 2018. Overwegingen bij het bepalen van de trajecten voor de 2D seismische campagne. Nota 1810441\_RMA\_BL01\_Tellus, 5p.

Lagrou D. & Broothaers M., 2013. Evaluatie van het potentieel voor geothermie voor het UMC St Radboud / Radboud Universiteit Nijmegen (Nederland). VITO rapport 2013/ETE/R/008, 28p.

Larionov, V.V. (1969), Radiometry of Boreholes, NEDRA, Moscow.

Loveless S., Pluymaekers M., Lagrou D., De Boever E., Doornenbal H. & Laenen B., 2014. Mapping the geothermal potential of fault zones in the Belgium-Netherlands border region. Energy Procedia 59, 351-358.

Mozafari M., Gutteridge P., Riva A., Geel K., Garland J. & Dewit J., 2019. Facies analysis and diagenetic evolution of the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface. SCAN report, 153p.

Nanda N. C., 2016: Tectonics and Seismic Interpretation. In: *Seismic data Interpretation and Evaluation for Hydrocarbon Exploration and Production*. Springer, p. 78-89.

NITG-TNO, 2004. De Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland. Toelichtingen bij kaartblad IX Harderwijk-Nijmegen. 126p.

<https://www.nlog.nl/>

Pluymaekers M.P.D., Doornenbal J.C. & Middelburg H., 2017. Velmod-3.1. TNO report, TNO 2017 R11014 with erratum page 67 Final. 66p.

Reijmer J.J., Johan H., Jaarsma B. & Boots R., 2017. Seismic stratigraphy of Dinantian carbonates in the southern Netherlands and northern Belgium. Netherlands Journal of Geosciences 96, 353-379.

<https://www.scanaardwarmte.nl/>

ten Veen J., de Haan H., de Bruin G., Holleman N. & Schöler W., 2019. Seismic interpretation and depth conversion of the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface. SCAN report, 100p.

ter Borgh M. & Mijnlief H., 2019. Geological evaluation for the seismic acquisition programme for SCAN area C (Nijmegen-Haarlem). SCAN report, 32p.

Tucker M.E., 1985. Shallow-marine carbonate and facies models. In: Benchley P.E. & Williams B.P. (eds.), *Sedimentology: recent developments and applied aspects*. Geological Society of London, Special Publications 18, 139-161.

van Dalssen W., Doornenbal J.C., Dortland S. & Gunnink J.L., 2006. A comprehensive seismic velocity model for the Netherlands based on lithostratigraphic layers. Netherlands Journal of Geosciences 85, 277-292.

Veldkamp H. & Hegen D., 2020. Temperature modelling of the Dutch subsurface at the depth of the Dinantian. SCAN report, 78p.

Wilson J. L., 1975. Carbonate Facies in Geologic History. Springer-Verlag, New York. 417p.



## BIJLAGELIJST

Bijlage A: Warmtegeneratie lithostratigrafische eenheden

Bijlage B: Berekende temperatuurprofielen en warmtefluxen voor referentieboringen

Bijlage C: Inputparameters en berekend temperatuurprofiel voor de locatie Smurfit Kappa

## BIJLAGE A: WARMTEGENERATIE LITHOSTRATIGRAFISCHE EENHEDEN

Tabel 22: Warmtegeneratie voor de verschillende lithostratigrafische eenheden in  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 

Hole-ID	unit	HG mean	HG std	HG 25%	HG 50%	HG 75%
Bronkhorst-01	Basale Dongen Tuffiet Laagpakket	0.71	0.11	0.64	0.67	0.77
Bronkhorst-01	Basale Solling Zandsteen Laagpakket	1.27	0.23	1.07	1.33	1.43
Bronkhorst-01	Formatie van Breda	0.86	0.1	0.78	0.86	0.93
Bronkhorst-01	Formatie van Oosterhout	0.76	0.07	0.71	0.76	0.81
Bronkhorst-01	Formatie van Slochteren	0.54	0.29	0.47	0.5	0.54
Bronkhorst-01	Grijze Zoutklei Laagpakket	1.53	0.51	1.12	1.63	1.96
Bronkhorst-01	Hoofd-Kleisteel Laagpakket	1.67	0.15	1.57	1.67	1.78
Bronkhorst-01	Koperschalie Laagpakket	2.36	0.41	2.04	2.33	2.68
Bronkhorst-01	Laagpakket van Asse	0.89	0.09	0.83	0.88	0.95
Bronkhorst-01	Laagpakket van Heers	0.54	0.1	0.47	0.53	0.6
Bronkhorst-01	Laagpakket van Ieper	0.73	0.11	0.66	0.71	0.78
Bronkhorst-01	Laagpakket van Vessem	0.79	0.06	0.74	0.8	0.83
Bronkhorst-01	Landen Klei Laagpakket	0.76	0.09	0.68	0.76	0.83
Bronkhorst-01	Onbekend	0.59	0.14	0.5	0.59	0.69
Bronkhorst-01	Onder-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket	1.41	0.26	1.25	1.44	1.59
Bronkhorst-01	Rode Zoutklei Laagpakket	0.75	0.49	0.32	0.59	1.22
Bronkhorst-01	Rogenstein Laagpakket	1.66	0.29	1.49	1.72	1.87
Bronkhorst-01	Rupel Klei Laagpakket	0.92	0.11	0.85	0.92	0.99
Bronkhorst-01	Röt Kleisteel Laagpakket	1.16	0.45	0.89	1.09	1.46
Bronkhorst-01	Solling Kleisteel Laagpakket	1.66	0.48	1.32	1.58	1.85
Bronkhorst-01	Veldhoven Klei Laagpakket	0.82	0.08	0.76	0.81	0.87
Bronkhorst-01	Volpriehausen Klei-Siltsteel Laagpakket	1.86	0.37	1.67	1.84	2
Bronkhorst-01	Z1 Anhydriet Laagpakket	0.25	0.11	0.17	0.22	0.31
Bronkhorst-01	Z1 Boven-Anhydriet Laagpakket	0.22	0.07	0.16	0.22	0.27



Bronkhorst-01	Z1 Carbonaat Laagpakket	1.12	0.48	0.94	1.21	1.47
Bronkhorst-01	Z1 Zout Laagpakket	0.15	0.05	0.12	0.14	0.17
Bronkhorst-01	Z2 Dakanhydriet Laagpakket	0.36	0.24	0.2	0.28	0.42
Bronkhorst-01	Z2 Zout Laagpakket	0.21	0.07	0.16	0.19	0.24
Bronkhorst-01	Z3 Carbonaat Laagpakket	0.52	0.1	0.47	0.52	0.56
Bronkhorst-01	Z3 Hoofdanhydriet Laagpakket	0.57	0.25	0.33	0.56	0.79
Bronkhorst-01	Z3 Zout Laagpakket	0.22	0.11	0.16	0.2	0.25
Bronkhorst-01	Z4 Pegmatiet-Anhydriet Laagpakket	1.64	0.26	1.55	1.7	1.84
Bronkhorst-01	Zand van Brussel Laagpakket	0.75	0.08	0.71	0.75	0.8
Bronkhorst-01	Zechstein Boven-Kleisteel Formatie	1.7	0.18	1.58	1.69	1.85
Buurmalsen-01	Boven-Detfurth Zandsteen Laagpakket	1.17	0.3	0.93	1.1	1.37
Buurmalsen-01	Boven-Keuper Kleisteel Laagpakket	0.87	0.2	0.71	0.86	1.07
Buurmalsen-01	Boven-R?t Randkleisteel Laagpakket	1.46	0.18	1.34	1.47	1.59
Buurmalsen-01	Boven-Volprieausen Zandsteen Laagpakket	1.15	0.4	0.83	1.07	1.47
Buurmalsen-01	Caumer Subgroep	1.61	0.31	1.33	1.67	1.89
Buurmalsen-01	Dolomitische Keuper Laagpakket	0.55	0.2	0.42	0.53	0.6
Buurmalsen-01	Formatie van Aalburg	0.98	0.11	0.91	0.99	1.05
Buurmalsen-01	Formatie van Breda	0.53	0.18	0.42	0.48	0.55
Buurmalsen-01	Formatie van Hardeggen	1.17	0.33	0.88	1.11	1.46
Buurmalsen-01	Formatie van Oosterhout	0.33	0.04	0.3	0.33	0.36
Buurmalsen-01	Formatie van Sleen	1.04	0.16	0.93	1.05	1.16
Buurmalsen-01	Formatie van Slochteren	0.37	0.11	0.32	0.36	0.41
Buurmalsen-01	Grijze Zoutklei Laagpakket	1.39	0.13	1.24	1.44	1.49
Buurmalsen-01	Hoofd-Kleisteel Laagpakket	1.45	0.33	1.32	1.52	1.67
Buurmalsen-01	Hoofd-R?t Evaporiet Laagpakket	0.79	0.31	0.57	0.86	0.97
Buurmalsen-01	Kwart. Ongediff.	0.31	0.06	0.27	0.3	0.35
Buurmalsen-01	Laagpakket van Voort	0.9	0.05	0.86	0.89	0.92
Buurmalsen-01	Onder-Detfurth Zandsteen Laagpakket	0.99	0.28	0.79	0.89	1.1
Buurmalsen-01	Onder-Muschelkalk Laagpakket	0.9	0.21	0.73	0.85	1.06
Buurmalsen-01	Onder-R?t Randkleisteel Laagpakket	1.51	0.16	1.41	1.53	1.61

Buurmalsen-01	Onder-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket	1.04	0.37	0.75	0.98	1.3
Buurmalsen-01	R?t Randzandsteen Laagpakket	1.27	0.34	0.97	1.2	1.57
Buurmalsen-01	Randkoperschalie Laagpakket	0.71	0.62	0.22	0.28	1.49
Buurmalsen-01	Rode Keuper Kleisteen Laagpakket	1.33	0.19	1.21	1.37	1.47
Buurmalsen-01	Rode Zoutklei Laagpakket	1.54	0.22	1.4	1.58	1.7
Buurmalsen-01	Rogenstein Laagpakket	1.49	0.32	1.32	1.55	1.7
Buurmalsen-01	Rupel Klei Laagpakket	1.1	0.08	1.05	1.1	1.17
Buurmalsen-01	Solling Kleisteen Laagpakket	0.88	0.24	0.76	0.86	0.9
Buurmalsen-01	Veldhoven Klei Laagpakket	0.94	0.09	0.88	0.93	0.99
Buurmalsen-01	Z1 Midden-Kleisteen Laagpakket	1.11	0.27	1.01	1.15	1.27
Buurmalsen-01	Z1 Onder-Kleisteen Laagpakket	0.89	0.47	0.42	0.96	1.3
Buurmalsen-01	Z1 Randcarbonaat Laagpakket	0.21	0.09	0.12	0.21	0.27
Buurmalsen-01	Z2 Midden-Kleisteen Laagpakket	0.73	0.51	0.13	0.94	1.19
Buurmalsen-01	Z3 Carbonaat Laagpakket	0.31	0.2	0.2	0.27	0.33
Buurmalsen-01	Z3 Hoofdanhydriet Laagpakket	0.81	0.22	0.73	0.91	0.97
Buurmalsen-01	Zechstein Boven-Kleisteen Formatie	1.41	0.25	1.22	1.38	1.61
Gewande-01	Boven-Keuper Kleisteen Laagpakket	1.36	0.15	1.24	1.37	1.49
Gewande-01	Boven-Muschelkalk Laagpakket	1.53	0.18	1.4	1.55	1.68
Gewande-01	Boven-Röt Randkleisteen Laagpakket	1.78	0.34	1.5	1.69	2.08
Gewande-01	Dolomitische Keuper Laagpakket	1.26	0.19	1.17	1.25	1.38
Gewande-01	Formatie van Aalburg	1.66	0.29	1.5	1.69	1.9
Gewande-01	Formatie van Breda	1.01	0.2	0.93	1.05	1.14
Gewande-01	Formatie van Sleen	1.75	0.15	1.75	1.81	1.84
Gewande-01	Formatie van Veldhoven	1.04	0.08	0.99	1.05	1.1
Gewande-01	Laagpakket van Heers	0.69	0.19	0.57	0.66	0.83
Gewande-01	Laagpakket van Ieper	1.32	0.06	1.29	1.34	1.36
Gewande-01	Landen Klei Laagpakket	0.94	0.14	0.8	0.97	1.05
Gewande-01	Midden-Muschelkalk Mergel Laagpakket	1.51	0.29	1.33	1.45	1.57
Gewande-01	Midden-Werkendam Laagpakket	1.47	0.28	1.17	1.61	1.69
Gewande-01	Muschelkalk Evaporiet Laagpakket	1.68	0.26	1.46	1.72	1.88



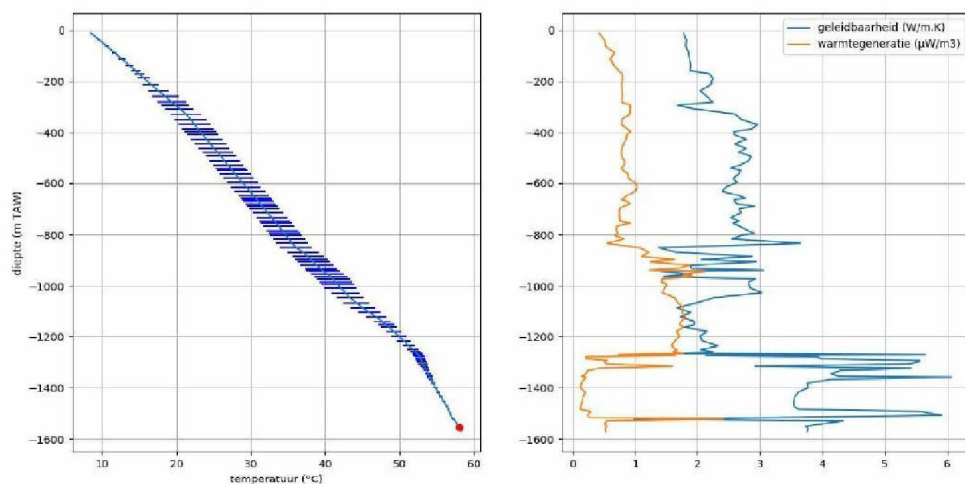
Gewande-01	Onder-Muschelkalk Laagpakket	1.94	0.25	1.74	1.96	2.14
Gewande-01	Onder-Werkendam Laagpakket	1.79	0.06	1.76	1.8	1.83
Gewande-01	Rode Keuper Kleisteen Laagpakket	1.59	0.14	1.54	1.6	1.68
Gewande-01	Rupel Klei Laagpakket	1.25	0.11	1.17	1.27	1.34
Gewande-01	Röt Randzandsteen Laagpakket	2.26	0.14	2.19	2.3	2.36
Nijmegen-Valburg-01	Boven-Holland Mergel Laagpakket	0.46	0.07	0.42	0.45	0.48
Nijmegen-Valburg-01	Formatie van Breda	0.75	0.13	0.64	0.74	0.87
Nijmegen-Valburg-01	Formatie van Maassluis	0.58	0.17	0.42	0.61	0.71
Nijmegen-Valburg-01	Formatie van Maurits	1.32	0.17	1.22	1.33	1.44
Nijmegen-Valburg-01	Formatie van Ommelanden	0.26	0.02	0.25	0.26	0.27
Nijmegen-Valburg-01	Formatie van Slochteren	0.4	0.15	0.33	0.37	0.4
Nijmegen-Valburg-01	Formatie van Texel	0.35	0.09	0.29	0.33	0.4
Nijmegen-Valburg-01	Grijze Zoutklei Laagpakket	1.79	0.47	1.7	1.96	2.1
Nijmegen-Valburg-01	Holland Groenzand Laagpakket	0.51	0.07	0.47	0.51	0.57
Nijmegen-Valburg-01	Hoofd-Kleisteen Laagpakket	1.1	0.25	0.95	1.18	1.29
Nijmegen-Valburg-01	Koperschalie Laagpakket	2.14	0.48	2	2.28	2.48
Nijmegen-Valburg-01	Kwart. Ongediff.	0.34	0.09	0.32	0.35	0.38
Nijmegen-Valburg-01	Laagpakket van Heers	0.32	0.07	0.29	0.31	0.34
Nijmegen-Valburg-01	Laagpakket van Vessem	0.9	0.06	0.86	0.89	0.95
Nijmegen-Valburg-01	Laagpakket van Voort	0.98	0.08	0.92	0.96	1.02
Nijmegen-Valburg-01	Landen Klei Laagpakket	0.79	0.14	0.69	0.77	0.84
Nijmegen-Valburg-01	Midden-Holland Kleisteen Laagpakket	0.59	0.05	0.56	0.59	0.62
Nijmegen-Valburg-01	Onder-Holland Mergel Laagpakket	0.89	0.15	0.8	0.87	0.95
Nijmegen-Valburg-01	Rode Zoutklei Laagpakket	1.32	0.2	1.22	1.36	1.43
Nijmegen-Valburg-01	Rupel Klei Laagpakket	1.15	0.14	1.02	1.18	1.27
Nijmegen-Valburg-01	Veldhoven Klei Laagpakket	0.81	0.09	0.75	0.78	0.87
Nijmegen-Valburg-01	Z1 Midden-Kleisteen Laagpakket	0.8	0.27	0.56	0.82	0.95
Nijmegen-Valburg-01	Z1 Onder-Kleisteen Laagpakket	1.22	0.17	1.17	1.22	1.28
Nijmegen-Valburg-01	Z1 Randcarbonaat Laagpakket	0.53	0.23	0.38	0.43	0.57
Nijmegen-Valburg-01	Z2 Midden-Kleisteen Laagpakket	0.85	0.43	0.35	0.98	1.2

Nijmegen-Valburg-01	Z3 Carbonaat Laagpakket	0.36	0.07	0.33	0.35	0.39
Nijmegen-Valburg-01	Z4 Pegmatiet-Anhydriet Laagpakket	0.77	0.36	0.42	0.93	1.1
Nijmegen-Valburg-01	Zechstein Boven-Kleisteel Formatie	1.25	0.11	1.21	1.27	1.31
Varik-01	Formatie van Aalburg	2.77	0.28	2.67	2.8	2.94
Varik-01	Formatie van Breda	1.85	0.37	1.51	1.93	2.17
Varik-01	Laagpakket van Heers	1.73	0.25	1.59	1.72	1.85
Varik-01	Landen Klei Laagpakket	2.72	0.23	2.56	2.73	2.89
Varik-01	Midden-Noordzee Groep	2.34	0.23	2.17	2.31	2.5
Winterswijk-01	Banjaard groep (inf.)	1.01	0.36	0.79	0.94	1.18
Winterswijk-01	Basale Solling Zandsteen Laagpakket	0.52	0.06	0.47	0.49	0.54
Winterswijk-01	Bollen Kleisteel formatie (inf.)	1.85	0.25	1.7	1.83	1.99
Winterswijk-01	Boven-Röt Kleisteel Laagpakket	0.63	0.05	0.59	0.63	0.66
Winterswijk-01	Formatie van Aalburg	0.7	0.05	0.66	0.7	0.73
Winterswijk-01	Formatie van Baarlo	1.63	0.5	1.22	1.79	2
Winterswijk-01	Formatie van Breda	0.6	0.03	0.58	0.61	0.62
Winterswijk-01	Formatie van Ruurlo	1.63	0.43	1.39	1.8	1.94
Winterswijk-01	Formatie van Sleen	0.67	0.05	0.64	0.67	0.7
Winterswijk-01	Formatie van Slochteren	1.08	0.25	0.88	1.12	1.26
Winterswijk-01	Formatie van Veldhoven	0.59	0.04	0.57	0.58	0.6
Winterswijk-01	Formatie van Zeeland	0.74	0.44	0.46	0.6	0.85
Winterswijk-01	Grijze Zoutklei Laagpakket	1.02	0.26	0.91	1.07	1.24
Winterswijk-01	Hoofd-Kleisteel Laagpakket	1.36	0.13	1.29	1.38	1.46
Winterswijk-01	Hoofd-Röt Evaporiet Laagpakket	0.55	0.06	0.52	0.57	0.59
Winterswijk-01	Koperschalie Laagpakket	1.34	0.22	1.13	1.34	1.55
Winterswijk-01	Laagpakket van Geverik	2.68	0.93	1.86	2.84	3.3
Winterswijk-01	Laagpakket van Ubachsberg	1.28	0.4	1	1.11	1.41
Winterswijk-01	Onbekend	0.52	0.07	0.51	0.54	0.57
Winterswijk-01	Onder-Muschelkalk Laagpakket	0.56	0.05	0.53	0.56	0.59
Winterswijk-01	Onder-Volpriehausen Zandsteen Laagpakket	0.61	0.06	0.58	0.6	0.63
Winterswijk-01	Rode Zoutklei Laagpakket	1.17	0.19	1.1	1.19	1.31

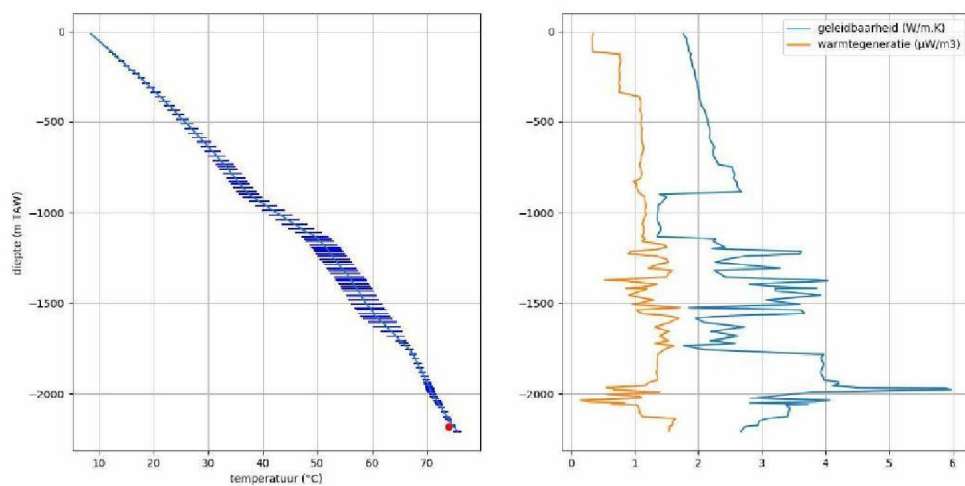


Winterswijk-01	Rogenstein Laagpakket	1.05	0.3	0.83	1.12	1.3
Winterswijk-01	Rupel Formatie	0.62	0.06	0.56	0.64	0.67
Winterswijk-01	Solling Kleisteen Laagpakket	0.65	0.07	0.62	0.65	0.69
Winterswijk-01	Volpriehausen Klei-Siltsteen Laagpakket	0.67	0.06	0.63	0.66	0.71
Winterswijk-01	Vulkanisch ganggesteente	0.76	0.43	0.51	0.61	0.84
Winterswijk-01	Z1 Onder-Anhydriet Laagpakket	0.4	0.15	0.34	0.37	0.42
Winterswijk-01	Z1 Zout Laagpakket	0.35	0.17	0.28	0.3	0.34
Winterswijk-01	Z2 Basale Anhydriet Laagpakket	0.31	0.04	0.28	0.3	0.33
Winterswijk-01	Z2 Dakanhydriet Laagpakket	0.44	0.15	0.32	0.37	0.54
Winterswijk-01	Z2 Zout Laagpakket	0.58	0.28	0.37	0.48	0.7
Winterswijk-01	Z3 Carbonaat Laagpakket	0.58	0.12	0.51	0.53	0.61
Winterswijk-01	Z3 Hoofdanhydriet Laagpakket	0.56	0.11	0.47	0.56	0.65
Winterswijk-01	Z4 Pegmatiet-Anhydriet Laagpakket	0.76	0.15	0.64	0.78	0.85
Winterswijk-01	Zechstein Boven-Kleisteen Formatie	1.29	0.09	1.24	1.3	1.37
Winterswijk-01	boven-Epen laagpakket (inf.)	1.77	0.31	1.66	1.83	1.93
Winterswijk-01	formatie van Bosscheveld (inf.)	1.80	0.42	1.49	1.79	2.01
Winterswijk-01	hoofd-Epen laagpakket (inf.)	2.00	0.34	1.8	1.97	2.18

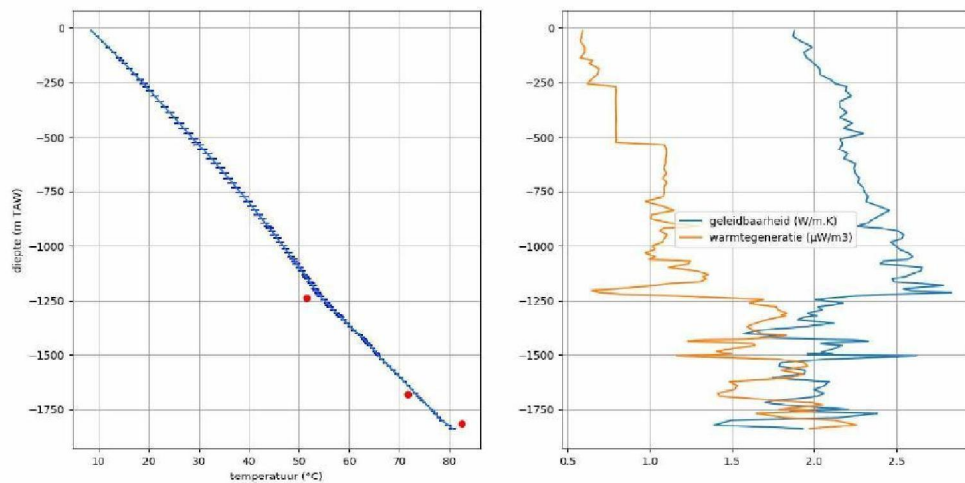
## BIJLAGE B: BEREKENDE TEMPERATUURPROFIELEN EN WARMTEFLUXEN VOOR REFERENTIEBORINGEN



Bronkhorst-01: oppervlaktewarmteflux  $0.0719 \pm 0.0084 \text{ W/m}^2$

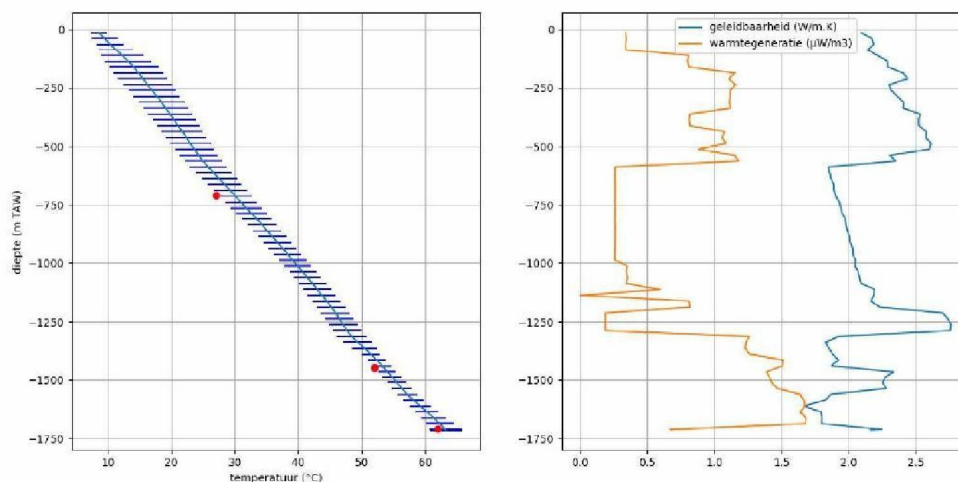


Buurmalsen-01: oppervlaktewarmteflux  $0.0678 \pm 0.0042 \text{ W/m}^2$

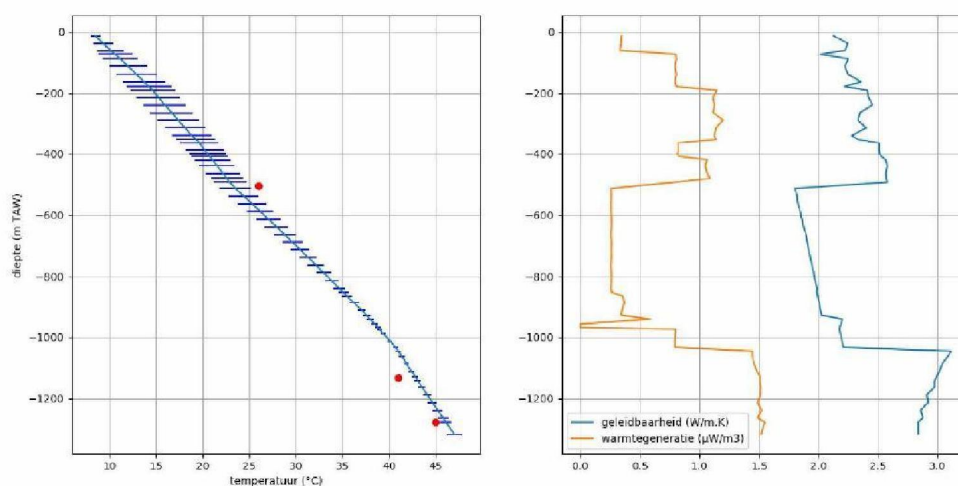


Gewande-01: oppervlaktewarmteflux  $0.0838 \pm 0.0012 \text{ W/m}^2$

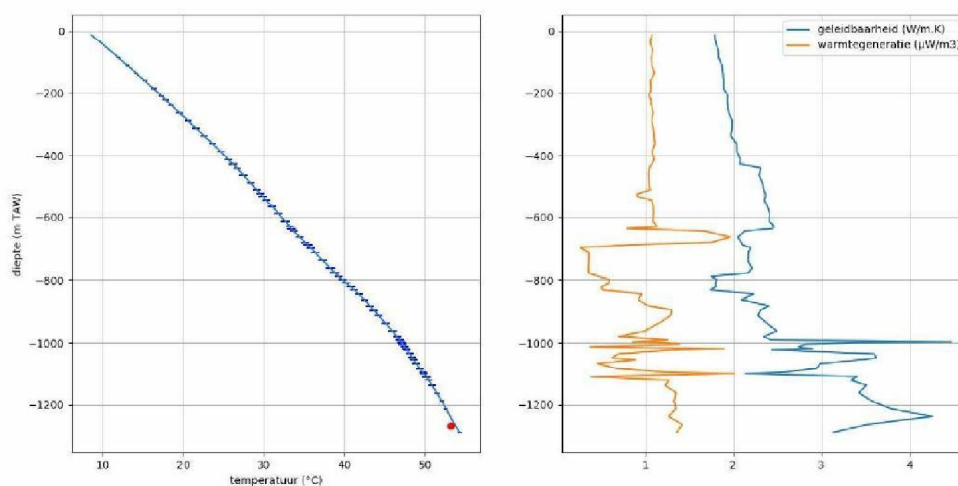




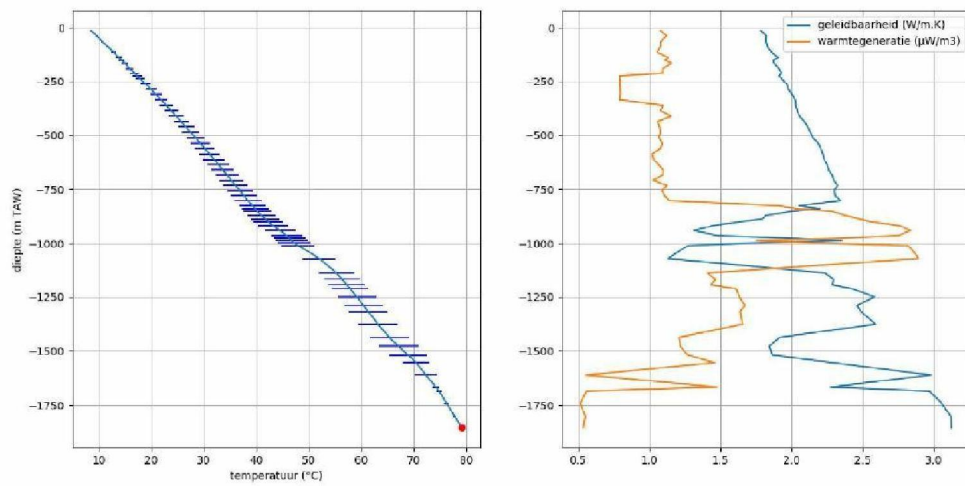
Maasbommel-01: oppervlaktewarmteflux  $0.0648 \pm 0.0051 \text{ W/m}^2$



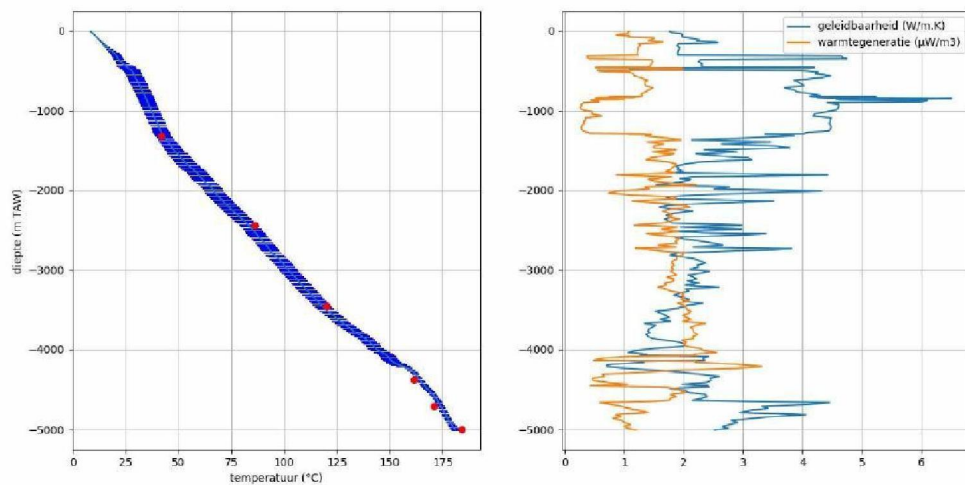
Maasbommel-02: oppervlaktewarmteflux  $0.0651 \pm 0.0038 \text{ W/m}^2$



Nijmegen-Valburg-01: oppervlaktewarmteflux  $0.0818 \pm 0.0009 \text{ W/m}^2$



Varik-01: oppervlaktewarmteflux 0.0765 +/- 0.0055 W/m<sup>2</sup>



Winterswijk-01: oppervlaktewarmteflux 0.0709 +/- 0.0085 W/m<sup>2</sup>



**BIJLAGE C: INPUTPARAMETERS EN BEREKEND TEMPERATUURPROFIEL VOOR DE LOCATIE SMURFIT KAPPA**

Bijlage\_C1\_Maasbommel\_02.pdf  
Bijlage\_C2\_Nijmegen\_Valburg.pdf  
Bijlage\_C3\_Renkum.pdf

## BIJLAGE D: FIGUREN

Figuren als bijlage in pdf-formaat:

Bijlage_D1	Fig01: Topografische situering van het studiegebied, de gebruikte diepboringen en de gebruikte oude en nieuwe seismische lijnen.
Bijlage_D2	Fig04: Kaart met ligging van de nieuwe seismische lijnen in het gebied van Renkum en Nijmegen in het kader van het SCAN en UDG programma.
Bijlage_D3	Fig05: Kaart met de finale CDP lijnen en schotpunten van UDG lijnen 006 en 007 in de omgeving van Nijmegen.
Bijlage_D4	Fig06: Kaart met de finale CDP lijnen en schotpunten van UDG lijnen 008, 009 en 010 in de omgeving van Renkum.
Bijlage_D5	Fig07: Vergelijking tussen de modellagen van dgm diep v5 en de reflectoren op lijn BURKM010 van de L2EBN2020B seismische survey.
Bijlage_D6	Fig08: Interpretatie van seismische sectie BURKM010, met in het paars de interpretatie uit dgm diep v5 voor de lithostratigrafische eenheden boven de top van de Limburg Groep (nummering van de breuken, zie hoofdstuk 8).
Bijlage_D7	Fig10: De situering van diepboring NVG-01 op lijn SCAN002 van de L2EBN2019A seismische survey ten opzichte van het lokale lithostratigrafische en structureel geologische kader (nummering en codering zie hoofdstuk 8).
Bijlage_D8	Fig11: Correlatie van de Limburg Groep tussen het MSB-02 gebied en het BKH-01 gebied.
Bijlage_D9	Fig12: Correlatie van de Limburg Groep tussen het Renkum-Nijmegen gebied (scan005) en het Venlo (Californië) gebied (09-02) langs nieuwe seismische lijn scan015.
Bijlage_D10	Fig13: De situering van het model-gebied binnen het onderzoeksgebied.
Bijlage_D11	Fig19: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Boven Noordzee Groep.
Bijlage_D12	Fig20: De dikte (m) van de Boven Noordzee Groep.
Bijlage_D13	Fig21: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Midden en Onder Noordzee Groep.
Bijlage_D14	Fig22: De dikte van de Midden en Onder Noordzee Groep.
Bijlage_D15	Fig23: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Krijtkalk Groep.
Bijlage_D16	Fig24: De dikte van de Krijtkalk Groep.
Bijlage_D17	Fig25: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Rijnland Groep.
Bijlage_D18	Fig26: De dikte van de Rijnland Groep.
Bijlage_D19	Fig27: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Onder Germaanse Trias Groep.
Bijlage_D20	Fig28: De dikte (m) van de Onder Germaanse Trias Groep.
Bijlage_D21	Fig29: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Zechstein Groep.
Bijlage_D22	Fig30: De dikte (m) van de Zechstein Groep.
Bijlage_D23	Fig31: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Boven Rotliegend Groep.
Bijlage_D24	Fig32: De dikte (m) van de Boven Rotliegend Groep.
Bijlage_D25	Fig33: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Caumer Subgroep.
Bijlage_D26	Fig34: De dikte (m) van de Caumer Subgroep.
Bijlage_D27	Fig36: De diepte van het basisvlak (m NAP) en de dikte (m) van de Geul Subgroep optie 1.
Bijlage_D28	Fig37: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 1.
Bijlage_D29	Fig38: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Geul Subgroep optie 2.
Bijlage_D30	Fig39: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 2.
Bijlage_D31	Fig41: De diepte van het basisvlak (m NAP) van de Geul Subgroep optie 3.
Bijlage_D32	Fig42: De dikte (m) van de Geul Subgroep optie 3.
Bijlage_D33	Fig44: De situering van de structuren en breuken aan de top van de Limburg Groep binnen het model-gebied.
Bijlage_D34	Fig45: De situering van de structuren en breuken op seismische lijn BURKM009.
Bijlage_D35	Fig52: Zonering van het top-vlak van de Kolenkalk Groep in het model-gebied.
Bijlage_D36	Fig53: Situering van de sites ten opzichte van het model-gebied, de seismische data en diepboringen.
Bijlage_D37	Fig54: Situering van de Smurfit Kappa site op seismische lijn BURKM008 ten opzichte van breuk (14) en de verschillende opties voor de basis van de Geul Subgroep.