

Bijlage: Geologisch onderzoek

Verspreidingslijst

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

1. Samenvatting
2. Beoogde locatie en putten
3. Aanmelding voor de waarborgregeling
4. Geologische setting
5. Beschikbare en gebruikte putten en seismische data
6. Seismische interpretatie en dieptemodel
7. Model en karakterisering van de Aquifer
8. Formatiewater karakterisering
9. Doublet beschrijving

Referenties

Bijlagen

- Bijlage 1: Gedetailleerde lijst van gebruikte gegevens
Bijlage 2: Resultaten en details van de petrofysische evaluatie en formatiewateranalyse
Bijlage 3: Lijst van uitgevoerde puttesten, details en en resultaten van de evaluatie
Bijlage 4: Lijst van productiedata, details en resultaten van de evaluatie
Bijlage 5: Kaarten die gebruikt zijn tijdens de evaluatie van de ondergrond
Bijlage 6: Putontwerp
Bijlage 7: Lithostratigrafische beschrijvingen
Bijlage 8: Opzet van het testprogramma

Eindrapport

Geologisch onderzoek ter bepaling van het thermisch vermogen voor een geothermisch doublet op de site van Janssen Pharmaceutica te Beerse in het kader van de waarborgregeling

Broothaers M., Bos S., Harcouët-Menou V.

Studie uitgevoerd in opdracht van Janssen Pharmaceutica NV:
2018/RMA/R/1592
Update van rapport 2017/RMA/R/1263
Oktober 2018
Versie 3.0



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

Marijke Anthuenis	Janssen Pharmaceutica
Hartwin Leen	Janssen Pharmaceutica
Jan Vandeneede	Janssen Pharmaceutica

INHOUD

Verspreidingslijst	I
Inhoud	II
Lijst van tabellen	V
Lijst van figuren	VI
HOOFDSTUK 1. Samenvatting	1
1.1. <i>Gepland doublet en gebruikte parameters</i>	1
1.2. <i>Verwacht vermogen en overschrijdingskansgrafiek</i>	3
HOOFDSTUK 2. Beoogde Locatie en Putten	6
2.1. <i>Beoogde locatie</i>	6
2.2. <i>Putten</i>	7
HOOFDSTUK 3. Aanmelding voor de Waarborgregeling	9
HOOFDSTUK 4. Geologische Setting	10
4.1. <i>Lokale geologie</i>	10
4.1.1. <i>Geologische structuur</i>	10
4.1.2. <i>Stratigrafie</i>	13
4.1.3. <i>Stratigrafie van het Onder Carboon</i>	14
4.2. <i>Koolwaterstof voorkomens in de nabijheid van het project</i>	17
4.2.1. <i>Ondergrondse gasopslag te Loenhout</i>	17
4.2.2. <i>Geïsoleerde gasvoorkomens bij koollagen</i>	18
HOOFDSTUK 5. Beschikbare en Gebruikte Putten en Seismische Data	19
5.1. <i>Keuze referentieputten en put informatie</i>	19
5.1.1. <i>Putten tot in de Kolenkalk Groep</i>	19
5.1.2. <i>Putten die de Kolenkalk niet bereikt hebben</i>	20
5.1.3. <i>Gebruik van de informatie uit de putten</i>	21
5.2. <i>Seismische gegevens</i>	23
5.3. <i>Coördinaatsysteem</i>	24
HOOFDSTUK 6. Seismische Interpretatie en Dieptemodel	25
6.1. <i>Methode beschrijving</i>	25
6.2. <i>Additionele gegevens</i>	26
6.3. <i>Well to seismic ties</i>	26
6.4. <i>Seismische interpretatie</i>	27
6.5. <i>Gridding algoritme</i>	28
6.6. <i>Tijd-diepte conversie</i>	28

6.6.1.	Eerste inschatting	29
6.6.2.	3D Snelheidsmodel	29
6.7.	<i>Dieptekaart van top & basis aquifer</i>	32
6.8.	<i>Discussie van onzekerheid in top & basis aquiferkaart</i>	34
6.8.1.	Top & basis van het pakket	34
6.8.2.	Dikte van de sequentie	34
HOOFDSTUK 7.	Model en Karakterisering van de Aquifer	37
7.1.	<i>Stratigrafische correlatie en laterale diktevariatie van de aquifer</i>	37
7.1.1.	Beschikbare informatie	37
7.1.2.	Oorsprong van de permeabiliteit	37
7.1.3.	Laterale variatie	38
7.1.4.	Verwachtingen voor het reservoir in Beerse (concept)	39
7.2.	<i>Petrofysische evaluatie</i>	41
7.3.	<i>Puttest evaluatie</i>	41
7.4.	<i>Productiedata evaluatie</i>	42
7.5.	<i>Permeabiliteit uit publieke informatie</i>	42
7.6.	<i>Bepaling aquifereigenschappen voor de projectlocatie</i>	43
7.7.	<i>Anisotropie</i>	43
7.8.	<i>Resultaten en discussie over onzekerheid</i>	43
HOOFDSTUK 8.	Formatiewater Karakterisering	46
8.1.	<i>Temperatuur</i>	46
8.1.1.	Gemiddelde regionale geothermale gradiënt	46
8.1.2.	Hogere temperatuurswaarden	46
8.1.3.	Temperatuursverloop door conductie	47
8.1.4.	Temperatuursverloop door convectie	49
8.1.5.	Merksplas of Turnhout?	53
8.1.6.	Temperatuursanomalie in de breukzone	54
8.1.7.	Gebruikte gradiënt in berekeningen	56
8.2.	<i>Evaluatie van het formatiewater</i>	56
8.2.1.	Samenstelling	56
8.2.2.	Aquiferdruk	56
HOOFDSTUK 9.	Doublet Beschrijving	58
9.1.	<i>Doublet configuratie in de ondergrond</i>	58
9.2.	<i>Putarchitectuur</i>	60
9.3.	<i>Operationele instellingen</i>	62
9.3.1.	Pompgegevens	63
9.3.2.	Opvoerbuizen	63
9.3.3.	Retourtemperatuur	63
9.4.	<i>Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij boren</i>	64
9.5.	<i>Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij productie en injectie</i>	65

Referenties	67
Bijlage 1: Gedetailleerde lijst van gebruikte gegevens	70
Bijlage 2: Resultaten en details van de petrofysische evaluatie en formatiewateranalyse	72
Bijlage 3: Lijst van uitgevoerde puttesten, details en resultaten van de evaluatie	73
Bijlage 4: Lijst van productiedata, details en resultaten van de evaluatie	74
Bijlage 5: Kaarten die gebruikt zijn tijdens de evaluatie van de ondergrond	75
Bijlage 6: Putontwerp	78
Bijlage 7: Lithostratigrafische beschrijvingen	79
Bijlage 8: Opzet van het testprogramma	83

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Parameters gebruikt bij de berekening van het verwacht thermisch vermogen in DoubletCalc. * De waarden voor de skin omvatten niet de door DoubletCalc zelf berekende waarden op basis van de inclinatie van de putten.	2
Tabel 2: Hoekpunten van het gebied met hun coördinaten (Arup, 2017).	7
Tabel 3: Bovengrondse en ondergrondse coördinaten van de geplande putten.	8
Tabel 4: Overzicht van de formaties aanwezig onder de locatie in Beerse. Voor elk pakket is een korte omschrijving van de lithologie opgenomen. De diepte van de basis is weergegeven in meter onder maaiveld (+24 m TAW). De kleurencode komt overeen met die in Figuur 8.	12
Tabel 5: Overzicht van boringen in Vlaanderen die tot in de Kolenkalk Groep zijn geboord, met de diepte waarop deze is aangeboord en de diepte van de basis (of TD), in meter onder maaiveld. De putten in Mol waren ten tijde van het onderzoek nog niet geboord.	20
Tabel 6: Overzicht van boringen in Nederland die tot in de Kolenkalk Groep zijn geboord, met de diepte waarop deze is aangeboord en de diepte van de basis (of TD), in meter onder maaiveld.	20
Tabel 7: Overzicht van gebruikte boringen die niet tot in de Kolenkalk Groep zijn geboord, met locatie en diepte (m).	21
Tabel 8: Overzicht van de gebruikte snelheidswaarden voor inschatting van de diepte, met omzetting van tijds waarde (TWT in ms) naar diepte (in m onder TAW).	29
Tabel 9: Berekende verschillen (in meter) tussen de gemodelleerde horizons en de boorgegevens. Waar een bepaalde horizon niet is aangeboord wordt dit aangeduid met N/A.	34
Tabel 10: Overzicht van permeabiliteitsgegevens van het Dinantiaan in enkele putten in de Kempen, bepaald op basis van productietesten. De vermeldde netto dikte is diegene gebruikt voor het bepalen van de permeabiliteitswaarde. * Voor Loenhout wordt een dikte van het productief interval van 50 m aangenomen, alhoewel dit niet expliciet vermeld wordt in de literatuur.	42
Tabel 11: Overzicht van de reservoirparameters.	45
Tabel 12: De verwachte en gemeten temperatuurswaarden (°C) aan de top van de Kolenkalk Groep in de boringen van Merksplas, Turnhout en Heibaart. Bij de verwachting is de waarde aangegeven voor een gradiënt van 30°C/km (10°C aan oppervlak).	46
Tabel 13: Resultaten van de analyse van de chemische samenstelling van het formatiewater in het Dinantiaan uit de put in Merksplas (Vandenbergh et al., 2000). Alle waarden zijn weergegeven in mg/l. Analyse 1 is uitgevoerd door Tessenderlo Chemie (water afkomstig van de uitgang van de gas separator); Analyse 2 is gedaan door het Studie Centrum voor Kernenergie (SCK-CEN) (water uit een gesloten testsysteem); Analyse 3 en 4 zijn uitgevoerd door Flopetrol (waterstalen genomen op diepte).	57
Tabel 14: Zoutgehalte van het water (in ppm) zoals gemeten op monsters afkomstig uit verschillende boringen.	57
Tabel 15: Gekozen waarden voor de saliniteit van het formatiewater.	57
Tabel 16: Ruimtelijke coördinaten van de beoogde doellocaties en oppervlaktelocaties van de putten (in Lambert 1972 coördinaten).	59

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Printscreen van het resultatenscherf uit DoubletCalc, met de invoerwaarden (links) en de resultaten (rechts).	3
Figuur 2: Overschrijdingskansgrafiek voor het thermisch vermogen bij een uitkoeling tot 55°C.	4
Figuur 3: Overschrijdingskansgrafiek voor het debiet.	5
Figuur 4: Overschrijdingskansgrafiek voor de COP.	5
Figuur 5: Situering van de site van Janssen Pharmaceutica te Beerse.	6
Figuur 6: Locatie van het aardwarmteproject van Janssen Pharmaceutica te Beerse (detail).	7
Figuur 7: Grondplan van de site van Janssen Pharmaceutica te Beerse met aanduiding van de boorlocatie (SGS, 2015).	8
Figuur 8: Schematisch profiel van zuidwest (links) naar noordoost (rechts) doorheen het Bekken van de Kempen, met het voorkomen van de Kolenkalk Groep (Dinantiaan) onder de afzettingen van het Steenkoolterrein (Namuriaan en Westfaliaan), en links het Hoog van Heibaart. Omwille van vereenvoudiging zijn op deze sectie geen breuken ingetekend. De positie van (de boringen te) Beerse is weergegeven door de verticale zwarte lijn.	10
Figuur 9: Pre-Perm subcropkaart met de situering van het projectgebied binnen het Kempens Bekken en met de breuklijnen aan de top van het Carboon volgens Langenaeker (2000).	11
Figuur 10: Schematische paleogeografische kaart voor het Onder Carboon met weergave van de vermoedelijke verdeling van platformen en bekkens (Wong et al., 2007).	13
Figuur 11: Lithostratigrafische indeling (formaties) voor de boringen van Heibaart (KB129), Turnhout (KB120), Kessel (KB38), Booischot (KB132) en Halen (KB131) (naar Laenen, 2003). De ligging van de boringen is aangeduid op kaart in Hoofdstuk 5.	15
Figuur 12: Lithostratigrafische indeling van de gesteenten van het Devoon en Onder Carboon in Vlaanderen (Laenen, 2003).	16
Figuur 13: Ligging van het doublet in Beerse ten opzichte van de concessies (exploitatie en exploratie) van Fluxys rond Loenhout.	17
Figuur 14: Boringen (in België) die geëvalueerd zijn voor deze studie. Ter indicatie is ook de zuidelijke voorkomingsgrens van het Carboon weergegeven.	21
Figuur 15: Boringen in Nederland die geëvalueerd zijn in deze studie.	22
Figuur 16: Kaart met de ligging van seismische lijnen in het gebied. Van de campagne 1953-1956 waren er initieel enkel data beschikbaar in analoge vorm, van de andere campagnes (blauw en paars) waren er reeds digitale data beschikbaar.	24
Figuur 17: Geselecteerde lijnen voor de correlatie van boringen naar seismiek tot aan de site van Beerse.	25
Figuur 18: Interpretatie van de lijn 9101 waarbij de boring Heibaart (KB129) geprojecteerd is in het vlak. Van boven naar onder worden volgende stratigrafische horizonnen geïnterpreteerd: top Krijt (groen), basis Krijt (rood), top Dinantiaan (donkerblauw), top Devoon (lichtblauw) en top Siluur (roze).	26
Figuur 19: Correlatie van de basis Krijt (groen) en top Kolenkalk Groep (blauw) van de omgeving van Loenhout (linksboven) tot Beerse (rechts). De vlakken van de Kasterlee breukzone zijn eveneens weergegeven. De interpretatie illustreert de beperkte dikte van het Boven Carboon op het hoog van Heibaart en het wegduiken van de top van de Kolenkalk Groep naar Beerse toe. De kaart geeft de ligging van de uitsnijding en de kijkrichting aan.	27
Figuur 20: Interpretatie van seismische lijn 8109 (campagne Oostmalle 1981) waarbij de locatie van Janssen Pharmaceutica geprojecteerd is in het vlak. Van boven naar onder worden volgende stratigrafische horizonnen teruggevonden: basis Krijt (rood), top Dinantiaan (donkerblauw), mogelijke top Steentje-Turnhout Fm (blauwgroen), top Devoon (lichtblauw), mogelijke top Heibaart Fm (lichtgroen) en top Siluur (roze). Bovendien worden duidelijke breukzones aangegeven. Merk op dat de schaal verschilt van Figuur 18.	28

Figuur 21: Overzichtskaart met aanduiding van de grenzen van het snelheidsmodel (blauw) en van het structureel model (groen).	30
Figuur 22: Correlatiepaneel met 6 putten waaruit informatie beschikbaar is over de akoestische snelheid op basis van geofysische boorgatmetingen en die gebruikt zijn bij het opstellen van het snelheidsmodel.	31
Figuur 23: Dieptekaart van de top van de Kolenkalk Groep, met aanduiding van het vergunningsgebied, de locatie en trajecten van de putten. De grijze lijn geeft de ligging aan van het profiel in Figuur 25. De zuidwestelijke (tot westelijke) zone is niet betrouwbaar vanwege extrapolatie.	32
Figuur 24: Dieptekaart van de basis van de Kolenkalk Groep, met aanduiding van het vergunningsgebied, de locatie en trajecten van de putten. De grijze lijn geeft de ligging aan van het profiel in Figuur 25. De zuidwestelijke (tot westelijke) zone is niet betrouwbaar vanwege extrapolatie.	33
Figuur 25: SW-NE georiënteerd profiel over de putten (Beerse GT-01 in rood, Beerse GT-02 in blauw) en tot aan de boring van Turnhout (KB120, verticale rode lijn rechts). De ligging van het profiel is weergegeven op kaart in Figuur 23.	33
Figuur 26: Profiel doorheen het geologisch model waarin de onzekerheid voor de basis van de Kolenkalk Groep wordt weergegeven. Bovenaan is de meest waarschijnlijke interpretatie weergegeven, de dikte van het pakket ligt hierbij rond 500 m. In het profiel onderaan is een alternatieve interpretatie weergegeven waarbij de basis dieper ligt (en de dikte dus groter is). Beide opties zijn te correleren met de boring in Turnhout (KB120, rechts). Merk op dat deze figuur dateert van 2015 en dat de getoonde puttrajecten (linkerhelft) daardoor verschillen van de finale trajecten.	35
Figuur 27: Schematische dwarsdoorsnede langsheen het geplande doublet met conceptueel de verwachtingen wat betreft permeabiliteit. Enerzijds zijn er de verkarste zones kort onder de top zoals aangeboord in Merksplas (KB165) en Turnhout (KB120), anderzijds is er de mogelijkheid van bijkomende permeabele zones dieper in het reservoir (te verwachten op basis van inzichten rond temperatuur, zie Hoofdstuk 8). In de productieput is er de mogelijkheid om extra permeabiliteit aan te treffen langs de Kasterlee breukzone.	41
Figuur 28: Waargenomen temperatuur in de boringen van Heibaart en Turnhout en de temperatuursgradiënt daar (Vandenberghe & Bouckaert, 1980).	47
Figuur 29: Schematische weergave van het effect van lagen met verschillende thermische conductiviteit op de temperatuursgradiënt in de ondergrond.	48
Figuur 30: Temperatuursverloop in Merksplas op basis van conductie, in verhouding tot de normale regionale gradiënt en de gemeten waarde.	49
Figuur 31: Schematische weergave van het voorkomen van convectie in het reservoir en het effect op de temperatuursgradiënt in de ondergrond (gunstige positie).	50
Figuur 32: Opzet van het model om het effect van convectie in Beerse te simuleren.	50
Figuur 33: Simulaties geven aan dat convectie zich in het reservoir van het Onder Carboon (Kolenkalk Groep) voordoet vanaf een permeabiliteit van 150 mD.	51
Figuur 34: Temperatuursverloop voor de locatie in Beerse in het geval van een convectiecel (bij 150 en 200 mD), in verhouding tot de situatie met enkel conductie en de normale regional gradiënt. Ter vergelijking zijn de waarnemingen in Merksplas en Turnhout aangeduid.	52
Figuur 35: Temperatuursverloop voor de locatie in Turnhout in het geval van een convectiecel, in verhouding tot de situatie met enkel conductie, de normale regional gradiënt (30°C/km) en de gemeten waarden.	53
Figuur 36: Vergelijking van de seismische secties langs de locaties in Merksplas (links), Beerse (midden) en Turnhout (rechts). Nabij Turnhout zijn er enkele breuken met een grote verplaatsing, die mogelijk de meer uitgesproken temperatuursanomalie verklaren. De locatie in Beerse sluit meer aan bij die van Merksplas. Merk op dat de puttrajecten voor Beerse (in	

diepte) zijn geprojecteerd op de seismische sectie (in tijd), vandaar dat het traject niet lijkt overeen te komen met het ontwerp.	54
Figuur 37: Schematische weergave van het voorkomen van convectie in het reservoir en in een breukzone, en het effect op de temperatuursgradiënt in de ondergrond (gunstige positie).	55
Figuur 38: Op basis van het temperatuursprofiel bij simulaties met een gemiddelde permeabiliteit van 150 mD is een gradiënt afgeleid van 35,5°C/km. De trendlijn vertrekt van een oppervlaktetemperatuur van 10°C.	55
Figuur 39: Kaart met aanduiding van de puttrajecten. De productieput (GT-01) wordt naar het zuidwesten gedevieerd, de injectieput (GT-02) naar het noordoosten.	58
Figuur 40: De puttrajecten voor Beerse GT-01 (rood) en Beerse GT-02 (blauw) uitgezet ten opzichte van de diepte van de top van het reservoir (m onder TAW). De kruisjes geven de positie van het doorprikpunt weer voor iedere put.	59
Figuur 41: Dwarsdoorsnede met weergave van de boortrajecten voor productie- (rood) en injectieput (blauw). Bron: Erdwerk, 2018.	60
Figuur 42: Ontwerp voor de productieput Beerse GT-01 (Erdwerk 2017). De 7" liner wordt pas geplaatst na afloop van de testfase.	61
Figuur 43: Ontwerp voor de injectieput Beerse GT-02 (Erdwerk 2017). De 7" liner wordt pas geplaatst na afloop van de testfase.	62

HOOFDSTUK 1. SAMENVATTING

1.1. GEPLAND DOUBLET EN GEBRUIKTE PARAMETERS

Begin juni 2018 besloot de Vlaamse Regering een opsporingsvergunning voor aardwarmte te verlenen aan Janssen Pharmaceutica NV in de regio Beerse. Dit besluit werd gepubliceerd in het Belgisch Staatsblad op 12 juli 2018. Janssen Pharmaceutica plant een geothermisch doublet op de site in Beerse. De warmte van dit doublet zal aangewend worden voor industriële processen op de site. Voor de realisatie van dit doublet (heel doublet) wenst Janssen Pharmaceutica een beroep te doen op de waarborgregeling die door de Vlaamse overheid ter beschikking wordt gesteld.

Het doublet zal warmte winnen uit de gesteenten van de Kolenkalk Groep, van Dinantiaan (Vroeg Carboon) ouderdom en de topzone van het onderliggende Devoon.

Enerzijds zijn er permeabele (verkarste) zones kort onder de top van de Kolenkalk Groep aangetroffen in putten in de omgeving (Merksplas, Turnhout), diepere permeabele zones zijn mogelijk maar doorgaans is er niet voldoende diep geboord. Anderzijds kan er een verhoogde permeabiliteit zijn in en rondom een breukzone die aan de grens tussen Carboon en Devoon zal aangeboord worden (in de productieput).

Janssen Pharmaceutica meldt voor de Waarborgregeling een project aan waarbij het volledige interval van het Carboon en de topzone van het Devoon wordt aangeboord en vervolgens getest. Dit scenario omvat zowel verkarste zones als de breukzone.

Voor de productie mikt Janssen Pharmaceutica op een zo hoog mogelijke temperatuur en wenst daarom te produceren uit de dieperliggende breukzone. De stromingseigenschappen van deze zone zijn op voorhand echter niet gekend. Bovendien zijn de breukzone en het preciese permeabele interval daarrond voorafgaand aan de boringen en putttest moeilijker te definiëren, en het is dus ook moeilijker om deze sectie specifiek te testen. Daarom zal de putttest voor de productieput het gehele interval omspannen. Vandaar ook dat de aanvraag het volledige interval omvat. De opgegeven waarden en berekeningen houden hier ook rekening mee.

Het doublet zal bestaan uit twee gedeveierde putten, geboord vanop dezelfde bovengrondse locatie: een productieput richting het zuidwesten, en een injectieput richting het noordoosten. In beide putten zal een casing geplaatst worden net boven het reservoir. In de laatste (diepste) sectie van de put, doorheen de Kolenkalk Groep, zal een *liner* geplaatst worden met perforaties om toestroming van het water toe te laten. Het plaatsen van deze *liner* gebeurt echter pas na afloop van de putttesten (en evaluatie voor de Waarborgregeling). De positie van de perforaties zal immers bepaald worden op basis van de resultaten van de boring. Op deze wijze kan de putttest plaatsvinden over het gehele interval (in *open hole*) en kan Janssen Pharmaceutica achteraf de afwerking van de put op een zo gunstige mogelijke wijze uitvoeren.

De voor de berekening gebruikte geologische parameters en hun spreiding zijn opgenomen in onderstaande tabel. Voor de diepte van het reservoir neemt het programma standaard een onzekerheid van $\pm 10\%$. Voor de andere parameters is de spreiding zelf te kiezen. Voor de dikte van het reservoir is een netto/bruto verhouding gekozen tussen 0,14 en 0,16, wat in combinatie met de bruto dikte (450-500-550 m) een netto productieve zone oplevert tussen 63 en 88 m.

Tabel 1: Parameters gebruikt bij de berekening van het verwacht thermisch vermogen in DoubletCalc. * De waarden voor de skin omvatten niet de door DoubletCalc zelf berekende waarden op basis van de inclinatie van de putten.

Aquifer laagpakketnaam	Kolenkalk Groep			
Geologische parameters met spreiding	Minimum	Verwacht	Maximum	Eenheid
Permeabiliteit	300	1000	2300	mD
Bruto dikte watervoerendepakket met spreiding	450	500	550	m
Netto/bruto percentage watervoerende pakket met spreiding	14	15	16	%
Zoutgehalte (Total Dissolved Solids)	100.000	134.000	165.000	ppm
Diepte top aquifer injectieput	1439	1599	1759	m
Diepte top aquifer productieput	1466	1629	1792	m
Geologische parameters zonder spreiding				
Geothermische gradiënt	35,5			°C/m
Gemiddelde oppervlaktetemperatuur	10			°C
k _v /k _h ratio van de aquifer	1			-
Niet-geologische parameters: Putspecificatie				
Verbuizingsschema productieput; dieptes van de segmenten in m AH en TVD	500 (500) – 1169 (1153) – 1742 (1629)			m
Binnendiameter opvoerbuys per segment	7,724 – 12,516 – 8,681			Inch
Ruwheid opvoerbuys per segment	1,8 – 1,8 – 1,8			Milli-inch
Diameter boorgat productieput op aquiferniveau	8 ½			Inch
Skin (weerstand rond putmond) productieput *	-0,34			-
Inclinatie put-aquifer traject productieput	54			°
Verbuizingsschema injectieput; dieptes van de segmenten in m AH en TVD	100 (100) – 1150 (1055) – 1832 (1599)			m
Binnendiameter opvoerbuys per segment	9,5 – 12,516 – 8,681			Inch
Ruwheid opvoerbuys per segment	1,8 – 1,8 – 1,8			Milli-inch
Diameter boorgat injectieput op aquiferniveau	8 ½			Inch
Skin (weerstand rond putmond) injectieput *	0			-
Inclinatie put-aquifer traject injectieput	37			°
Niet-geologische parameters: pomp en doubletspecificatie				
Injectietemperatuur	55			°C
Afstand tussen productie- en injectieput op aquiferniveau	1720			m
Pompefficiëntie	0,7			Frac
Afhangdiepte pomp in productieput	500			m
Opgelegd drukverschil pomp	60			bar

Bij de niet-geologische parameters horen o.a. de pompgegevens (diepte, drukverschil, efficiëntie), de afstand tussen de putten, de putdimensies (diepte, diameter) en deviatiehoek.

De putdimensies zijn overgenomen uit het ontwerp (versie 2017). Hieruit zijn ook de puttrajecten overgenomen, op basis waarvan de tussenafstand is bepaald. Het programma berekent zelf een skin waarde voor beide putten, afhankelijk van hun deviatiehoek.

De finale diepte waarop de pomp zal afgehangen worden, de efficiëntie en het opgelegde drukverschil (in combinatie met een eventuele injectiepomp) zijn nog niet gekend. Ze zijn uiteraard afhankelijk van de productiviteit en injectiviteit. De hier opgegeven zijn wel realistische waarden, te verwachten waarden, die de finale instellingen benaderen. De finale parameters zullen vastgelegd worden op basis van de puttesten, zowel van korte als van lange (doublettest) duur. Dit wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 9. Hetzelfde geldt voor de lengte en diameter van de opvoerbuizen.

De retourtemperatuur van 55°C wordt gebruikt in de berekeningen en heeft een kleine impact op de resultaten voor het debiet omwille van de densiteit en viscositeit van het geïnjecteerde water. De waarde van 55°C is arbitrair gekozen. In Hoofdstuk 9 wordt deze keuze (om de bovengrondse aspecten los te koppelen van de geologische parameters) toegelicht.

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	300.0	1000.0	2300.0
aquifer net to gross (-)	0.14	0.15	0.16
aquifer gross thickness (m)	450.0	500.0	550.0
aquifer top at producer (m TVD)	1466.0	1629.0	1792.0
aquifer top at injector (m TVD)	1439.0	1599.0	1759.0
aquifer water salinity (ppm)	100000.0	134000.0	165000.0

Property	value
number of simulation runs (-)	5000.0
aquifer kh/kv ratio (-)	1.0
surface temperature (°C)	10.0
geothermal gradient (°C/m)	0.0355
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0.0
initial aquifer pressure at producer (bar)	0.0
[initial aquifer pressure at injector (bar)]	0.0
exit temperature heat exchanger (°C)	55.0
distance wells at aquifer level (m)	1720.0
pump system efficiency (-)	0.7
production pump depth (m)	500.0
pump pressure difference (bar)	60.0
outer diameter producer (inch)	8.5
skin producer (-)	-0.34
skin due to penetration angle p (-)	-2.58
pipe segment sections p (m AH)	500.0,1169.0,1742.0
pipe segment depth p (m TVD)	500.0,1153.0,1629.0
pipe inner diameter p (inch)	7.72,12.52,8.68
pipe roughness p (milli-inch)	1.8,1.8,1.8
outer diameter injector (inch)	8.5
skin injector (-)	0.0
skin due to penetration angle i (-)	-0.45
pipe segment sections i (m AH)	100.0,1150.0,1832.0
pipe segment depth i (m TVD)	100.0,1055.0,1599.0
pipe inner diameter i (inch)	9.5,12.52,8.68
pipe roughness i (milli-inch)	1.8,1.8,1.8

Monte Carlo cases (stochastic inputs)	P90	P50	P10
aquifer kH net (Dm)	45.54	75.78	128.16
mass flow (kg/s)	139.97	192.82	242.82
pump volume flow (m³/h)	469.9	647.6	815.7
required pump power (kW)	1118.9	1542.0	1942.0
geothermal power (MW)	10.21	14.81	19.46
COP (kW/kW)	8.2	9.6	11.0

aquifer pressure at producer (bar)	157.61	167.45	177.53
aquifer pressure at injector (bar)	154.86	164.18	173.7
pressure difference at producer (bar)	12.22	16.45	19.9
pressure difference at injector (bar)	19.54	26.28	31.83
aquifer temperature at producer * (°C)	73.47	76.72	79.93
temperature at heat exchanger (°C)	73.07	76.3	79.47

base case (median value inputs)	value
aquifer kH net (Dm)	75.0
mass flow (kg/s)	191.6
pump volume flow (m³/h)	642.6
required pump power (kW)	1529.9
geothermal power (MW)	14.71
COP (kW/kW)	9.6

aquifer pressure at producer (bar)	167.47
aquifer pressure at injector (bar)	164.23
pressure difference at producer (bar)	16.52
pressure difference at injector (bar)	26.43
aquifer temperature at producer * (°C)	76.7
temperature at heat exchanger (°C)	76.3
pressure at heat exchanger (bar)	27.21

* @ mid aquifer depth

Figuur 1: Printscreen van het resultatscherm uit DoubletCalc, met de invoerwaarden (links) en de resultaten (rechts).

1.2. VERWACHT VERMOGEN EN OverschrijdingskansGRAFIEK

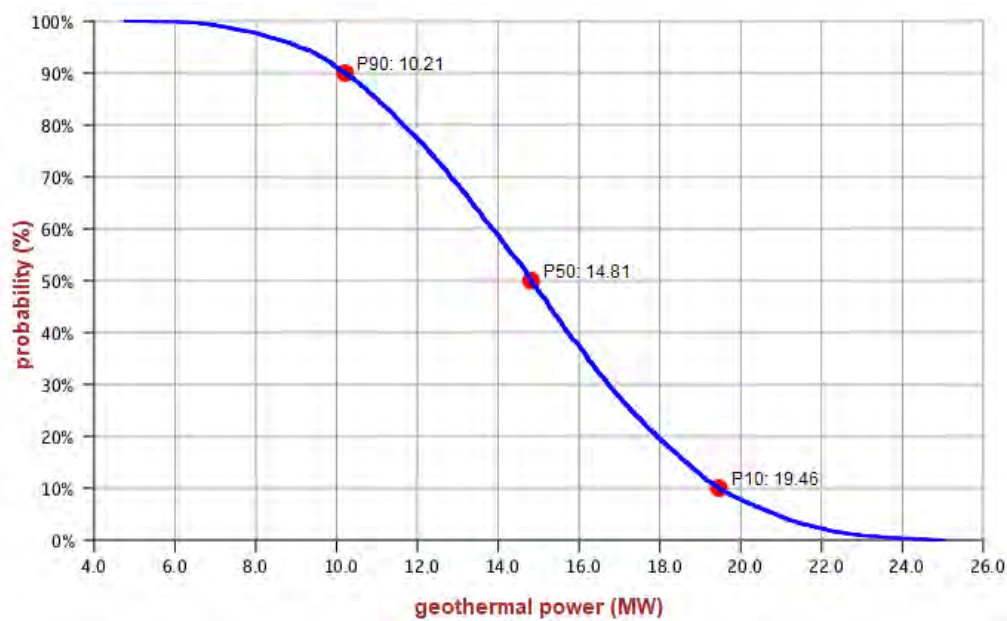
Het resultaat van de berekeningen (5000 runs) is zowel weergegeven in tabelvorm (printscreen van het uitvoerscherm in DoubletCalc) als in grafiek. De grafieken geven de overschrijdingskans (probabiliteit) weer voor een bepaalde waarde van het thermisch vermogen, debiet of COP. Het

vermogen is hierbij gerelateerd aan een uitkoeling van circa 20°C (tot 55°C). Dit beïnvloedt ook de COP.

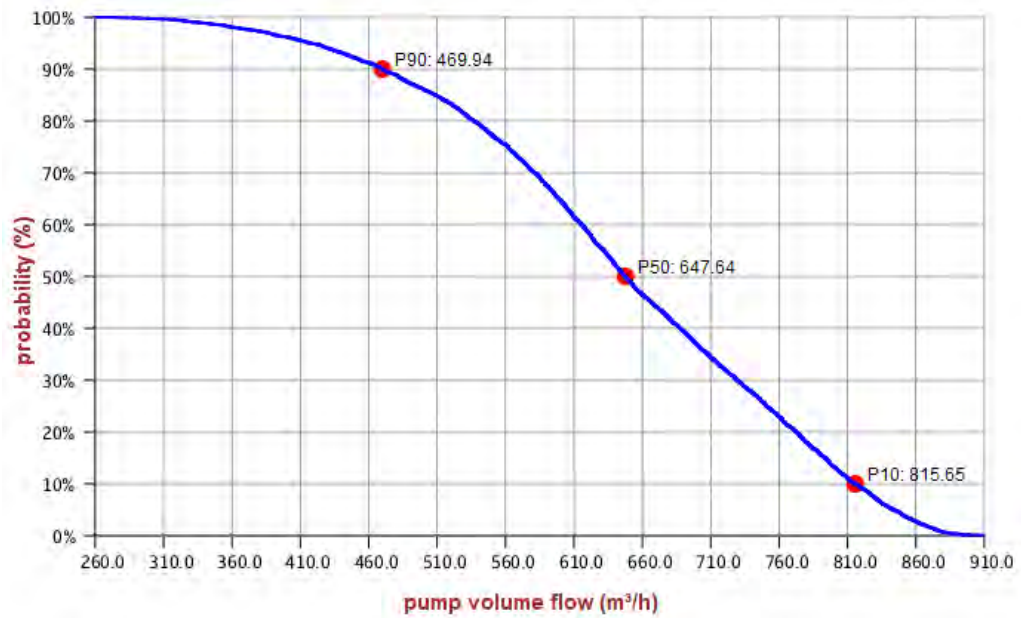
Het resultaat is een P_{90} waarde voor het thermisch vermogen van 10,2 MW (met een P_{50} van 14,8 MW). Voor het debiet ligt de P_{90} op ruim 470 m³/h (P_{50} van 648 m³/h). De COP tenslotte heeft een P_{90} van 8,2 kW/kW en een P_{50} van 9,6 kW/kW.

Het resultaat voor het vermogen (en in beperkte mate ook voor het debiet) wordt beïnvloed door de keuze van de retourtemperatuur van het geïnjecteerde water (55°C). Wanneer later een grotere uitkoeling mogelijk wordt, dan zal het thermisch vermogen van het doublet verbeteren (en de COP verbeteren). Dit wordt toegelicht in Hoofdstuk 9.

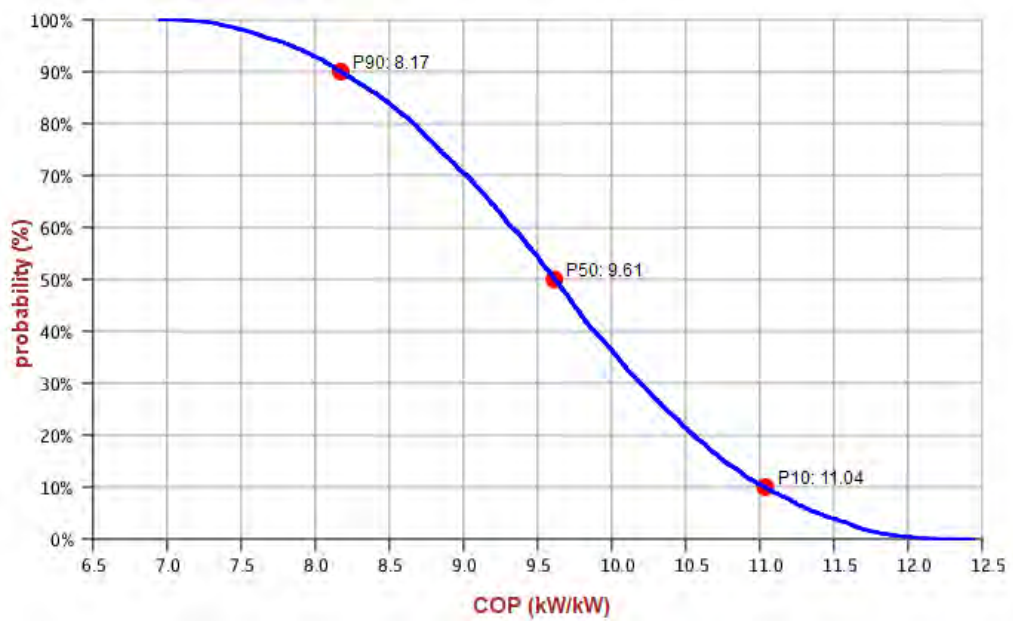
Ook de finale instellingen van de pomp zullen wellicht verschillend zijn. Belangrijk is hierbij wel dat het aftoetsen van de resultaten van de puttesten met de verwachtingen (de hier afgeleide P_{90}) ook met dezelfde parameters gebeurt.



Figuur 2: Overschrijdingskansgrafiek voor het thermisch vermogen bij een uitkoeling tot 55°C.



Figuur 3: Overschrijdingskansgrafiek voor het debiet.

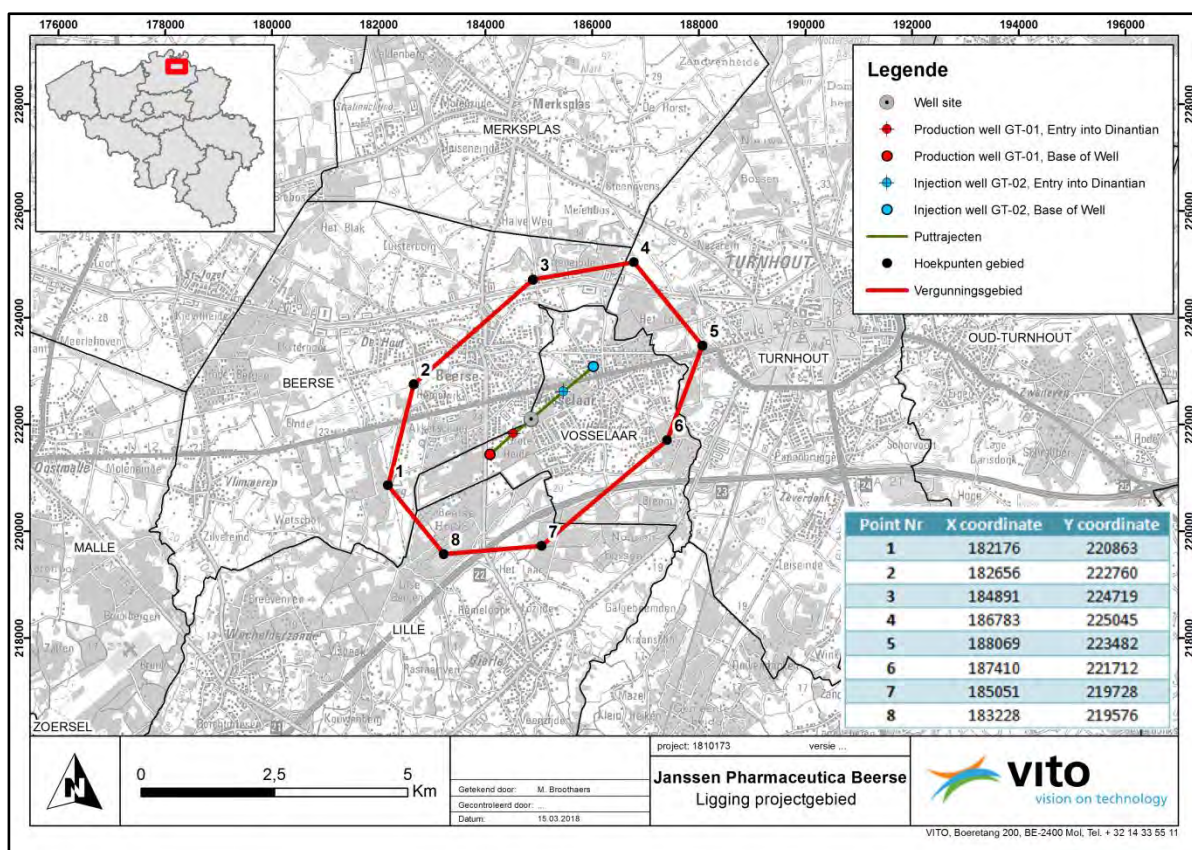


Figuur 4: Overschrijdingskansgrafiek voor de COP.

HOOFDSTUK 2. BEOOGDE LOCATIE EN PUTTEN

2.1. BEOOGDE LOCATIE

De locatie van het project is de site van Janssen Pharmaceutica aan de Turnhoutseweg te Beerse (Figuur 5, Figuur 6). Voor de realisatie van het geothermisch doublet plant Janssen Pharmaceutica twee putten te boren vanop de site. De situering van de boorlocatie is weergegeven op Figuur 7. De boorlocatie is gelegen in de grenszone tussen de gemeenten Beerse en Vosselaar, maar de putten worden gedeveïerd onder het grondgebied van Vosselaar.



Figuur 5: Situering van de site van Janssen Pharmaceutica te Beerse.

Voor het project is voor de vergunning een gebied afgebakend waarvan de coördinaten in onderstaande tabel zijn opgenomen. De vergunning is toegekend in juni 2018 en vervolgens gepubliceerd in het Belgisch Staatsblad op 12 juli 2018.

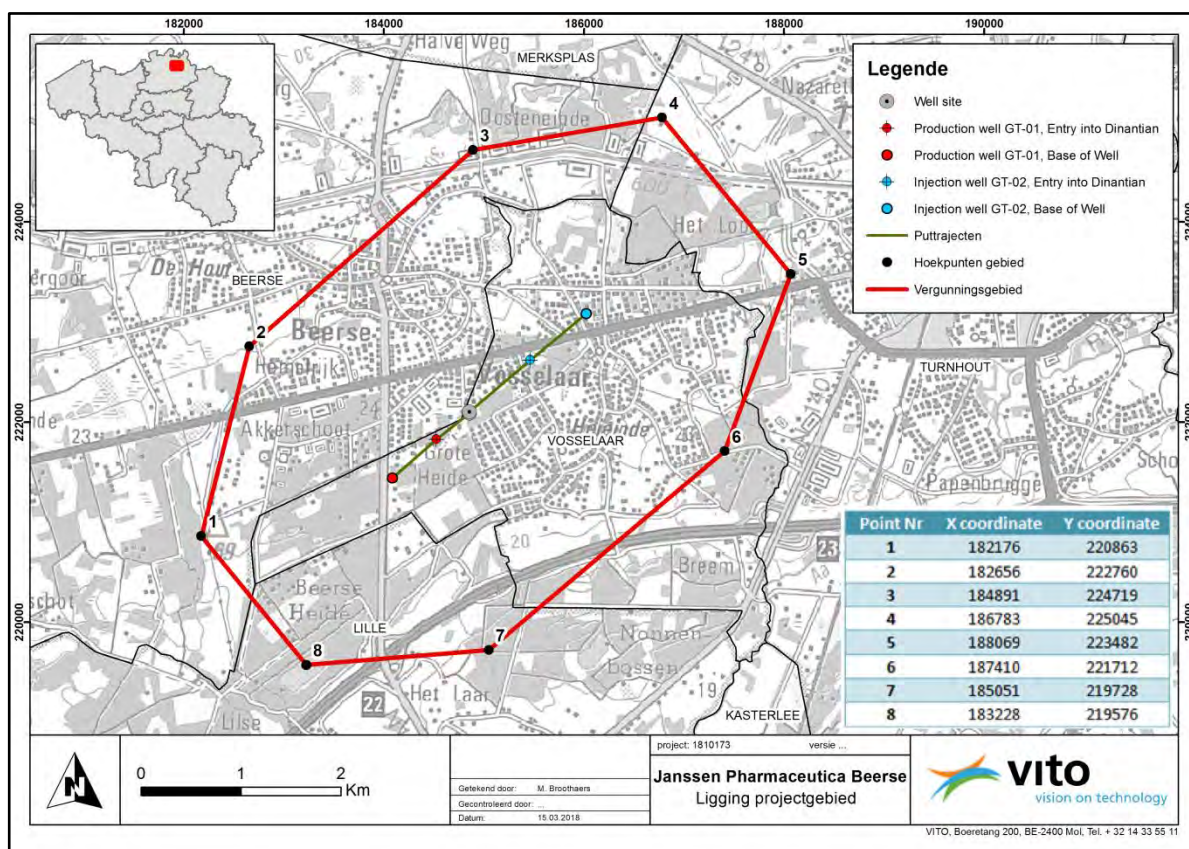
De vergunning strekt zich in de Z-richting (diepte) uit vanaf 200 m boven de basis van de Namuriaan gesteenten (bovengrens) tot 500 m onder het Dinantiaan (ondergrens), volgens het 3D geologisch model G3Dv2.

Tabel 2: Hoekpunten van het gebied met hun coördinaten (Arup, 2017).

Point Nr	X coordinate	Y coordinate
1	182176	220863
2	182656	222760
3	184891	224719
4	186783	225045
5	188069	223482
6	187410	221712
7	185051	219728
8	183228	219576

2.2. PUTTEN

Beide putten zullen geboord worden vanop deze locatie, waarbij de productieput naar het zuid-westen zal gedeveieerd worden, terwijl de injectieput de andere kant uit gaat (noordoosten). De puttrajecten worden verderop in het rapport toegelicht.



Figuur 6: Locatie van het aardwarmteproject van Janssen Pharmaceutica te Beerse (detail).

De bovengrondse coördinaten (volgens Lambert 1972 systeem) van de putten zijn opgenomen in onderstaande tabel.

De TD waarden en coördinaten van de putten gaan ervan uit dat tot in de top van het Devoon (Evieux Formatie) wordt geboord. Indien in het bovenste deel van het pakket voldoende permeabiliteit aangetroffen wordt, dan kan besloten worden om in de injectieput vroeger te stoppen en toch niet het ganse pakket te doorboren.

Tabel 3: Bovengrondse en ondergrondse coördinaten van de geplande putten.

Put	Doel	X coördinaat	Y coördinaat
Beerse GT-01 (oppervlakte)	Productie	184857	222092
Beerse GT-01 (TD)		184084	221443
Beerse GT-02 (oppervlakte)	Injectie	184858	222108
Beerse GT-02 (TD)		186023	223086



Figuur 7: Grondplan van de site van Janssen Pharmaceutica te Beerse met aanduiding van de boorlocatie (SGS, 2015).

HOOFDSTUK 3. AANMELDING VOOR DE WAARBORGREGELING

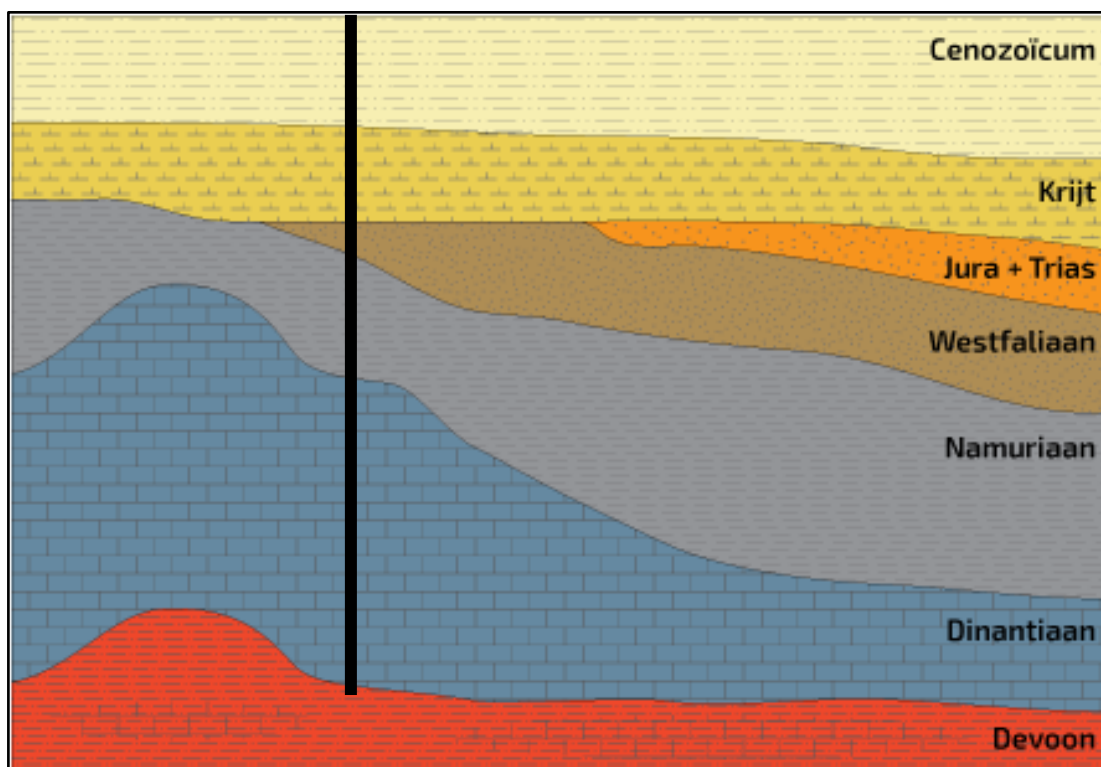
Janssen Pharmaceutica wenst een volledig doublet aan te melden voor de Waarborgregeling.

HOOFDSTUK 4. GEOLOGISCHE SETTING

4.1. LOKALE GEOLOGIE

4.1.1. GEOLOGISCHE STRUCTUUR

De geologische structuur voor de Kempen wordt schematisch geïllustreerd in Figuur 8. Bovenaan zijn er subhorizontale tot licht naar het noordoost afhellende lagen van het Cenozoïcum en het Krijt. De dikte van deze sequentie (en dus ook de diepte van de basis van het Krijt) neemt geleidelijk aan toe naar het noorden en noordoosten. In Limburg zijn onder het Krijt gesteenten van het Perm, Trias en Jura aanwezig, maar in de regio Antwerpen ontbreken deze. Er is een belangrijk hiaat tussen de top van het steenkoolterrein (het Carboon) en de eerste afzettingen van het Krijt.



Figuur 8: Schematisch profiel van zuidwest (links) naar noordoost (rechts) doorheen het Bekken van de Kempen, met het voorkomen van de Kolenkalk Groep (Dinantiaan) onder de afzettingen van het Steenkoolterrein (Namuriaan en Westfaliaan), en links het Hoog van Heibaart. Omwille van vereenvoudiging zijn op deze sectie geen breuken ingetekend. De positie van (de boringen te) Beerse is weergegeven door de verticale zwarte lijn.

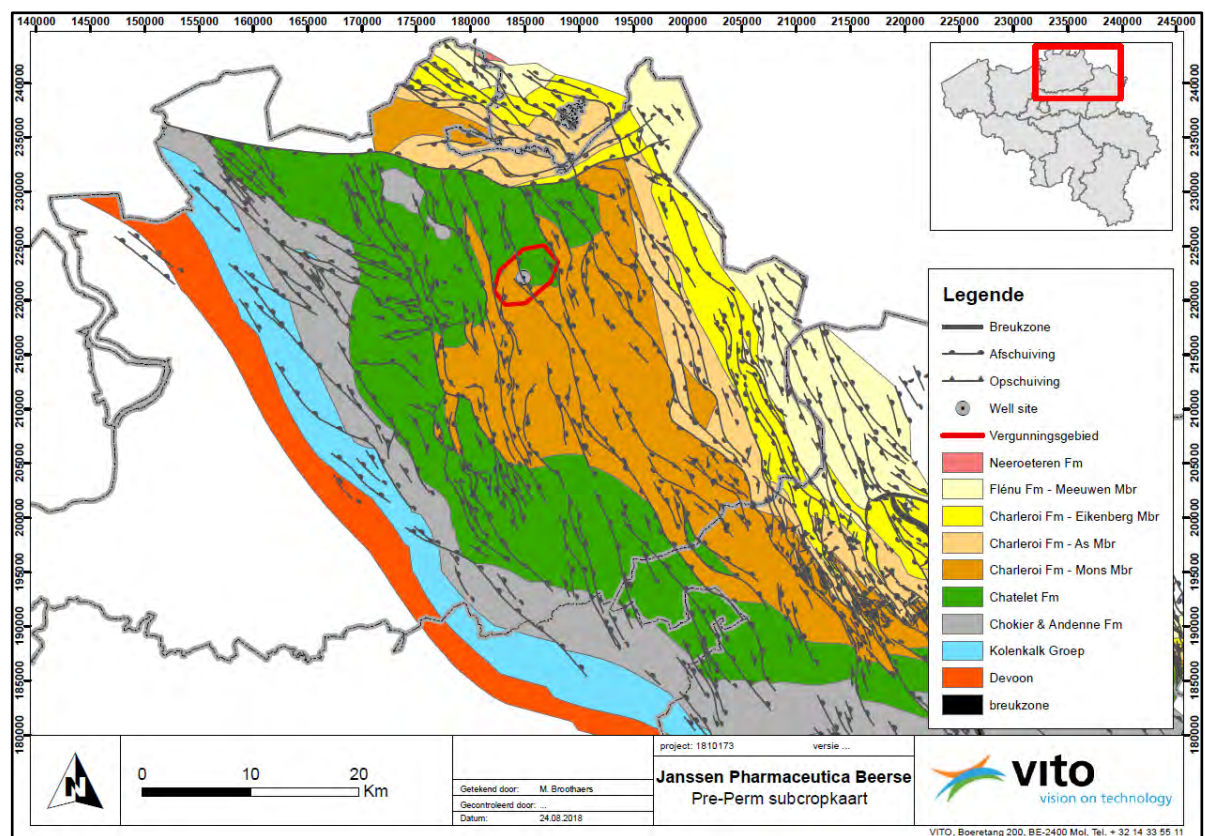
De basis van het Krijt vormt ook een hoekdiscordantie. De lagen daaronder vertonen eveneens een algemene afhelling naar het noordoosten, maar de helling is steiler. Dit resulteert in de aanwezigheid van steeds jongere lagen onder de basis van het Krijt naar het noordoosten toe. Waar in het zuiden het Krijt direct op het Massief van Brabant rust, verschijnen naar het noord-noordoosten eerst afzettingen van het Devoon onder het Krijt, gevolgd door de carbonaatsequentie van het Onder

Carboon, en tenslotte de verschillende lagen van het steenkoolterrein (Boven Carboon). De dikte van het steenkoolterrein neemt vervolgens geleidelijk aan toe, tot meer dan 1000 m in de omgeving van Turnhout. Waar er in het westen (en zuiden) enkel Onder Westfaliaan A aanwezig is (Châtelet Formatie), is in het noordoosten ook Westfaliaan C aanwezig (Flénu Formatie). In Limburg is er zelfs Westfaliaan D (Neeroeteren Formatie) bewaard gebleven aan de top van het steenkoolterrein. Omwille van deze geometrie zullen boringen ten westen van de lijn Kapellen-Aarschot geen Onder Carboon meer aantreffen en onder de basis Krijt meteen in oudere lagen (Devoon tot Siluur) terechtkomen.

In de omgeving van Beerse ligt de basis van het Krijt op bijna 1000 m diepte, en er is ruim 1000 m aan Boven Carboon (Namuriaan en Westfaliaan A) sedimenten aanwezig.

Daarnaast wordt de algemene (geleidelijke) afhelling van de lagen onderbroken door een reeks NW-SE gerichte breuken (Figuur 9). Dit zijn doorgaans naar het oosten afhellende afschuivingsbreuken, maar er zijn ook breuken met een tegenovergestelde hellingsrichting. Deze breuken doorsnijden het steenkoolterrein. De meeste ervan stoppen tegen de basis van het Krijt, enkel de grootste breuken zetten zich nog verder door naar het oppervlak.

De locatie in Beerse is gelegen vlakbij een oosthellende breuk (Kasterlee breuk) en een westhellende breuk (antithetisch ten opzichte van de hoofdbreuk).



Figuur 9: Pre-Perm subcropkaart met de situering van het projectgebied binnen het Kempens Bekken en met de breuklijnen aan de top van het Carboon volgens Langenaeker (2000).

De kaart in Figuur 9 geeft het voorkomensgebied weer van de Devoon en Carboon formaties in de Kempen. Dit is een pre-Perm subcropkaart (naar Langenaeker, 2000) die aangeeft hoe er naar het noordoosten steeds jongere pakketten verschijnen. De ligging van het projectgebied binnen het

Kempens Bekken is eveneens weergegeven. Ten noordwesten van Beerse is het hoog van Heibaart gekenmerkt door het uitwigen van de Westfaliaan gesteenten (Châtelet Formatie), waardoor er onder het Krijt direct Namuriaan afzettingen (Andenne Formatie) te vinden zijn (grijze vlek op de kaart). De trajecten van de breuken zijn die aan de top van het Carboon zoals gekarteerd door Langenaeker (2000).

Tabel 4: Overzicht van de formaties aanwezig onder de locatie in Beerse. Voor elk pakket is een korte omschrijving van de lithologie opgenomen. De diepte van de basis is weergegeven in meter onder maaiveld (+24 m TAW). De kleurencode komt overeen met die in Figuur 8.

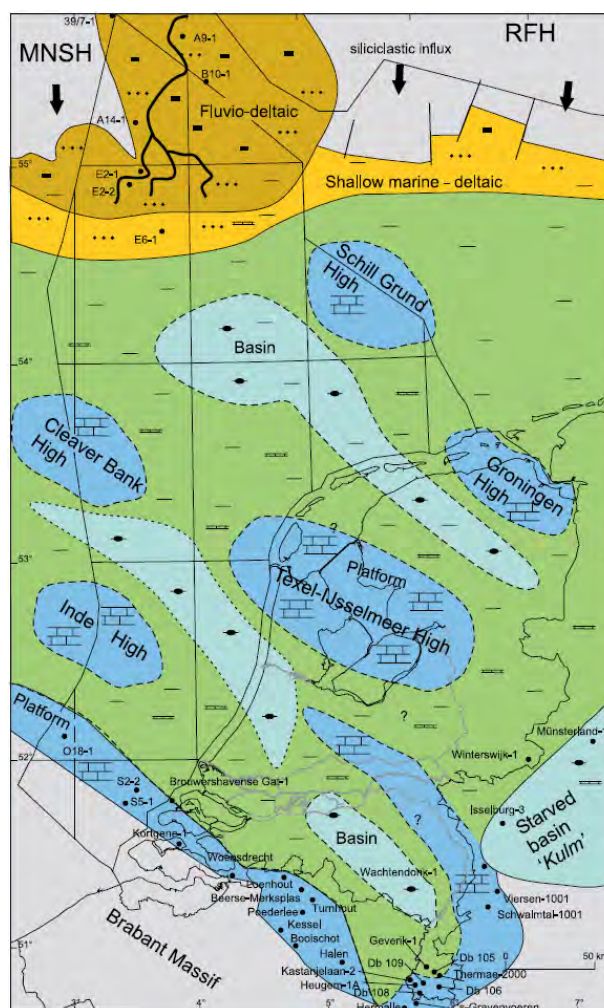
Groep	Formatie	Lithologie	Diepte basis
	Malle		14
	Merksplas	Middelmatig grijs zand	31
	Lillo	Fijn grijs schelprijk zand	43
	Kattendijk	Middelmatig en fijn glauconietrijk zand	50
	Diest	Groen glauconietrijk zand	143
	Berchem	Zeer fijn donkergroen tot zwart glauconietrijk zand	160
	Voort	Fijn donkergroen glauconietrijk kleiig zand	165
Rupel	Boom	Klei en siltige klei	284
Tongeren	Zelzate	Donkerbruine kleiige silt	326
	Maldegem	Afwisseling van bruingroene klei en zand	374
Zenne	Lede	Fijn kalkrijk en glauconietrijk zand, met banken van zandige kalksteen en kalkrijke zandsteen, grind aan de basis	384
	Brussel	Afwisseling van (niet-) kalkrijk zand, mergel en kalksteenlagen	413
Ieper	Tielt	Zeer fijn zand, grove silt, overgang naar zeer fijn zand naar boven toe	467
	Kortrijk	Voornamelijk kleirijk. Aan de basis glauconietrijk zand, zandige klei en compacte siltige klei/kleiige silt; siltige klei, klei en silt in het midden; zeer fijne siltige klei aan de top	539
Landen	Tienen	Lignietrijke klei en ligniet, wit zand, mergel, lokaal gesilicifieerde houtfragmenten en kwartsiet	584
	Hannut	Klei, zandige klei en silt, zandrijke kalksteen, siltsteen en zandsteen, voornamelijk fijn glauconietrijk zand aan de top	654
	Heers	Witgrijze kalkrijke mergel met daaronder groen glauconietrijk zand	673
	Houthem	Beige zachte kalkareniet	705
	Maastricht	Lichtbeige kalkareniet met silex	738
	Gulpen	Zeer fijne lichtgrijze kalkareniet met dikke silex banken, fijnkorrelig krijt, siltig krijt, grijze mergel	
	Vaals	Fijn glauconietrijk zand en silt, mergel	978
Steenkoolterrein	Châtelet	Ritmische opeenvolging van zandsteen, siltsteen, kleisteen en koollagen	1315
	Andenne & Chokier	Voornamelijk siltige kleisteen, zandsteen, dunne koollagen (Andenne); Kalkrijke kleisteen, pyrietrijke kleisteen, gesilicifieerd (Chokier)	1685
Kolenkalk		Kalksteen en dolomiet	2075

4.1.2. STRATIGRAFIE

Een overzicht van de lokale geologie is beschikbaar vanop de website van DOV (Databank Ondergrond Vlaanderen) en is weergegeven in Tabel 4.

De precieze waarde voor de diepte van de basis van deze pakketten varieert al naargelang de exacte locatie nabij de site in Beerse. Op die manier verschillen de hier opgegeven waarden ook lichtjes van die opgenomen in het putontwerp van de boringen (toegelicht verderop).

Het bekken van de Kempen ontwikkelde zich tussen twee tektonische blokken: het Massief van Brabant in het zuiden en het Krefeld Hoog in het noordoosten. Dikkere afzettingen vormden zich aan de randen van het bekken (platform). De boringen in de Kempen en het studiegebied vallen binnen dit platform, alhoewel de preciese grenzen van de afzettingssmilieus varieerden doorheen de tijd (Mucchez et al., 1987).



Figuur 10: Schematische paleogeografische kaart voor het Onder Carboon met weergave van de vermoedelijke verdeling van platformen en bekken (Wong et al., 2007).

4.1.3. STRATIGRAFIE VAN HET ONDER CARBOON

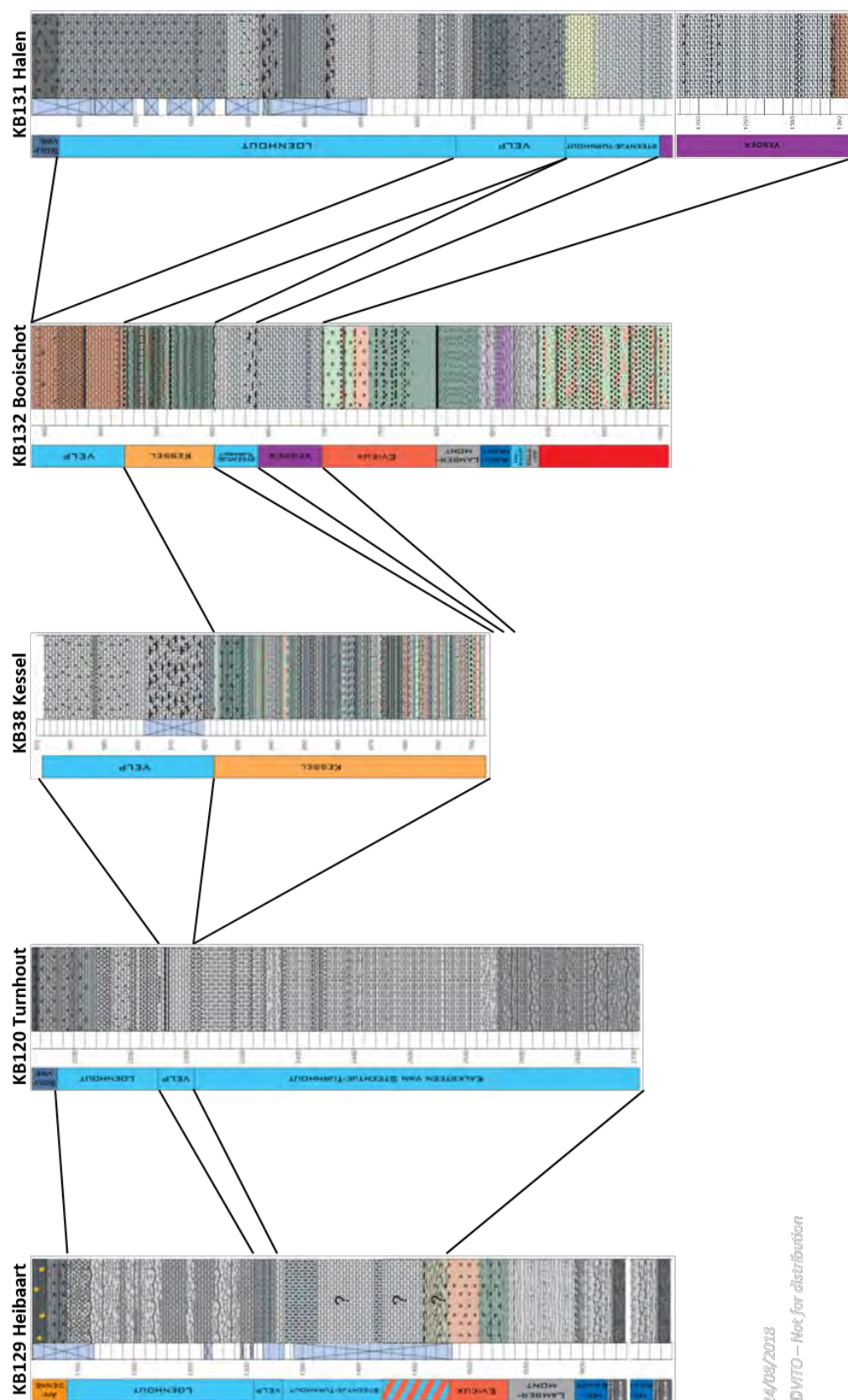
De geologische periode Carboon kan grotendeels onderverdeeld worden in een kalksteenhoudend gedeelte, gevormd in het Vroege Carboon en een kool-, schalie- en zandsteenhoudend gedeelte, afgezet in het Late Carboon. Zowel kalksteen als zandsteen kunnen een goede aquifer vormen en op die manier een interessant target zijn voor geothermie. De meest gunstige zandsteenlagen uit het late Carboon ontbreken echter in de omgeving van Beerse. Bovendien liggen de andere lagen uit het late Carboon in deze regio te ondiep om water van voldoende hoge temperatuur (>80°C) te produceren. Om deze redenen worden hier louter de formaties uit het Onder Carboon, het Dinantiaan, beschreven¹.

Zowel in Heibaart (KB129), Turnhout (KB120) als Halen (KB131) begint de sequentie bovenaan met de Loenhout Formatie (en ook in Poederlee, KB170). De dikte hiervan varieert wel tussen de verschillende boringen, maar ze komt in het grootste deel van het gebied voor. In Booischot (KB132) en Kessel (KB38) ontbreekt dit pakket. Deze boringen zijn echter een stuk zuidelijker (of zuid-westelijker) gelegen en omwille van erosie is de sequentie niet volledig. Het Krijt rust er direct op de Velp Formatie. Dit pakket wordt ook herkend in de andere boringen.

Omwille van de zuidelijke ligging dicht bij de rand van het bekken is er in Booischot en Kessel een zandig pakket sedimenten afgezet (Kessel Formatie) dat afwezig is in de verder gelegen putten van Heibaart en Turnhout. Dit wijst erop dat er in sommige periodes emersie optrad in het hinterland. Onder de Kessel Formatie bevindt zich de Formatie van Steentje-Turnhout, die het dikst ontwikkeld is in Turnhout. Nog dieper ligt het pakket dolomiet van de Vesder Formatie. Dit wordt enkel aangetroffen in Booischot (60 m) en in Halen (circa 200 m) en ontbreekt in Heibaart. In Heibaart is er echter een slecht beschreven en gekende overgangszone tussen het Onder Carboon en het Devoon (Evieux Formatie). Noch de Vesder dolomiet, noch de overgangszone zijn gekend in Turnhout, daarvoor werd er niet diep genoeg geboord.

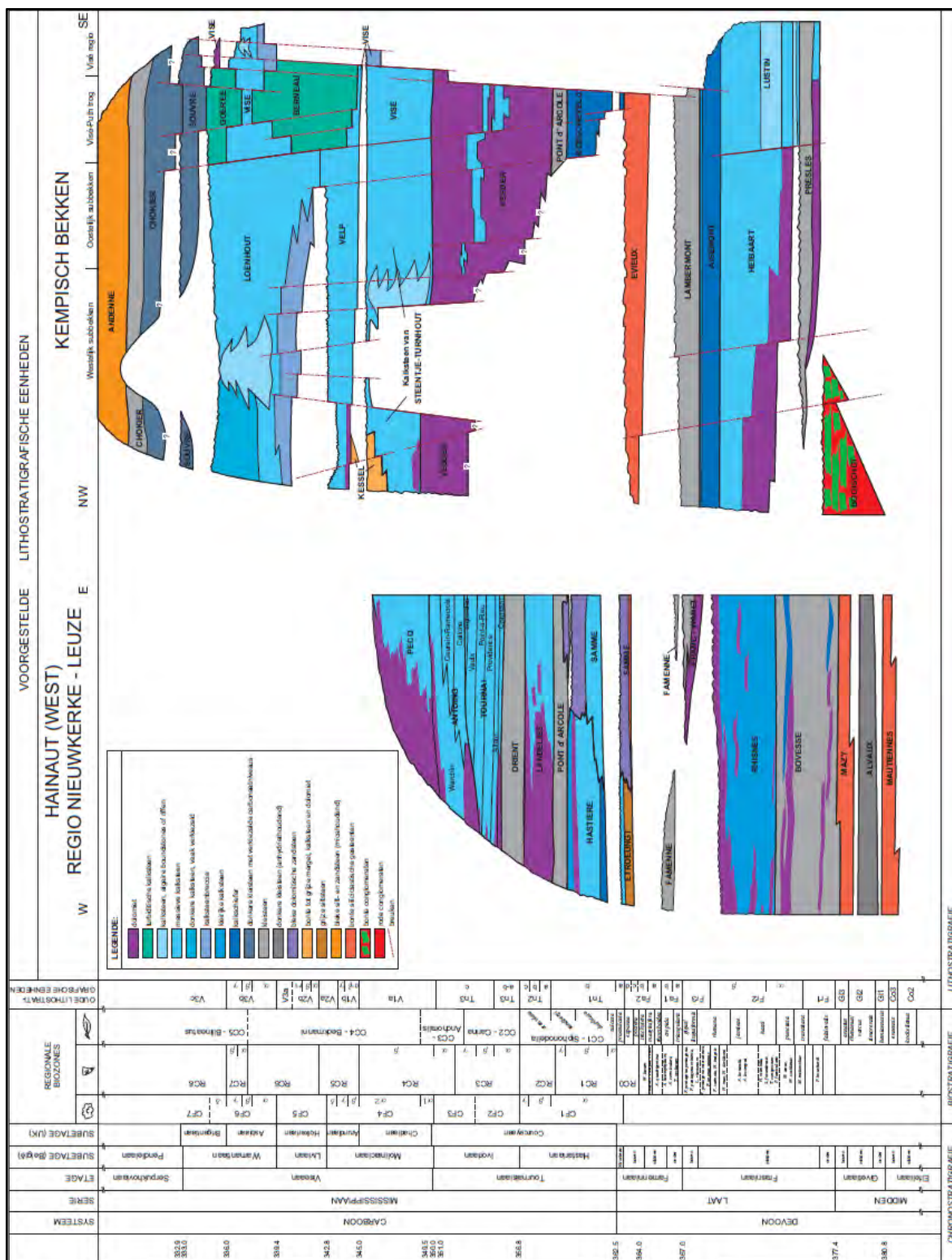
De boring in Merksplas (KB165) is niet gekernd waardoor een detail beschrijving en litho-stratigrafische indeling zoals in de andere putten niet mogelijk is. Op basis van de beschikbare informatie zien Vandenbergh et al. (2000) echter wel gelijkenissen met de opeenvolging in Turnhout. In Merksplas werden echter enkel de bovenste 120 m aangeboord. Op basis van het regionaal voorkomen van bepaalde pakketten en de correlatie van Vandenbergh et al. kunnen we in de omgeving van Beerse een vergelijkbare sequentie verwachten met bovenaan de Loenhout Formatie, daaronder de Velp Formatie, gevolgd door de Steentje-Turnhout Formatie. Het is best mogelijk dat zich daaronder een pakket dolomiet bevindt (Vesder Formatie) alvorens de top van het Devoon wordt aangeboord (Evieux Formatie).

¹ Een gedetailleerde beschrijving per formatie is opgenomen in de bijlage.



24/08/2018
©VITO – Not for distribution

Figuur 11: Lithostratigrafische indeling (formaties) voor de boringen van Heibaart (KB129), Turnhout (KB120), Kessel (KB38), Booischot (KB132) en Halen (KB131) (naar Laenen, 2003). De ligging van de boringen is aangeduid op kaart in Hoofdstuk 5.



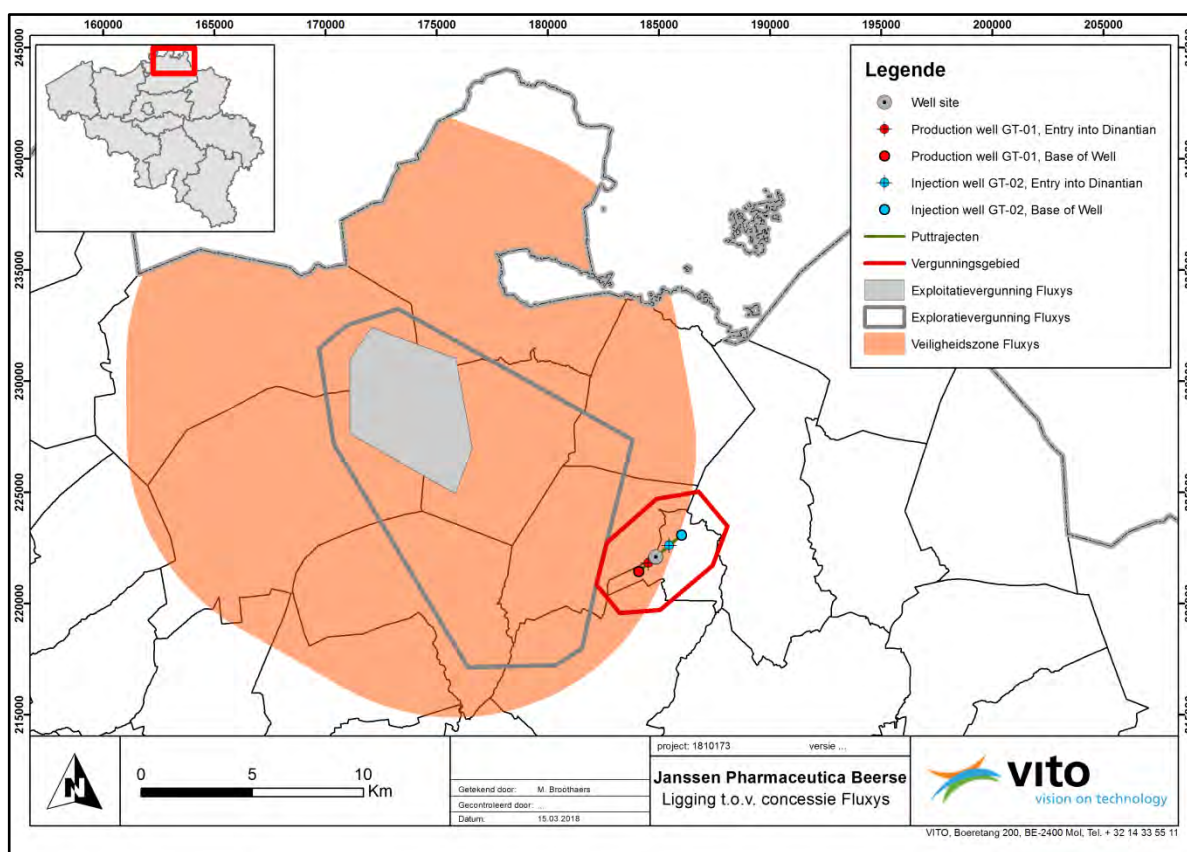
Figuur 12: Lithostratigrafische indeling van de gesteenten van het Devoon en Onder Carboon in Vlaanderen (Laenen, 2003).

4.2. KOOLWATERSTOF VOORKOMENS IN DE NABIJHEID VAN HET PROJECT

4.2.1. ONDERGRONDSE GASOPSLAG TE LOENHOUT

De locatie van het geplande doublet op de site in Beerse ligt buiten het opsporingsgebied voor de ondergrondse opslag van aardgas van Fluxys, maar valt nog wel net binnen de veiligheidszone rondom de opslag te Loenhout (Figuur 13). Het geothermisch doublet is gepland in permeabele zones² van de Kolenkalk Groep (Dinantiaan). In Loenhout exploiteert Fluxys een ondergrondse gasopslagsite. De opslag van het gas gebeurt eveneens in permeabele zones in de kalksteen-sequentie van het Dinantiaan. De afstand tussen beide locaties is in de orde van 14-15 km. De afstand tot putten DzH14 (KB202) en DzH18 (KB204), aan de zuidoostelijke rand van de gasopslag, ligt rond 10 km.

Gezien de mogelijke interferentie tussen beide activiteiten is na overleg tussen Janssen Pharmaceutica en Fluxys besloten om een reservoirmodel op te stellen om de effecten te simuleren. Naast publieke informatie werd hier ook gebruik gemaakt van vertrouwelijke informatie ter beschikking gesteld door Fluxys.



Figuur 13: Ligging van het doublet in Beerse ten opzichte van de concessies (exploitatie en exploratie) van Fluxys rond Loenhout.

Enerzijds is er gekeken naar de drukimpact als gevolg van de gasopslag rondom de opslagsite in Loenhout (Bos et al., 2015). Deze neemt af met de afstand tot de site. Anderzijds kan een theoretische impact berekend worden van het geothermisch doublet op de opslagsite, in functie van de

² De permeabele zones worden toegelicht in een volgend hoofdstuk (Hoofdstuk 7).

permeabiliteit, de dikte van het reservoir, het debiet, en de afstand van productie- en injectieput tot de opslagsite. Hoe meer de beide putten (productie en injectie) op dezelfde afstand liggen tot de gasopslag, hoe kleiner de netto impact van het doublet op de gasopslag (ze heffen elkaar dan op). Zolang de permeabiliteit meer dan circa 280 mD bedraagt (voor een reservoir van 50 m dikte) blijft de drukimpact van het doublet op de gasopslag beperkt tot minder dan 1 bar. Deze waarde ligt maar iets boven de minimum geschatte permeabiliteit. Indien de permeabiliteit (voor een netto dikte van 50 m) toch zo laag is, zal waarschijnlijk ook het debiet van het geothermisch doublet lager zijn.

De verschillende scenario's voor de simulaties zijn ook gebruikt om de drukimpact op de gasopslag site na te gaan. Bij de verschillende scenario's blijft de impact beperkt tot maximaal 0,5 bar, voor de meeste scenario's tot minder dan 0,2 bar (gemiddeld rond 0,12 bar).

Een meer gedetailleerde analyse werd gemaakt door Harcouët-Menou (2014) waarbij vertrouwelijke data aangeleverd door Fluxys zijn geïncorporeerd.

4.2.2. GEÏSOLEERDE GASVOORKOMENS BIJ KOOLLAGEN

Naast het voorkomen van opgelost gas in het formatiewater, kan in het slechtste geval vrij gas geïsoleerd voorkomen in verzadigde koollagen of aangrenzende zandsteenlagen. Hun voorkomen vormt een *worst-case* scenario en zou eerder beperkt zijn. In het geval vrij gas wordt aangeboord, zijn er procedures en installaties om op een veilige wijze hiermee om te gaan, zodat het boorproces nadien kan voortgezet worden (er wordt een BOP geplaatst bij aanvang van de tweede boorsectie, net voordat het Krijt wordt aangeboord).

HOOFDSTUK 5. BESCHIKBARE EN GEBRUIKTE PUTTEN EN SEISMISCHE DATA

5.1. KEUZE REFERENTIEPUTTEN EN PUT INFORMATIE

5.1.1. PUTTEN TOT IN DE KOLENKALK GROEP

De meest directe informatie over diepliggende gesteentelagen is beschikbaar uit diepe boringen. De boringen die voor deze studie het meest van belang zijn, zijn de putten die tenminste tot aan het Onder Carboon (Dinantiaan) zijn geboord (Figuur 14, Tabel 5). Deze leveren immers informatie over het gesteentepakket zelf, zoals diepte, dikte, of interne opbouw.

Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen twee categorieën: boringen die gebruikt zijn voor de interpretatie, correlatie en/of calibratie van de seismiek, en boringen die gebruikt zijn voor het afleiden van reservoirparameters.

Bij de boringen die gebruikt zijn bij de interpretatie van de seismiek en kartering zijn er vele die geboord zijn tot in het reservoir (Onder Carboon). Er zijn er 19 opgenomen in de lijst en op kaart, in de omgeving van Loenhout zijn er echter nog heel wat meer. Het Dinantiaan is aangeboord in een aantal boringen die niet al te ver (<20 km) van de onderzoekssite gelegen zijn. Dit betreft voornamelijk de boringen die geplaatst zijn om de Loenhout koepelstructuur te exploreren in functie van gasopslag. In die context is ook de boring Poederlee op een koepelstructuur geboord. Andere boringen tot in het Dinantiaan zijn de boringen Kessel en Booischot alsook een aantal geothermische exploratieboringen zoals Merksplas en Turnhout. Meer recent (2015-2018) zijn ook de putten in Mol tot in de Kolenkalk Groep geboord (Mol-GT-01 t/m -03). Uit deze nabije boringen is een goed beeld te herleiden van de gesteenten uit het Dinantiaan op de onderzoekslocatie van dit project. Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze boringen (19). Hierbij zijn slechts enkele putten (7) uit de omgeving Loenhout opgenomen waarvan relevante data publiek beschikbaar is of gebruikt in de studie rond de mogelijke interferentie met de gasopslag.

Daarnaast zijn de Onder Carboon carbonaatgesteenten ook aangeboord in verscheidene putten in Nederland (Figuur 15, Tabel 6). Dit is bijvoorbeeld het geval in Horst a/d Maas (CAL-GT-01 t/m -03), Woensdrecht-01, Kortgene-01, Brouwershavensegat-01, maar ook voor de kust (S5-1, S2-2 en O18-1). Sommige van deze boringen zijn echter al vrij ver (100 tot 200 km) van de onderzoekssite gelegen. Anderzijds is de boring in Rijsbergen (RSB-01) wel veel dichterbij gelegen en heeft deze relevante data opgeleverd voor het snelheidsmodel. Wat betreft dieptebereik en situering is de put CAL-GT-01 vergelijkbaar met de huidige opzet van het project.

De informatie uit putten CAL-GT-04 en -05 is nog niet publiek beschikbaar. De putten in het zuiden van Limburg (Geverik, Heugem, Kastanjelaan, Thermae, Gulpen) zijn niet gebruikt omwille van hun afstand tot de site. Er zijn dichterbij gelegen putten waaruit stratigrafische informatie kan gebruikt worden. En ook voor de reservoirkarakteristieken zijn er gegevens uit meer nabij gelegen putten beschikbaar.

Tabel 5: Overzicht van boringen in Vlaanderen die tot in de Kolenkalk Groep zijn geboord, met de diepte waarop deze is aangeboord en de diepte van de basis (of TD), in meter onder maaiveld. De putten in Mol waren ten tijde van het onderzoek nog niet geboord.

Boring	Locatie	Diepte top	Diepte basis (of TD)
KB38	Kessel	573	704 (TD)
KB86	Wijvenheide	1905	1912 (TD)
KB120	Turnhout	2174	2706 (TD)
KB127	Loksbergen	345	368 (TD)
KB128	Rillaar	166	372 (TD)
KB129 (He1)	Heibaart	1138	1452
KB131	Halen	608	1367 (TD)
KB132	Booischot	441	700
KB135 (DzH1)	Heibaart	1102	1399 (TD)
KB141 (DzH2)	Loenhout	1255	1354 (TD)
KB165	Merksplas	1643	1760 (TD)
KB170	Poederlee	1500 (TVD)	1617 (TVD, TD)
KB202 (DzH14)	Rijkevorsel	1320	1407 (TD)
KB203 (DzH15)	St-Lenaerts	1330	1390 (TD)
KB204 (DzH18)	Rijkevorsel	1325	1600 (TD)
KB210 (DzH26)	Oostmalle	1359	1480 (TD)
Mol-GT-01	Mol	3175	3610 (TD)
Mol-GT-02	Mol	3298 (TVD)	3830 (TVD, TD)
Mol-GT-03	Mol		

Tabel 6: Overzicht van boringen in Nederland die tot in de Kolenkalk Groep zijn geboord, met de diepte waarop deze is aangeboord en de diepte van de basis (of TD), in meter onder maaiveld.

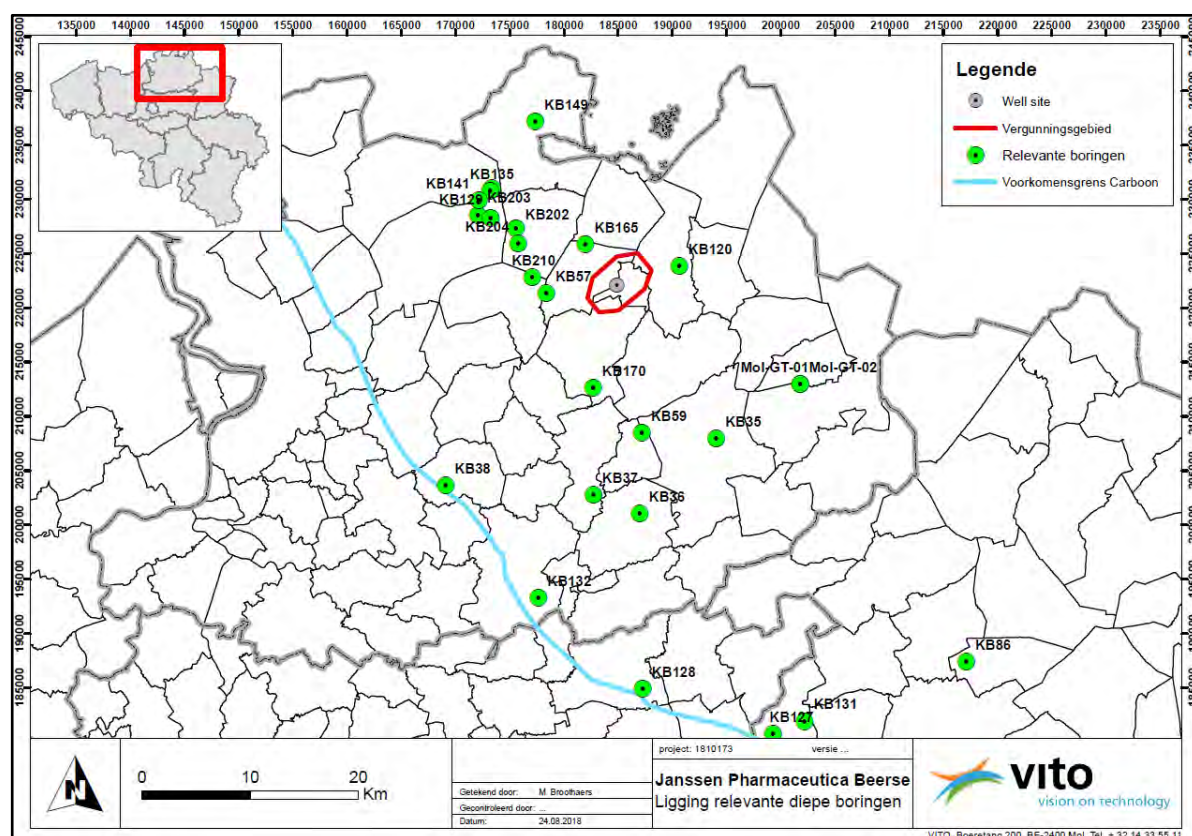
Boring	Locatie	Diepte top	Diepte basis (of TD)
O18-01	offshore	1584	2915
S02-02	offshore	1883	2835
S05-01	offshore	1187	1996
CAL-GT-01	Horst a/d Maast	1596	2106
CAL-GT-02	Horst a/d Maas	1341	1440
CAL-GT-03	Horst a/d Maas	1562	1966
BHG-01	Brouwershavense Gat	2153	2646
KTG-01	Kortgene	945	1043
WDR-01	Woensdrecht	1176	1205 (TD)

5.1.2. PUTTEN DIE DE KOLENKALK NIET BEREIKT HEBBEN

Er zijn echter nog meer boringen die enkel tot in het steenkoolterrein (Boven Carboon) zijn geboord. Vooral die boringen die nabij een van de (geïnterpreteerde) seismische lijnen gelegen zijn, zijn van belang. Ze worden hieronder opgelijst (Tabel 7).

Tabel 7: Overzicht van gebruikte boringen die niet tot in de Kolenkalk Groep zijn geboord, met locatie en diepte (m).

Boring	Locatie	Diepte
KB35	Geel	1244
KB36	Tongerlo	806
KB37	Noorderwijk	995
KB57	Vlimmeren	1028
KB59	Olen	936
KB149	Meer	2517
RSB-01	Rijsbergen (NL)	4645



Figuur 14: Boringen (in België) die geëvalueerd zijn voor deze studie. Ter indicatie is ook de zuidelijke voorkomsgrens van het Carboon weergegeven.

5.1.3. GEBRUIK VAN DE INFORMATIE UIT DE PUTTEN

De meeste van de hierboven opgenomen boringen zijn gebruikt in het kader van de interpretatie en correlatie van de seismische data. Een selectie ervan is ook relevant voor de interne opbouw van de Kolenkalk Groep. Voor de reservoirkarakteristieken zijn vooral de boringen van Halen, Heibaart, Merksplas, Poederlee, en Turnhout van belang. De put in Booischot levert informatie over de opbouw en samenstelling van de sequentie, maar er zijn geen puttestgegevens beschikbaar. Gegevens uit deze putten zijn in meer of mindere mate publiek beschikbaar of opgenomen in wetenschappelijke publicaties. Voor Mol-GT-01 zijn al enkele gegevens gepubliceerd (Bos & Laenen,

2017), ten tijde van het onderzoek waren beide putten in Mol echter nog niet geboord, ze zijn dan ook niet gebruikt in de kartering.

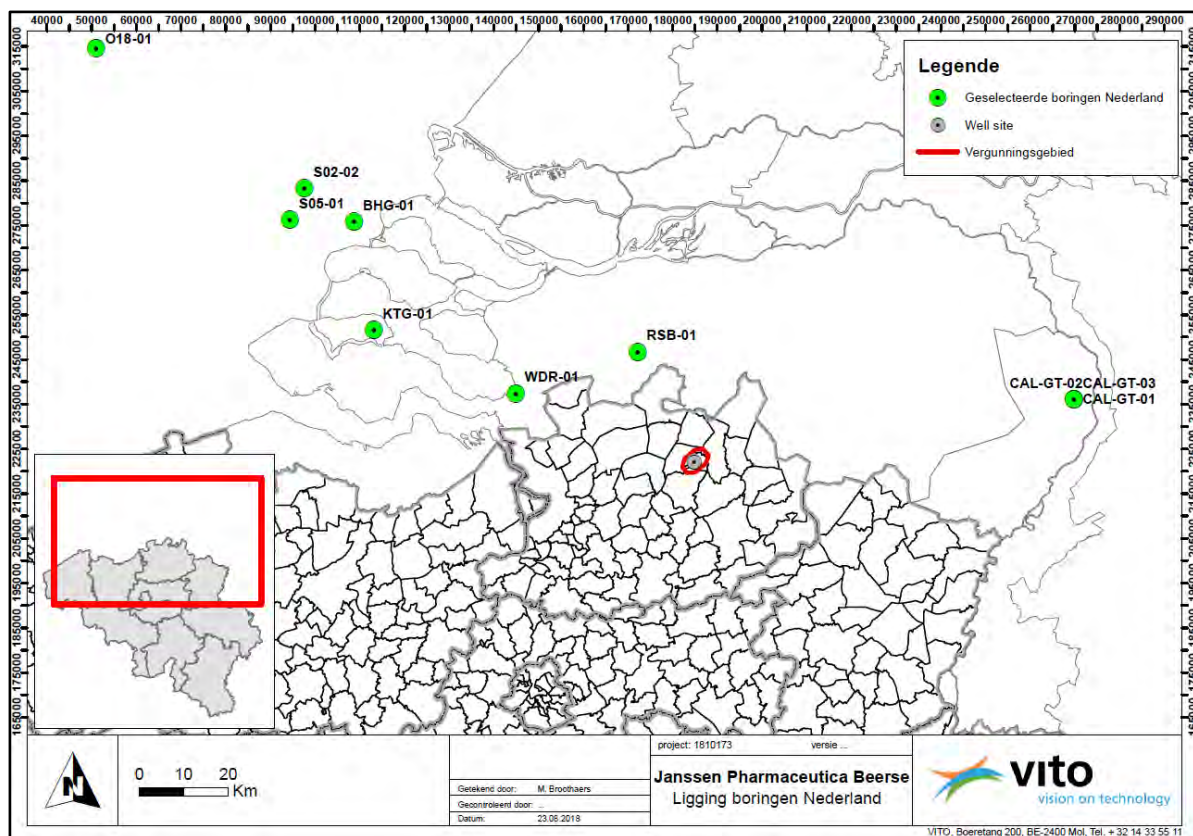
Uit de putten op (en nabij) de ondergrondse opslagsite voor aardgas (Loenhout) zijn redelijk weinig gegevens beschikbaar omwille van de vertrouwelijkheid van de data. Er zijn wel enkele publicaties die melding maken van o.a. permeabiliteit (Dusar & Lagrou, 2008; Lagrou & Dusar, 2003; Vandenberghe et al., 1986, 2000). Permeabiliteitsgegevens zijn ook gerapporteerd voor de boringen in Merksplas (Vandenberghe et al., 2000) en Poederlee (Laenen et al., 2005). Voor de putten in Halen en Turnhout (Gulinck, 1956) is slechts beperkte informatie beschikbaar over de permeabiliteit.

Temperatuurgegevens zijn beschikbaar (en gebruikt) uit de putten in Heibaart, Merksplas en Turnhout. Ook uit de put in Meer zijn temperatuurgegevens beschikbaar (Vandenberghe et al., 1988), ook al is deze put niet tot in het reservoir geboord.

Dezelfde auteurs vermelden ook informatie over de samenstelling van het water in deze putten, de reservoirdruk of de zonering van het reservoir.

Rekening houdend met de vertrouwelijkheid van de data uit Loenhout/Heibaart en met de afstand tot de putten weegt de informatie uit de putten van Merksplas en Turnhout het zwaarst door bij de evaluatie van de reservoir eigenschappen.

Een overzicht van de geëvalueerde boringen relatief ten opzichte van de onderzoekssite is gegeven in Figuur 14. Gebaseerd op de gegevens die uit deze boringen verkregen werden, is de globale geologische geschiedenis van het gebied rond Beerse te beschrijven. Deze beschrijving kon vervolgens door interpretatie van seismische lijnen in de omgeving meer gedetailleerd worden gemaakt voor de omgeving van de onderzoekssite.



Figuur 15: Boringen in Nederland die geëvalueerd zijn in deze studie.

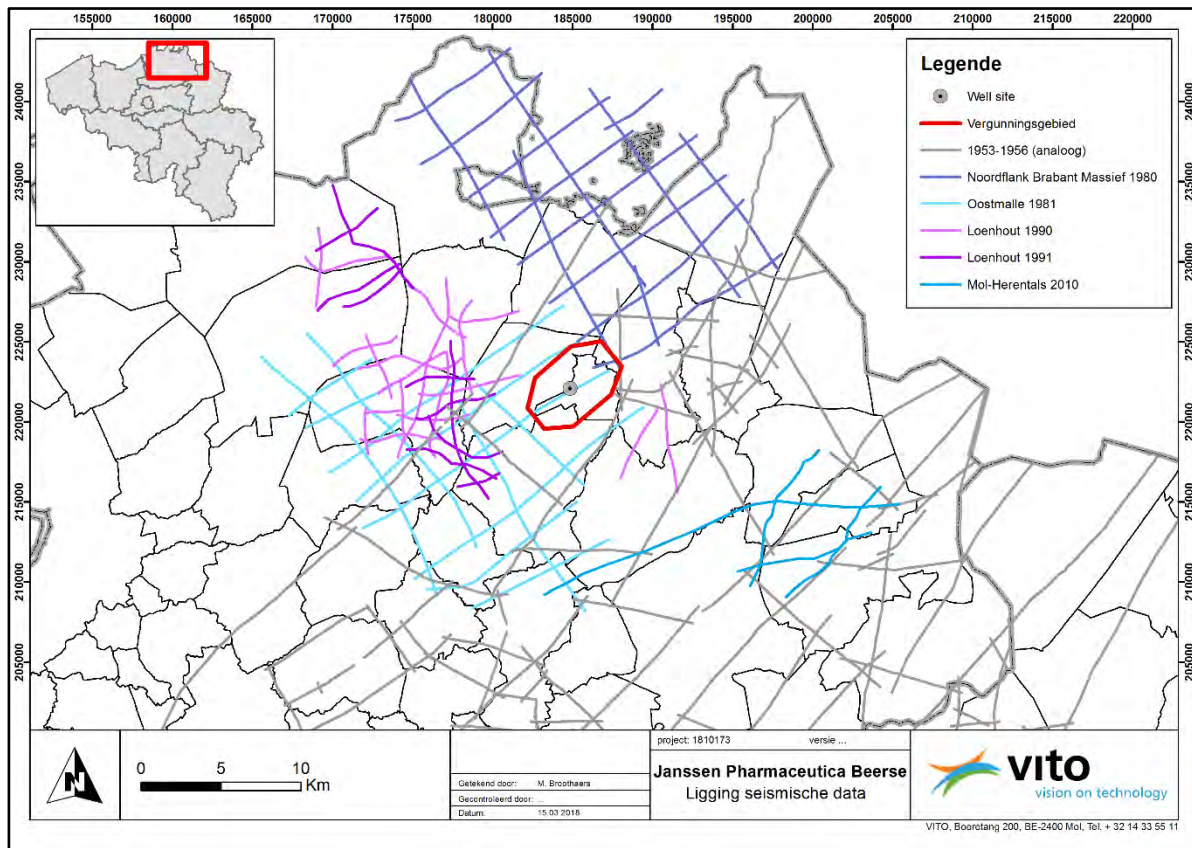
Om een beter beeld te krijgen van de lithologie van het Devoon worden naast de boringen in Vlaanderen (Heibaart 1/1bis en Booischot) ook een aantal boringen uit Nederland beschreven ter aanvulling. Hoewel deze boringen, zoals Kortgene-1, Brouwershavensegat-1, S5-1, S2-2 en O18-1, zeer ver (100 tot 200 km) ten noordwesten van de onderzoekssite gelegen zijn, zijn de Devoonlagen hier in een relatief vergelijkbaar milieu afgezet. In 2018 werd het Devoon ook nog aangeboord in Mol (Mol-GT-03). Het aantal boringen dat tot in het Siluur zijn geboord, is gering. De top van het Siluur is aangeboord in boringen Heibaart 1/1bis en Booischot, en de Nederlandse boring O18-1. Tevens is het bekend uit de boringen Doel, Kallo en Beersel.

5.2. SEISMISCHE GEGEVENS

Er zijn in de Kempen (provincies Antwerpen en Limburg) meerdere seismische campagnes uitgevoerd, voornamelijk in de jaren 1980, nadien ook nog enkele in de jaren 1990. In Limburg richtten deze campagnes zich vooral op de exploratie naar steenkoollagen, en meer bepaald hun verbreiding en diepte, en de verbreiding van de bovenliggende formaties. In Antwerpen was de exploratie vooral gericht op ondergrondse koepelstructuren zoals in Loenhout, die aangewend kunnen worden voor de ondergrondse opslag van aardgas.

In 1953 tot 1956 werden een hele reeks lijnen geschoten in de Kempen. Deze data waren op het moment van de haalbaarheidstudie in 2013 echter nog niet in digitaal formaat beschikbaar. In 1980 werd een seismische campagne geschoten ten noordoosten van Beerse, in de omgeving van Hoogstraten, Merksplas en Ravels. Ten zuidwesten van Beerse situeert zich de campagne Oostmalle 1981. In 1990 en 1991 werden nog campagnes geschoten in de omgeving van Rijkevorsel en Loenhout.

Figuur 16 geeft een overzicht van de seismische lijnen die er in de regio rond Beerse ter beschikking waren op het moment van de haalbaarheidstudie. Er zijn sindsdien nog data in digitale vorm beschikbaar gekomen. Een tabel met overzicht van de geraadpleegde seismische campagnes, hun aantal lijnen en totale lengte, is opgenomen in de bijlage.



Figuur 16: Kaart met de ligging van seismische lijnen in het gebied. Van de campagne 1953-1956 waren er initieel enkel data beschikbaar in analoge vorm, van de andere campagnes (blauw en paars) waren er reeds digitale data beschikbaar.

5.3. COÖRDINAATSYSTEEM

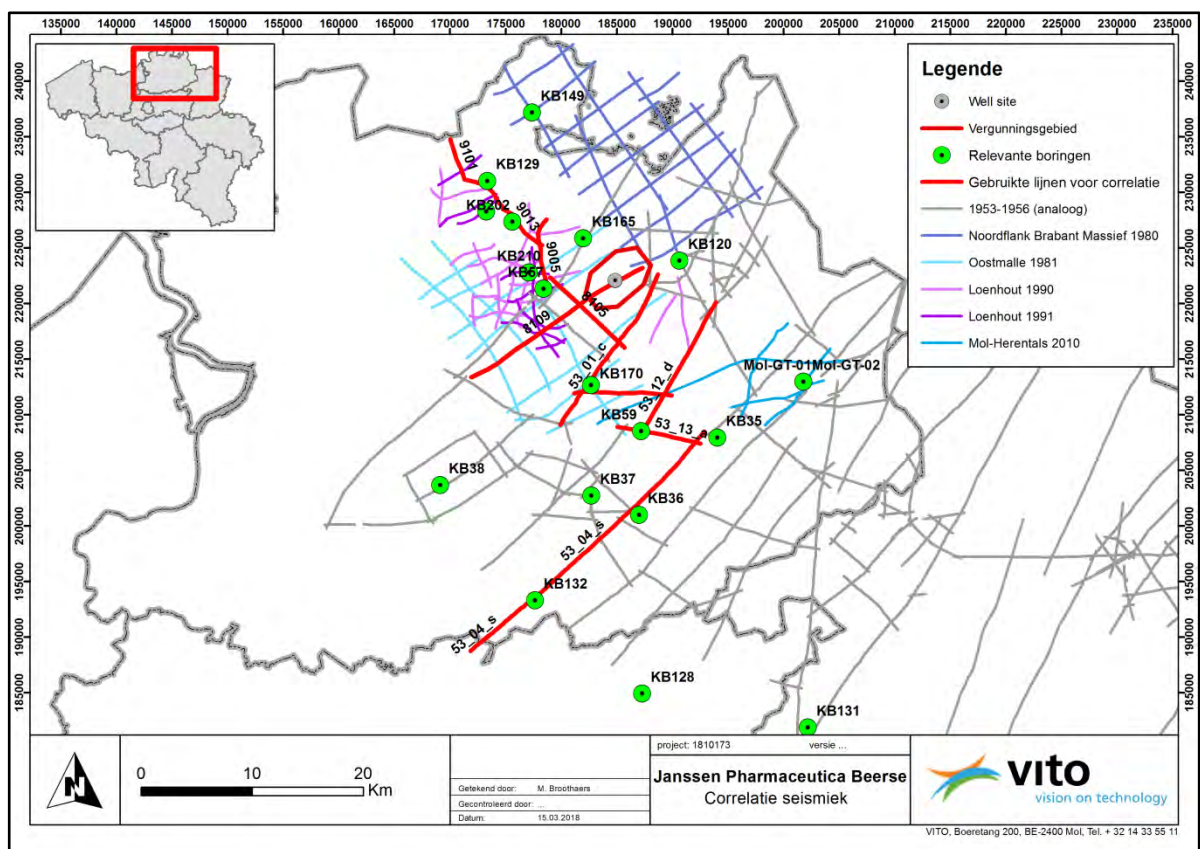
Alle informatie is weergegeven volgens het Belge Lambert 1972 coördinatensysteem.

HOOFDSTUK 6. SEISMISCHE INTERPRETATIE EN DIEPTEMODEL

6.1. METHODE BESCHRIJVING

De inschatting van de diepte van het reservoir is gebaseerd op de seismische data beschikbaar uit de nabije omgeving van de site. Zo ligt het traject van de seismische lijn 8109 uit de campagne van Oostmalle 1981 op slechts 1 km van de site.

De effectieve reflecties overeenkomend met de top van de geologische formaties dienen echter gevonden te worden vanuit correlaties met andere seismische lijnen en dienen uiteindelijk geïkt te zijn met boringen waar de ware dieptes afgelezen kunnen worden. Het interpretatiepatroon van de verschillende seismische campagnes is aangegeven in Figuur 17 in het rood. Interpretaties werden uitgevoerd vanuit de twee boringen met gekende stratigrafie over de volledige Carboon en Devoon-sequentie, i.e. boring Heibaart (KB129) en boring Booischot (KB132). Van daaruit werden de geologische formaties / reflecties vervolgd tot nabij de site in Beerse (zie Figuur 19).



Figuur 17: Geselecteerde lijnen voor de correlatie van boringen naar seismiek tot aan de site van Beerse.

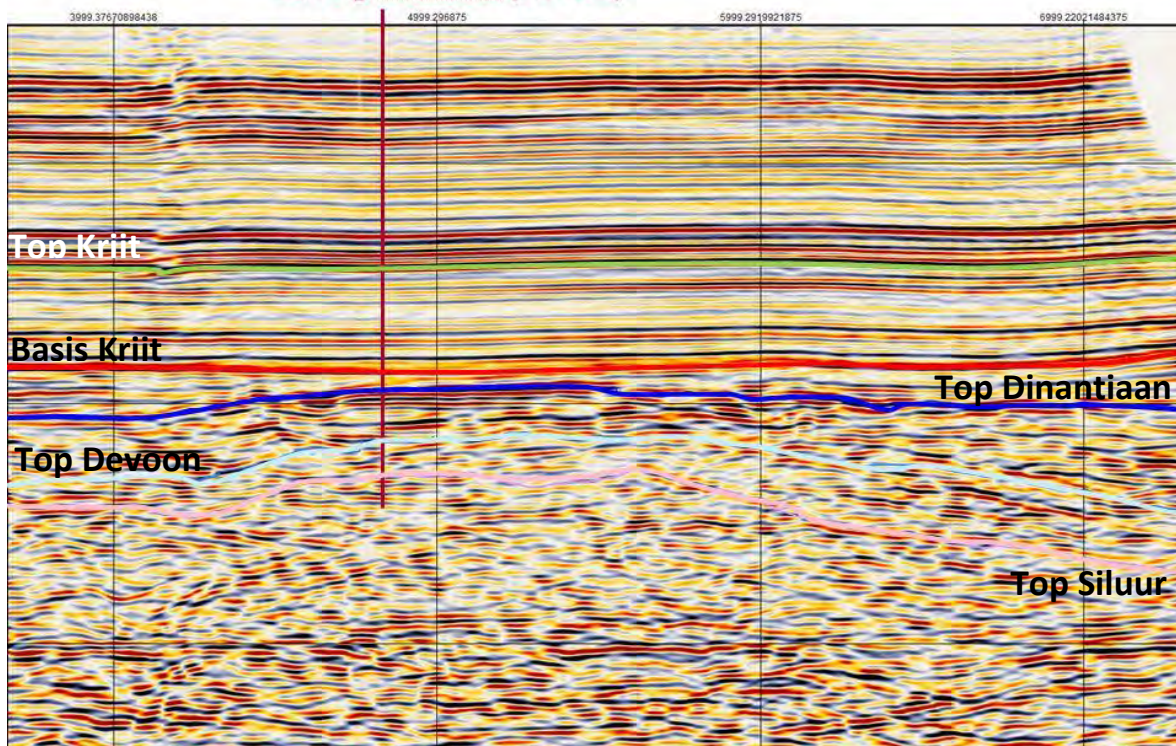
In een eerste fase (haalbaarheidsstudie – Bos & Eggenkamp, 2013) gebeurden interpretaties deels met een softwarepakket (OpendTect) op die lijnen die in een digitaal formaat beschikbaar waren (surveys 81, 90 en 91). De campagne van 1953 was ondanks een reprocessing in 1991 niet in een

digitaal formaat beschikbaar en is bijgevolg enkel op papieren secties geïnterpreteerd. Informatie over de dieptes van seismische reflecties werden meegenomen op snijpunten van deze lijnen uit 1953 met de lijnen uit de campagne van 1981. Voor de interpretatie vanuit boring Heibaart 1 (KB129, Figuur 17) werd een composietlijn gemaakt van meerdere seismische lijnen om een volledig beeld van de voornoemde put tot op de locatie te Beerse te bekomen.

In een tweede fase (Bos et al., 2015), in het kader van het bestuderen van interferentie tussen het geothermisch doublet en de ondergrondse gasopslag te Loenhout, werd de interpretatie van de data gecombineerd met nieuwe interpretaties op basis van seismische data aangeleverd door Fluxys.

Lijn 9101

Boring Heibaart (KB129)



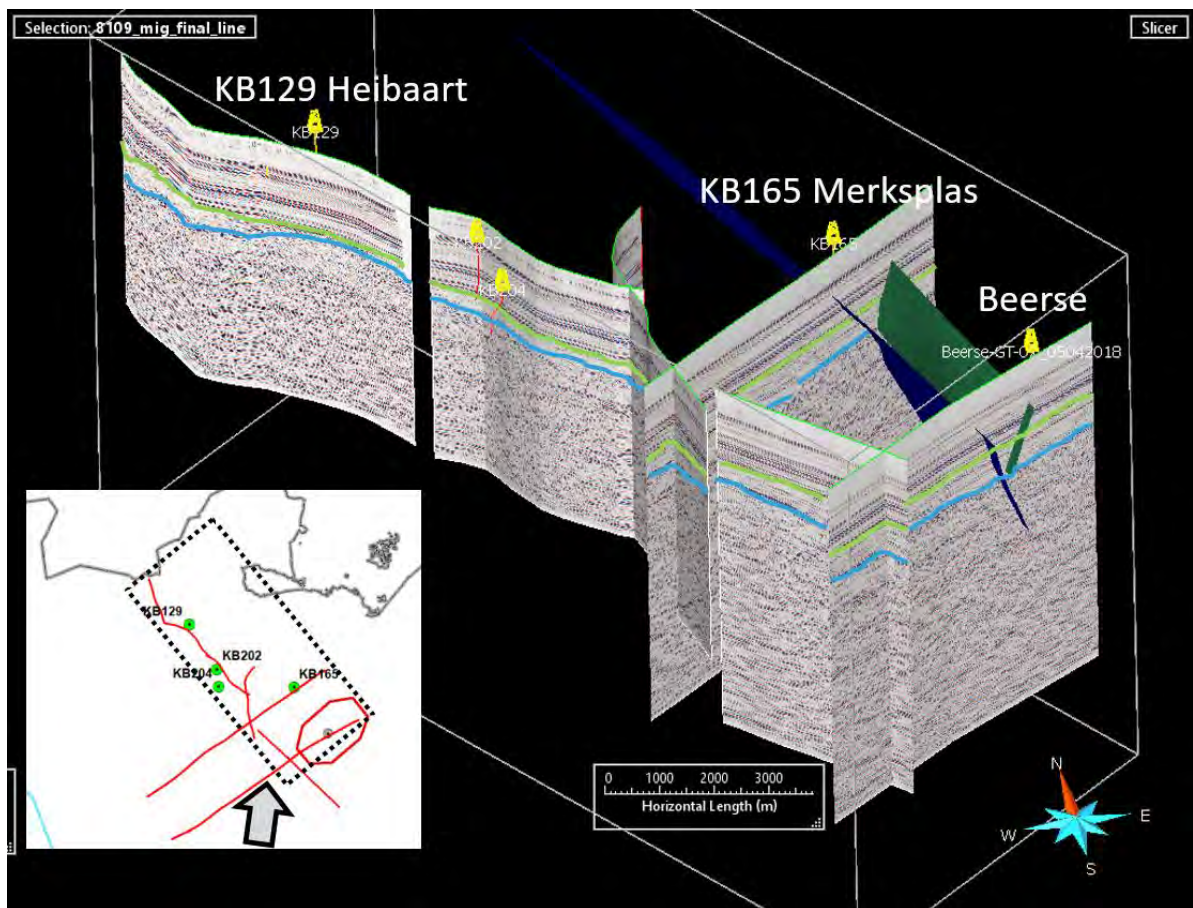
Figuur 18: Interpretatie van de lijn 9101 waarbij de boring Heibaart (KB129) geprojecteerd is in het vlak. Van boven naar onder worden volgende stratigrafische horizonnen geïnterpreteerd: top Krijt (groen), basis Krijt (rood), top Dinantiaan (donkerblauw), top Devoon (lichtblauw) en top Siluur (roze).

6.2. ADDITIONELE GEGEVENS

Niet van toepassing

6.3. WELL TO SEISMIC TIES

Reeds opgenomen in 6.1 Methode beschrijving.



Figuur 19: Correlatie van de basis Krijt (groen) en top Kolenkalk Groep (blauw) van de omgeving van Loenhout (linksboven) tot Beerse (rechts). De vlakken van de Kasterlee breukzone zijn eveneens weergegeven. De interpretatie illustreert de beperkte dikte van het Boven Carboon op het hoog van Heibaart en het wegduiken van de top van de Kolenkalk Groep naar Beerse toe. De kaart geeft de ligging van de uitsnijding en de kijkrichting aan.

6.4. SEISMISCHE INTERPRETATIE

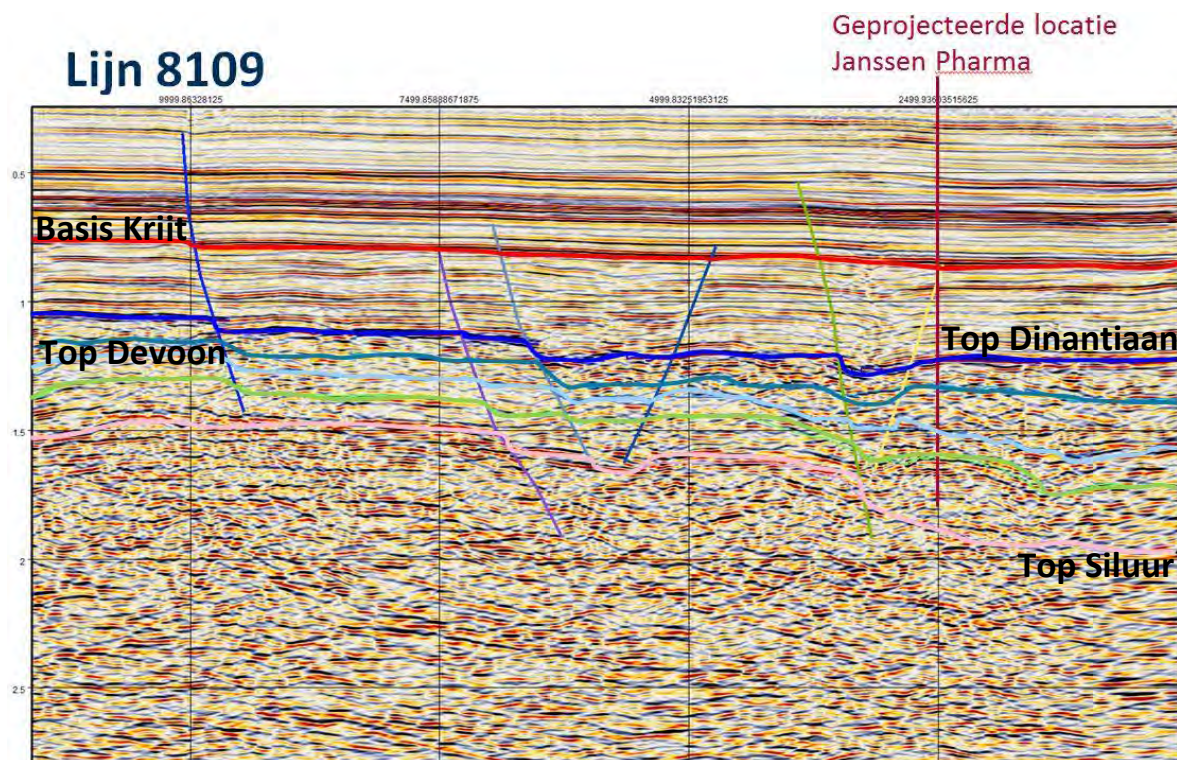
De basis van het Krijt (top van het steenkoolterrein) ligt in de omgeving op een diepte van minder dan 1000 m. Daaronder beginnen de formaties van het Boven Carboon.

De seismische data geven aan dat de top van het Dinantiaan zich in de regio op een diepte van 1500 tot 2000 m onder maaiveld bevindt. Deze diepte neemt zowel toe in oostelijke als in zuidelijke richting. Naar het westen (en zuidwesten) toe komt het pakket ondieper te liggen, zoals aangetoond door de boringen in de omgeving van Loenhout (en Poederlee).

Bovenop de regionale trend tonen de seismische data ook een aantal plotse veranderingen qua diepte. De lagen van het Carboon worden doorsneden door een reeks NW-SE gerichte breuken. Langsheen deze breuken verspringen de formaties en neemt de diepte plots toe (of af).

Net ten westen van de onderzoekssite te Beerse is een breukzone gelegen (Figuur 20). Deze breukzone heeft een normale, oostgerichte component met een Paleozoïsche oorsprong. Deze breuk heeft ervoor gezorgd dat de top Devoon en top Siluur een grotere diepte hebben ter hoogte van de onderzoekssite in vergelijking met ten westen van de breukzone. De top van het Dinantiaan kent een minder grote sprong.

Naast de oostgerichte breuk is er een antithetische (westgerichte) breuk die wel een sterker effect heeft op de intra-Dinantiaanhorizonts.



Figuur 20: Interpretatie van seismische lijn 8109 (campagne Oostmalle 1981) waarbij de locatie van Janssen Pharmaceutica geprojecteerd is in het vlak. Van boven naar onder worden volgende stratigrafische horizonts teruggevonden: basis Krijt (rood), top Dinantiaan (donkerblauw), mogelijke top Steentje-Turnhout Fm (blauwgroen), top Devoon (lichtblauw), mogelijke top Heibaart Fm (lichtgroen) en top Siluur (roze). Bovendien worden duidelijke breukzones aangegeven. Merk op dat de schaal verschilt van Figuur 18.

6.5. GRIDDING ALGORITME

De seismische data geven telkens informatie langs een bepaalde profiellijn. Om van de verschillende seismische lijnen naar een kaart te gaan (waarbij voor elk punt op de kaart een waarde bepaald is), moet er geïnterpoleerd worden tussen de datapunten. Hiervoor is binnen de GOCAD software de DSI (*Discrete Smooth Interpolation*) techniek gebruikt. De interpolatie houdt ook rekening met het feit dat er breuken zijn. Datapunten aan de ene zijde van een breuk worden niet gebruikt voor het berekenen van een waarde op een punt aan de andere kant van dezelfde breuk.

6.6. TIJD-DIEPTE CONVERSIE

De seismische data geven in feite aan hoeveel tijd een akoestische golf nodig heeft om vanaf de bron (vanaf maaiveld) naar beneden te migreren tot aan een bepaalde geologische grens en weer terug naar boven. Deze tijd heen-en-terug (*two way travel time*) wordt aangeduid op de verticale as van de seismische profielen. Om de profielen te interpreteren in een diepte in meter moeten de data omgezet worden. Hierbij is kennis nodig over de voortplantingssnelheid van de akoestische golven in het gesteente.

Tabel 8: Overzicht van de gebruikte snelheidswaarden voor inschatting van de diepte, met omzetting van tijdswaarde (TWT in ms) naar diepte (in m onder TAW).

Horizon	Formatie(s)	TWT (ms)	Snelheid (m/s)	Diepte (m)
Top Krijt		650		620
	Maastricht, Gulpen, Vaals		3200	
Basis Krijt		850		940
	Floriffoux & Ransart		3800	
Top Namuriaan		970		1170
	Andenne & Chokier		4200	
Top Dinantiaan		1220		1700
	Loenhout & Velp		5500	
Intra Dinantiaan		1330		2000
	Steentje-Turnhout & Vesder?		5500	
Top Devoon		1500		2470
	Evieux & Lambermont		4200	
Intra Devoon		1635		2750
	Heibaart & Booischot?		6000	
Top Siluur		1880		3500

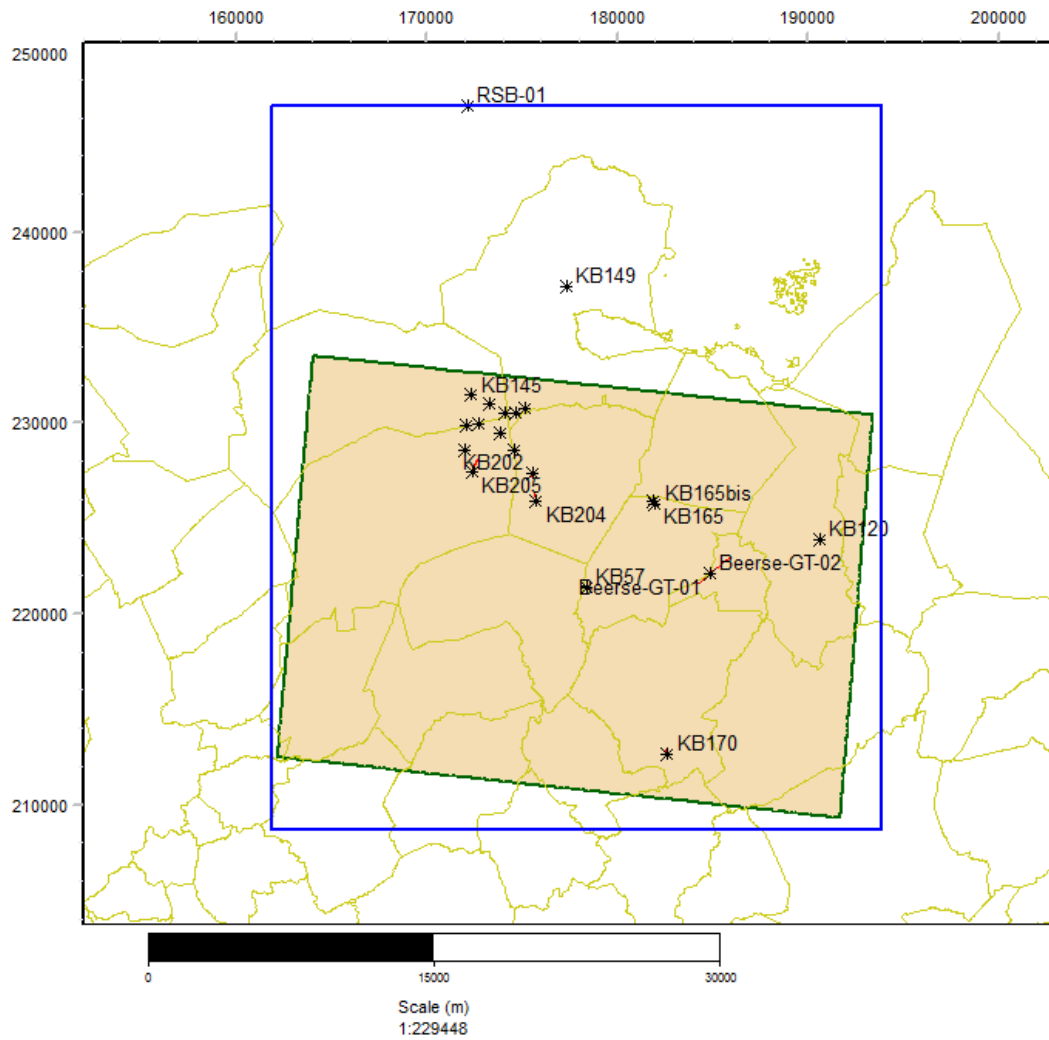
6.6.1. EERSTE INSCHATTING

In eerste instantie werd een eenvoudig snelheidsmodel gebruikt om de conversie van tijd (op de seismische data) naar diepte (in meter) uit te voeren. Hierbij werd aan elk pakket een akoestische snelheid toegekend, op basis van metingen in boringen in de regio. Onderstaande tabel geeft de gebruikte snelheidswaarden weer. Deze waarden zijn gebaseerd op de VSP metingen (*Vertical Seismic Profiling*) uitgevoerd in de boring van Merksplas (KB165) voor de geologische intervals tot en met de Loenhout Formatie. Voor de dieperliggende pakketten werd een geschatte waarde gehanteerd op basis van de dominante lithologie.

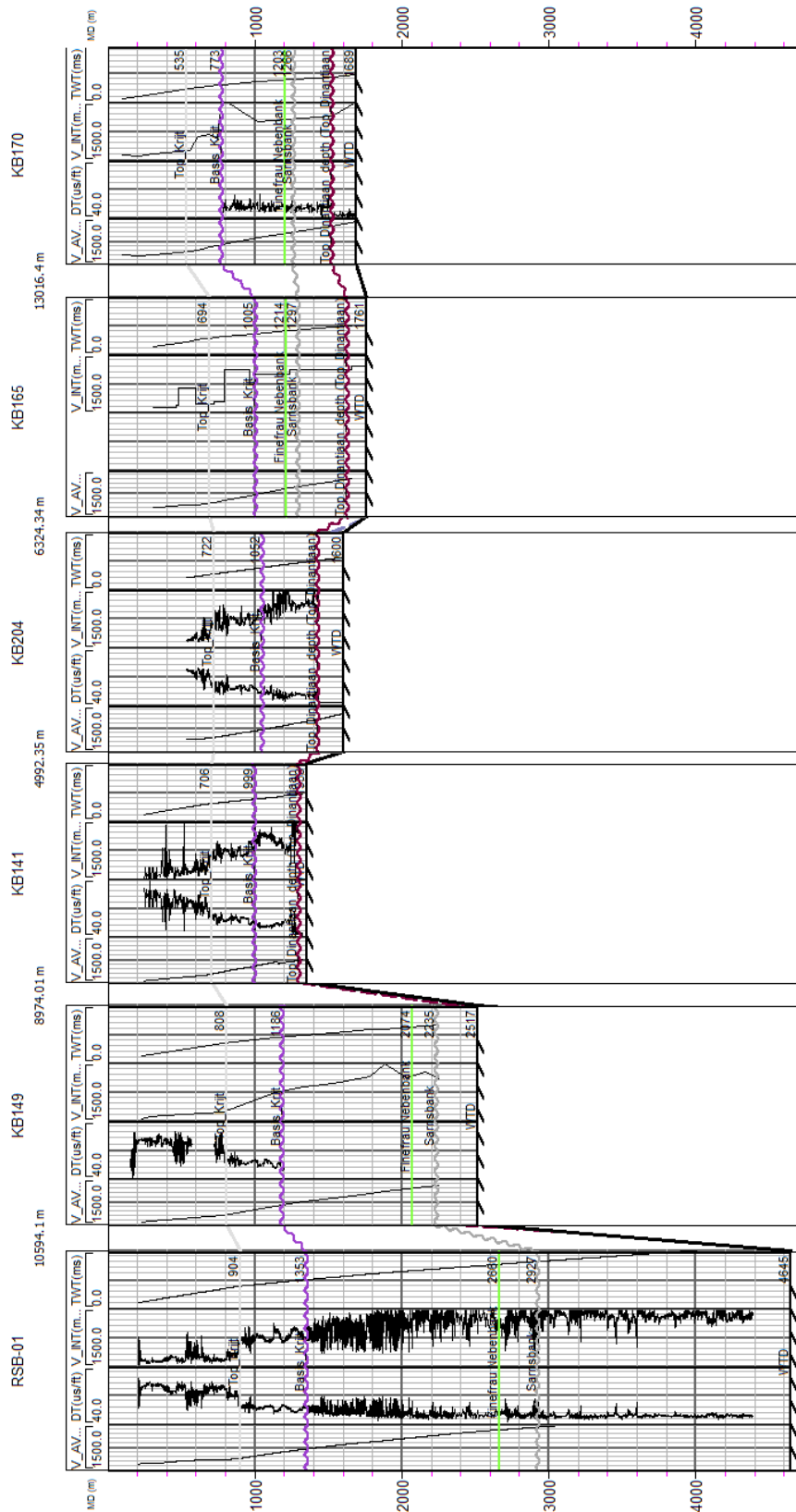
De onzekerheid op de conversie en op de bekomen diepteinschatting was echter nog aanzienlijk.

6.6.2. 3D SNELHEIDSMODEL

In tweede instantie (Bos et al., 2015) werd een 3D snelheidsmodel opgesteld. Dit model is gebaseerd op gegevens uit 6 putten in de omgeving van Beerse waarvoor akoestische snelheidsdata beschikbaar zijn. In Figuur 22 zijn de meetresultaten voor deze 6 putten weergegeven in een correlatiediagramma.



Figuur 21: Overzichtskaart met aanduiding van de grenzen van het snelheidsmodel (blauw) en van het structureel model (groen).



Figuur 22: Correlatiepaneel met 6 putten waaruit informatie beschikbaar is over de akoestische snelheid op basis van geofysische boorgatmetingen en die gebruikt zijn bij het opstellen van het snelheidsmodel.

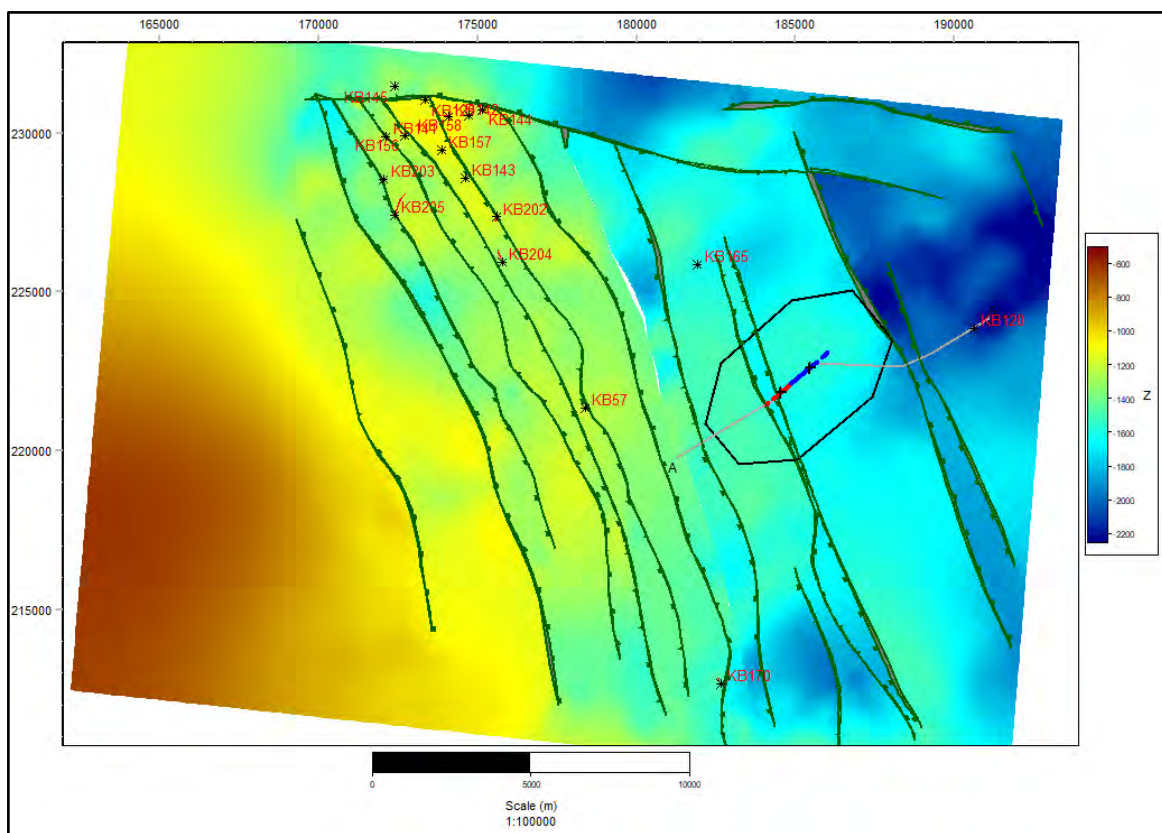
Het snelheidsmodel is verder gekalibreerd aan alle putten die dicht bij de seismische lijnen zijn gelegen (en waar de top en/of basis van het Dinantiaan werd bereikt). Het finale snelheidsmodel vertoont zowel verticale variaties van de akoestische snelheid (met de diepte) als laterale veranderingen.

Het snelheidsmodel is over een groter gebied opgesteld dan het structurele model (Figuur 21). Dit komt omdat er in het snelheidsmodel informatie is opgenomen uit verderaf gelegen boringen (bijvoorbeeld RSB-01), terwijl die gebieden geen impact hebben op de reservoirsimulaties voor het geothermisch doublet in Beerse.

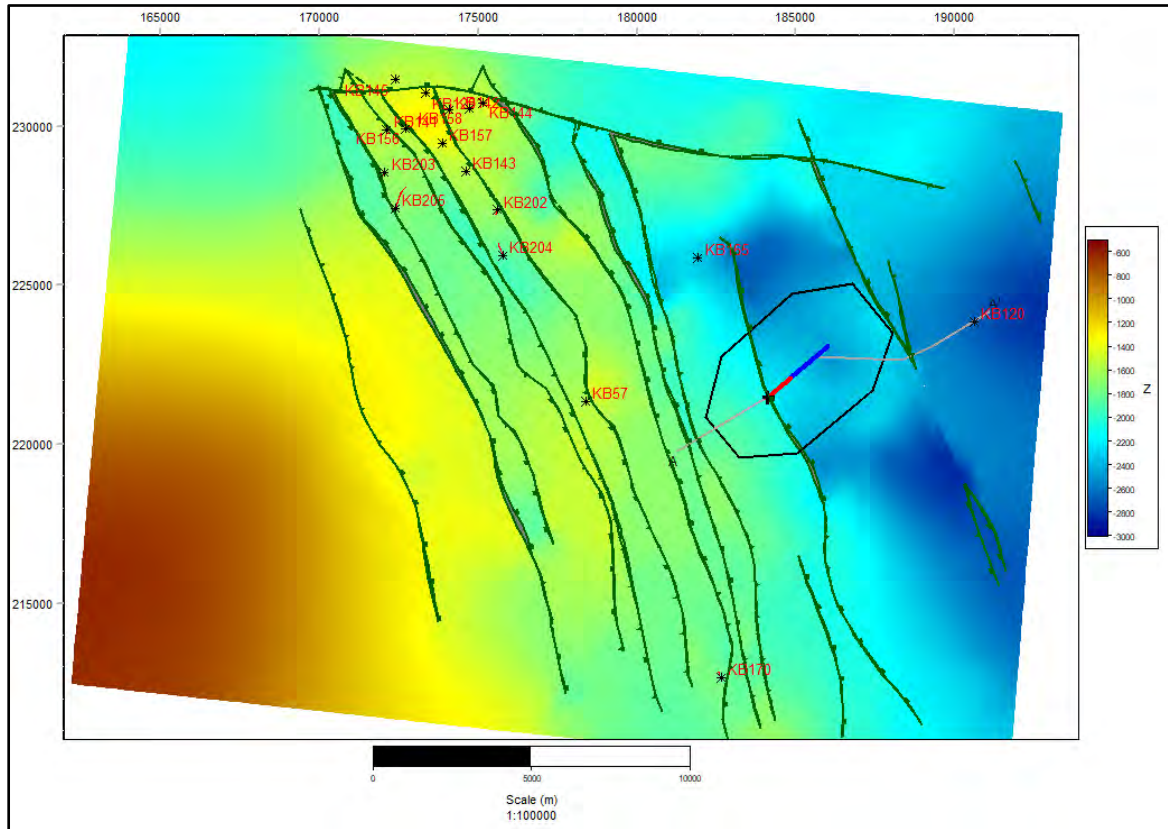
6.7. DIEPTEKAART VAN TOP & BASIS AQUIFER

Er is een dieptekaart opgesteld voor de top en voor de basis van het Dinantiaan. De top van de Kolenkalk Groep vertoont een verdieping naar het noordoosten, geaccentueerd door een reeks NW-SE georiënteerde breuken (Figuur 23). De diepte neemt toe van minder dan 1000 m in het zuidwesten, naar meer dan 2000 m in de omgeving van Turnhout.

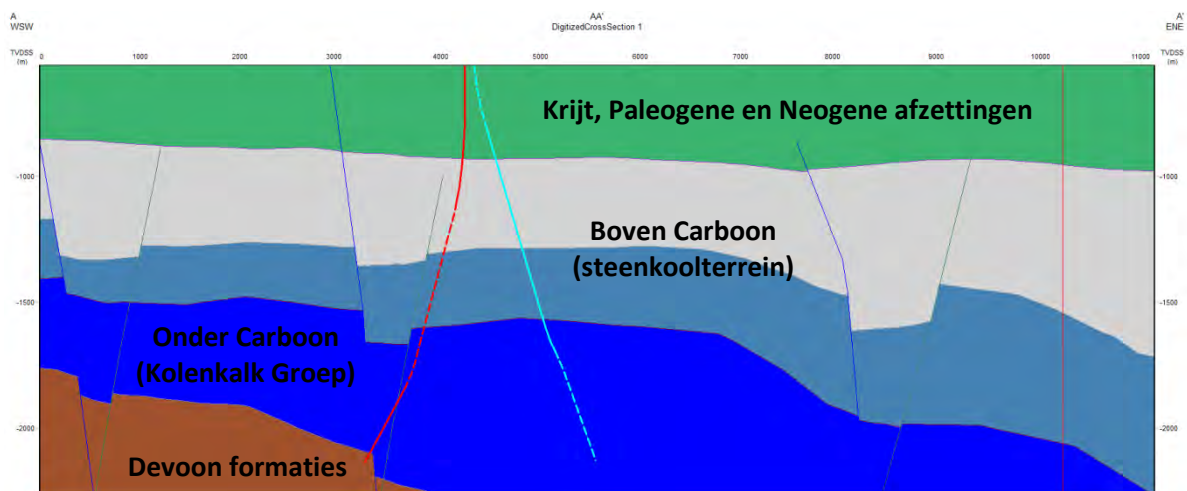
Dezelfde verdieping, met breuksprongen, is te zien op de kaart van de diepte van de basis van de Kolenkalk Groep (Figuur 24).



Figuur 23: Dieptekaart van de top van de Kolenkalk Groep, met aanduiding van het vergunningsgebied, de locatie en trajecten van de putten. De grijze lijn geeft de ligging aan van het profiel in Figuur 25. De zuidwestelijke (tot westelijke) zone is niet betrouwbaar vanwege extrapolatie.



Figuur 24: Dieptekaart van de basis van de Kolenkalk Groep, met aanduiding van het vergunningsgebied, de locatie en trajecten van de putten. De grijze lijn geeft de ligging aan van het profiel in Figuur 25. De zuidwestelijke (tot westelijke) zone is niet betrouwbaar vanwege extrapolatie.



Figuur 25: SW-NE georiënteerd profiel over de putten (Beerse GT-01 in rood, Beerse GT-02 in blauw) en tot aan de boring van Turnhout (KB120, verticale rode lijn rechts). De ligging van het profiel is weergegeven op kaart in Figuur 23.

6.8. DISCUSSIE VAN ONZEKERHEID IN TOP & BASIS AQUIFERKAART

6.8.1. TOP & BASIS VAN HET PAKKET

Na de eerste interpretatie en interpolatie wordt er een aanpassing gedaan door het model te kalibreren aan de boorgegevens. Uit de boringen is immers de werkelijke diepte van bepaalde geologische formaties gekend. Dit geeft een idee van de initiële onzekerheid in het model. Een overzicht hiervan is weergegeven in Tabel 9.

De grootste onzekerheid blijft er op de basis van de Kolenkalk Groep (top Devoon). De basis is immers nog maar op twee plaatsen in de Kempen aangeboord. Op sommige seismische lijnen is de basis te interpreteren (bijvoorbeeld ten westen van de site), op andere lijnen is er echter onduidelijkheid. Er zijn soms twee verschillende interpretaties mogelijk (Figuur 26). De diepte kan variëren tussen 2100 en 2400 m onder TAW. Hierdoor is er ook onzekerheid over de dikte van de Kolenkalk Groep.

Tabel 9: Berekende verschillen (in meter) tussen de gemodelleerde horizons en de boorgegevens. Waar een bepaalde horizon niet is aangeboord wordt dit aangeduid met N/A.

Boring	Basis Krijt	Basis Westfaliaan	Top Kolenkalk Groep	Basis Kolenkalk Groep
KB120 (Turnhout)	-5.37	-43.85	1.83	N/A
KB129 (Heibaart)	65.70	N/A	-4.72	-14.01
KB141 (Loenhout)	-1.56	N/A	14.65	N/A
KB165 (Merksplas)	1.22	-13.26	-32.16	N/A
KB170 (Poederlee)	17.05	11.08	3.89	N/A
KB204 (Rijkevorsel)	9.85	N/A	-61.70	N/A
KB57 (Vlimmeren)	2.76	N/A	N/A	N/A

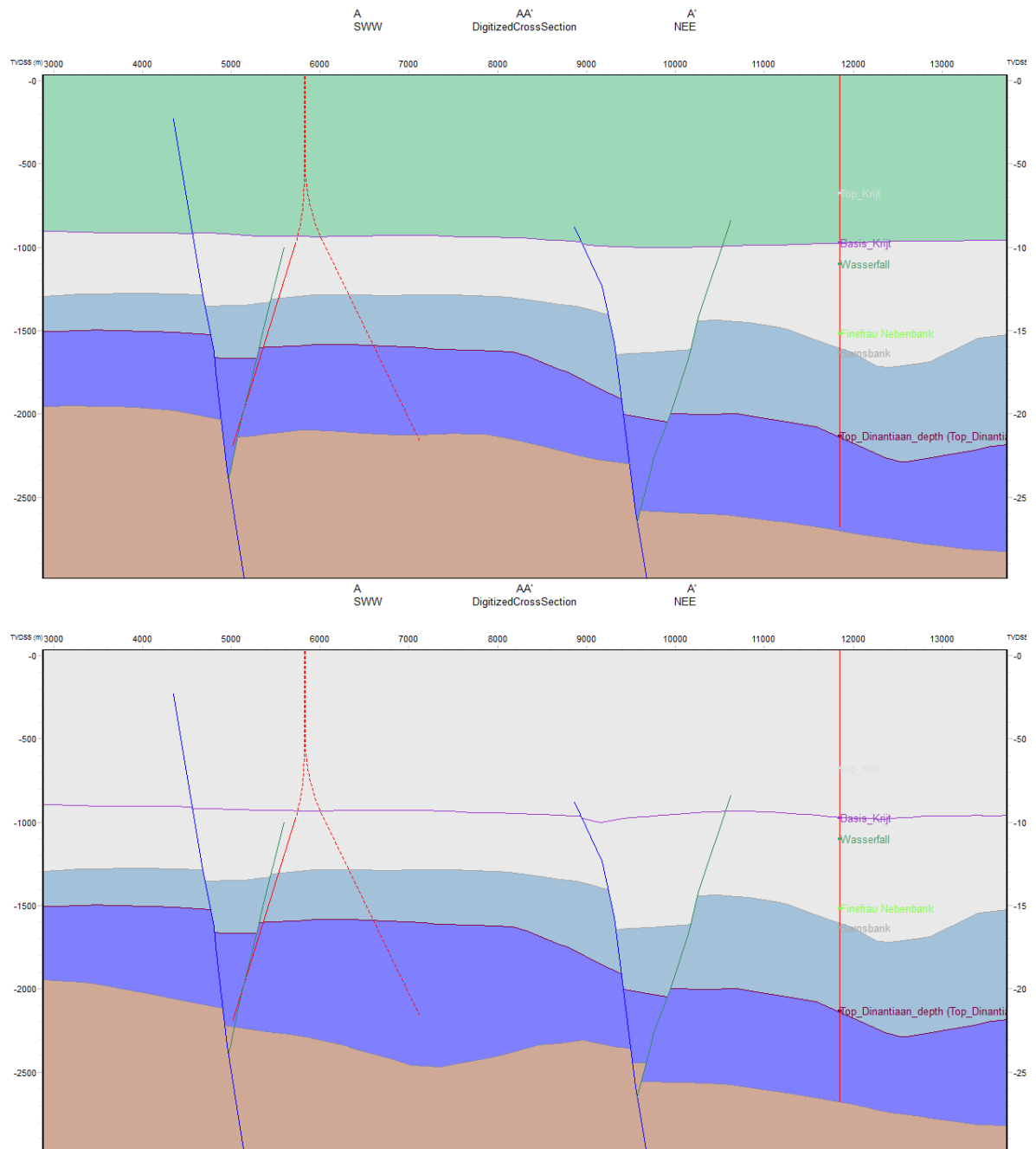
6.8.2. DIKTE VAN DE SEQUENTIE

Weinig boringen in de omgeving hebben de volledige sequentie van het Onder Carboon aangeboord, de meeste boring zijn in de kalksteen of dolomiet gestopt. Enkel de putten in Heibaart (KB129) en Booischot (KB132) hebben de basis bereikt³. De dikte van het interval verschilt aanmerkelijk tussen beide locaties: 260 m in Booischot, 315 m in Heibaart. De boring in Heibaart situeert zich echter op een hoog, terwijl die in Booischot zich aan de zuidelijke rand van het bekken bevindt, waar het bovenste deel van de sequentie is geërodeerd onder de basis van het Krijt (en dus niet compleet is). In de andere putten is niet de volledige sequentie aangeboord. In de meest nabij gelegen put in Merksplas (KB165) werd de boring gestaakt na 120 m in het pakket. Ook in Poederlee (KB170) is slechts een beperkt stuk doorboord.

Op basis van enkele andere boringen kan de dikte echter hoger oplopen, tot meer dan 500 m in Turnhout (KB120) en meer dan 700 m in Halen (KB131). De boring in Halen ligt echter al op ruime afstand in het zuiden van het bekken, waar de sedimentatiegeschiedenis verschillend was.

³ Recent is ook in Mol (Mol-GT-03) tot in het Devoon doorgeboord. Deze put ligt echter ook al op aanzienlijke afstand en in een andere context.

Op basis van de seismiek is de dikte niet helemaal zeker, er zijn immers verschillende interpretaties mogelijk voor de basis van het pakket. De dikte ligt waarschijnlijk in de orde van 500 m. Er is echter een alternatieve interpretatie waarbij de basis van het pakket dieper ligt en de dikte in Beerse toeneemt tot circa 800 m. Deze onzekerheid lijkt echter vooral beperkt tot dit breukblok (en dan vooral voor de omgeving van de injectieput).



Figuur 26: Profiel doorheen het geologisch model waarin de onzekerheid voor de basis van de Kolenkalk Groep wordt weergegeven. Bovenaan is de meest waarschijnlijke interpretatie weergegeven, de dikte van het pakket ligt hierbij rond 500 m. In het profiel onderaan is een alternatieve interpretatie weergegeven waarbij de basis dieper ligt (en de dikte dus groter is). Beide opties zijn te correleren met de boring in Turnhout (KB120, rechts). Merk op dat deze figuur dateert van 2015 en dat de getoonde puttrajecten (linkerhelft) daardoor verschillen van de finale trajecten.

Buiten de alternatieve interpretatie van de seismiek zijn er geen andere aanwijzingen dat het pakket in de omgeving van Beerse net dikker zou zijn. De ligging en setting van Halen (KB131) is immers niet vergelijkbaar. De boring van Turnhout ligt net iets dieper in het bekken dan Beerse, zodat in Beerse een iets kleinere dikte te verwachten is. Vandaar dat rekening gehouden wordt met een dikte variërend tussen 450 en 550 m.

HOOFDSTUK 7. MODEL EN KARAKTERISERING VAN DE AQUIFER

7.1. STRATIGRAFISCHE CORRELATIE EN LATERALE DIKTEVARIATIE VAN DE AQUIFER

Het project mikt op permeabele zones in de kalksteen- en dolomietsequentie van het Onder Carboon (Kolenkalk Groep) tot in de top van het onderliggende Devoon. Meerdere boringen in de regio (Bekken van de Kempen) hebben het voorkomen van permeabele gesteenten in dit interval aangetoond.

We bespreken eerst welk soort data er beschikbaar zijn rond de reservoirkarakteristieken van de Kolenkalk Groep in de Kempen. Vervolgens bekijken we hoe die zijn geïnterpreteerd. Tenslotte formuleren we de verwachtingen (concept) voor het reservoir voor de ondergrond in Beerse. Hierbij halen we ook inzichten aan afkomstig uit de modellen en simulaties gemaakt voor de temperatuursinschatting (Hoofdstuk 8).

7.1.1. BESCHIKBARE INFORMATIE

De Dinantiaan sequentie bestaat grotendeels uit massieve kalksteen en dolomiet. Op zich hebben deze gesteenten een erg lage porositeit en permeabiliteit (matrix). Het gaat hier om waarden bepaald door middel van metingen in het labo, waarbij een klein stuk gesteente (uit een boorkern) wordt getest. Deze kernmetingen zijn uitgevoerd op gesteentemateriaal uit meerdere boringen zoals in KB170 Poederlee (Laenen et al., 2005), maar ook in Nederland (Kastanjelaan-01, Kortgene-01, S05-01, O18-01). De kernmetingen wijzen doorgaans op een porositeit van amper 1%, en een permeabiliteit van minder dan 1 mD. Dikwijls kan zelfs geen waarde bepaald worden ($< 0,01$ mD).

De kernmetingen zijn echter enkel representatief voor de schaal van het geanalyseerde monster, wat doorgaans slechts enkele cm^3 bedraagt. Andere metingen geven aan dat deze kleine schaal (matrix van het gesteente) niet representatief is voor het gedrag van het gesteente op grotere schaal (meter tot kilometer). Op reservoirschaal is er immers wel een significante permeabiliteit.

Zo hebben pomptesten (productie of injectie) in meerdere putten in de regio het voorkomen aangetoond van (zeer) permeabele zones binnen de Kolenkalk Groep. Deze zones komen vaak voor kort onder de top van het interval, maar ze worden ook dieper aangetroffen (Lagrou & Duser, 2003). Enkele putten waar de permeabele zones zijn aangeboord zijn o.a. die van Heibaart (KB129), Poederlee (KB170), Merksplas (KB165), Turnhout (KB120), Halen (KB131). De put in Heibaart behoort tot een hele reeks boringen in de omgeving van Loenhout en leidde tot de ontwikkeling van een ondergrondse gasopslagsite in de kalksteen van het Onder Carboon.

7.1.2. OORSPRONG VAN DE PERMEABILITEIT

Er zijn meerdere processen die ervoor kunnen zorgen dat het gesteente op grotere schaal toch meer permeabel is.

Een eerste proces is het deels oplossen van kalksteen (karst) onder invloed van insijpelend water dat licht zuur is. Dit kan wanneer het gesteente tijdens een fase van opheffing dicht aan de oppervlakte komt te liggen. Het water kan direct in de kalksteen infiltreren of via een ander gesteente migreren. Het oplossen van de kalksteen kan leiden tot het ontstaan van migratiepaden voor het water waar het zich een weg baant doorheen het gesteente (bv. langs spleten), maar dit kan ook leiden tot de vorming van holtes (of zelfs grotten).

Een tweede mogelijkheid is dat het gesteente verbrokken of opgebroken wordt in of langs breukzones. Een massieve kalksteen is immers vrij bros. In de barsten of spleten kunnen fluïda migreren die de ontstane porositeit (en permeabiliteit) in stand houden, vergroten of weer teniet doen, al naargelang de omstandigheden en samenstelling van het water. Tijdens diagenetische processen kunnen immers bepaalde mineralen oplossen of net neerslaan.

Beide processen kunnen de grotere permeabiliteit in het reservoir verklaren, maar in beide gevallen moet de ontstane permeabiliteit wel bewaard blijven tijdens latere diagenetische processen.

De verhoogde permeabiliteit in barsten en spleten of holten speelt op grotere (reservoir) schaal, maar wordt niet gemeten in het labo. De holten en barsten worden immers niet bemonsterd tijdens het nemen van boorkernen: de kans is veel kleiner dat ze net gekernd zijn of ze zorgen ervoor dat de kern verbrokken is. Ze zijn dan ook niet vertegenwoordigd in de *plugs* die genomen worden, die slechts enkele cm³ groot zijn. De resultaten voor de *plugs* reflecteren enkel de matrix van het gesteente zelf. Vandaar het verschil tussen de lage porositeit en permeabiliteit op kleine schaal (matrix van het gesteente), en de hogere permeabiliteit op reservoirschaal.

Holten en barsten kunnen in principe wel gedetecteerd worden op basis van boorgatmetingen, wat o.a. het geval is in Merksplas (KB165; Vandenberghe et al., 2000) en Poederlee (KB170; Laenen et al., 2005).

De verhoogde permeabiliteit in de Kolenkalk Groep in het Bekken van de Kempen wordt toegeschreven aan effecten van verkarsting. Vandenberghe et al. (2000) beschrijven het reservoir in Merksplas als een complex netwerk van subverticale barsten, met een spatiëring in de orde van 20-30 cm, vergroot door oplossing (karsteffecten). Deze barsten zijn gedeeltelijk opgevuld met calciet. Dit is vergelijkbaar met observaties in Heibaart en Poederlee (Vandenberghe et al., 1986). Ook kunnen er meerdere karstniveaus voorkomen in de Dinantiaan kalksteenafzettingen. Bijvoorbeeld in de diepboring Heibaart traden spoelverliezen op aan de basis van deze afzettingen. De hoogste permeabiliteit situeert zich dus doorgaans kort onder de top, maar diepere niveaus zijn niet uit te sluiten.

7.1.3. LATERALE VARIATIE

De vermeldde boringen situeren zich op het platform aan de zuidelijke rand van het bekken van de Kempen, ten noorden van het Brabant Massief (zie Figuur 10). Meer specifiek zijn er een aantal putten geboord op “hoge” structuren. Zo zijn de putten rond Loenhout geboord op/in een verhoogde structuur (koepel) die aangewend wordt voor de gasopslag. Ook de put in Poederlee (KB170) werd op een vergelijkbaar hoog geplaatst. Het gebied strekt zich verder uit ten oosten van Loenhout, met veranderingen in diepte langs een reeks breuken, waarbij de gemiddelde diepte wel toeneemt (Dreesen et al., 1987). Waar de top van de kalksteen zich in Loenhout op minder dan 1200 m bevindt, neemt dit toe naar circa 1650 m in Merksplas (KB165), en naar meer dan 2000 m in Turnhout (KB120).

Binnen dit gebied komen dezelfde lithostratigrafische eenheden voor, alhoewel er wel dikteverschillen zijn (een correlatiepaneel is opgenomen in Hoofdstuk 4). De dikteverschillen zijn er zowel voor de individuele formaties als voor het totale pakket. De dikte wordt besproken in Hoofdstuk 6 (6.8.2). De verkarste niveaus zijn echter in meerdere putten in de regio aangetroffen, telkens in het bovenste deel van de sequentie (Loenhout Formatie). Ze vertonen dus een zekere verbreiding. Op basis van de pomptesten rapporteren Vandenberghe et al. (2000) een invloedzone van 5 à 6 km rondom de put in Merksplas. Ze vermelden ook kleine drukeffecten op de putten DzH5 en DzH9 in Loenhout, op een afstand van 9 à 10 km.

Naast de bruto dikte is ook de (netto) dikte van de permeabele zones variabel, alhoewel de grootteorde van 50 m constant lijkt.

7.1.4. VERWACHTINGEN VOOR HET RESERVOIR IN BEERSE (CONCEPT)

De ligging van het project en de boringen in de omgeving van Beerse en Vosselaar situeert zich in de nabijheid van de putten in Merksplas (5 km) en Turnhout (<10 km) en de geologie sluit daar ook bij aan. Vandaar dat een vergelijkbare sequentie wordt verwacht, waarin ook verkarste zones voorkomen.

De verwachtingen zijn conceptueel weergegeven in het schema in Figuur 27.

→ Verkarste zones

Voor Beerse wordt een reservoir verwacht dat vergelijkbaar is met Merksplas en Turnhout, waarbij er in het bovenste deel van de Kolenkalk Groep één of meerdere permeabele zones voorkomen (gezamenlijke grootteorde van 50 m). Diepere zones zijn ook mogelijk. De put in Merksplas (KB165) heeft echter enkel het bovenste deel van de sequentie aangeboord, er is dus geen informatie over dieperliggende productieve zones. In Turnhout (KB120) geeft Gulinck (1956) aan dat er onder de topzone (onder 2220 m) enkel nog een massieve en homogene kalksteen aanwezig is.

→ Breukzone

Naast de aanwezigheid van permeabele zones gerelateerd aan karsteffecten is er nog een mogelijkheid voor het voorkomen van bijkomende permeabiliteit in het reservoir.

Het geologische model op basis van de seismische data geeft aan dat er zich een breukzone bevindt net ten westen van de locatie te Beerse (hier Kasterlee breuksysteem genoemd). Het breuksysteem bestaat uit twee breuken: in het westen een naar het oosten afhellende afschuivingsbreuk, in combinatie met een naar het westen hellende breuk net ten oosten daarvan (antithetisch). Deze breuken hebben een NW-SE gerichte oriëntatie. Ze doorsnijden (en verplaatsen) de kalksteen-sequentie van het Dinantiaan, maar hebben waarschijnlijk een oorsprong die nog verder teruggaat in de tijd. Latere activiteit van deze breuken, na vorming van de Dinantiaan afzettingen, heeft wellicht gezorgd voor het verder opbreken van het kalksteenpakket. Diagenetische processen en fluïdamigratie hebben dus mogelijk kunnen zorgen voor verdere oplossing van de kalksteen en sterker ontwikkelde karst.

De NW-SE oriëntatie van de breuken is parallel aan de regionale trend en ook parallel met de breuken van het systeem van de Roerdal Slenk. Dit is een nog actieve geologische zone waar zakking optreedt. De oriëntatie van de breuken ten opzichte van het huidige spanningsveld met een NE-SW extensierichting (Michon & Van Balen, 2005) is dus gunstig voor het openen van barsten, spleten en breukvlakken. De invloed van latere diagenetische processen op de karakteristieken van de breuken is echter nog niet gekend.

Indien we dit breuksysteem op regionale schaal bekijken, kunnen we afleiden dat het nog actief is geweest in de laatste 5 tot 10 miljoen jaar. Dit verhoogt de kans op een permeabel breuksysteem. Voor de naar het westen afhellende (antithetische) breuk lijken er geen aanwijzingen op recente activiteit.

Beide breuken snijden elkaar nabij de basis van de Dinantiaan kalksteensequentie (en top Devoon). Daar zal het gesteente waarschijnlijk nog meer opgebroken en gebreccieerd zijn, waardoor een zone met verhoogde permeabiliteit kan ontstaan. Geothermische doubletten in de USA hebben geïllustreerd dat intersecties van breukzones zich vaak gedragen als zones met verhoogde productiviteit.

In Horst a/d Maas in Nederland is een project gerealiseerd in een vergelijkbare situatie, waarbij water wordt onttrokken vanuit een breukzone doorheen de kalksteensequentie. Het project situeert zich op het Venlo Blok, ten oosten van de Roerdal Slenk en de Peel Horst. De grens tussen het Venlo Blok en de Peel Horst wordt er gevormd door de Tegelen breuk(zone), een NW-SE georiënteerde afschuiving, afhellend naar het oosten. Seismische data tonen aan dat de breuk doorloopt tot aan het oppervlak en ze maakt deel uit van een geologisch actieve structuur. De verplaatsing langs de Tegelen breuk is wel groter dan die langs de Kasterlee breuk (grootteorde 200 m). De productieput van dit doublet (CAL-GT-01) is doorheen de breuk geboord (in de Kolenkalk Groep). Op die positie deden zich tijdens het boren spoelingsverliezen voor (na circa 2300 m). Puttesten geven aan dat een debiet van meer dan 240 m³/h mogelijk is bij een afpompingsdruk van minder dan 5 bar (VITO, 2012; zie ook www.nlog.nl). De permeabiliteit (uitgaande van een productief interval van 50 m) ligt daarbij in de Darcy range (0,5-5, afhankelijk van de analyse). Net zoals in Beerse is de injectieput van de breuk weg geboord.

Aangezien het mogelijk is dat de aanwezigheid van de Kasterlee breukzone voor een verhoogde permeabiliteit heeft gezorgd, wordt de productieput in Beerse hier naartoe geboord. De intersectie met de hoofdbreuk bevindt zich nabij de basis van de Kolenkalk Groep. De injectieput wordt dan weer van de breukzone weg gedeveerd. Daar wordt dus geen verhoogde permeabiliteit in een breukzone verwacht.

→ Inzichten vanuit temperatuursmodellen

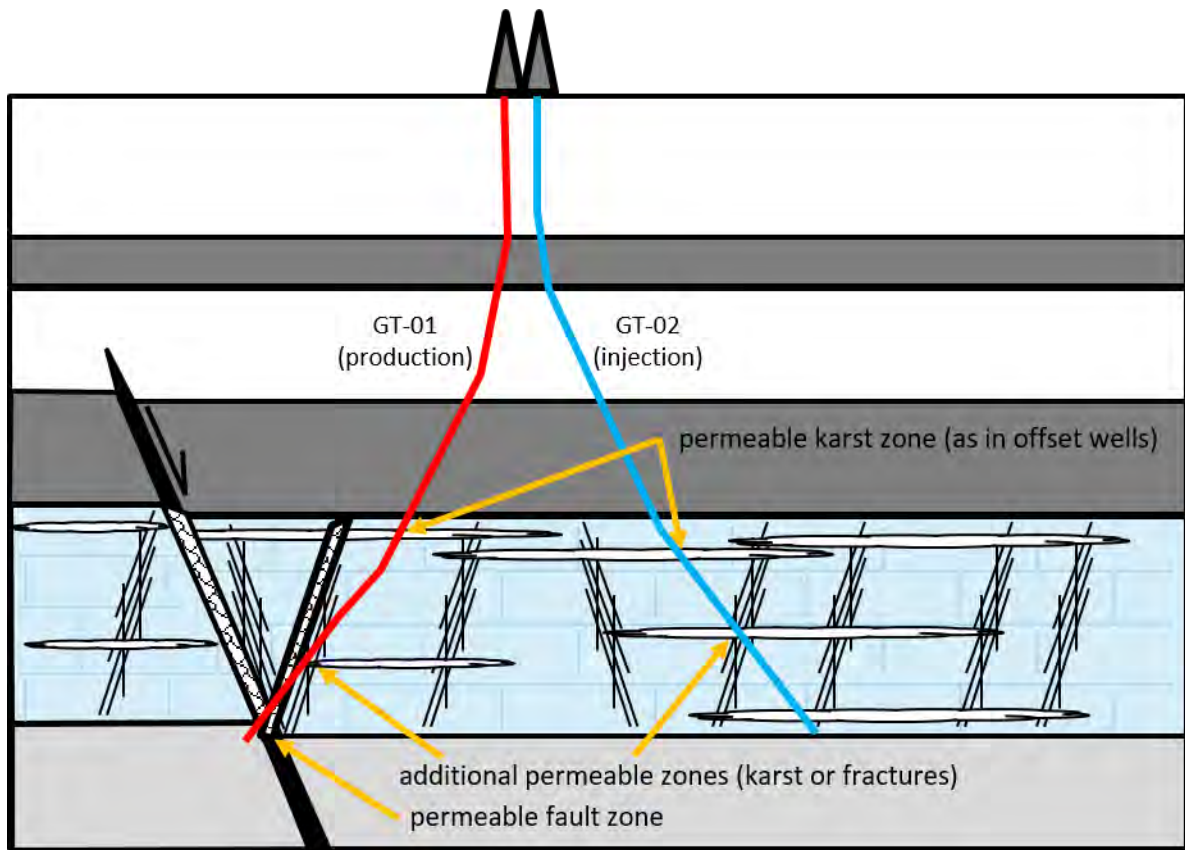
In verscheidene boringen is de temperatuur van het formatiewater hoger dan verwacht kan worden op basis van de regionale gradiënt (zie Hoofdstuk 8). Aan de hand van simulaties die zijn uitgevoerd, leiden we af dat deze anomalie o.a. veroorzaakt wordt door convectie in het reservoir. Het voorkomen van convectiecellen wijst echter op een hogere permeabiliteit dan is vastgesteld tijdens de puttesten in o.a. Merksplas (KB165) en Turnhout (KB120).

Deze hogere permeabiliteit kan verklaard worden door de aanwezigheid van meerdere productieve zones (ook dieper in het reservoir), maar er moet dan wel een verticale connectiviteit zijn. Bijkomende permeabele zones zijn niet uit te sluiten in Merksplas waar enkel de top 120 m van het pakket werd aangeboord. In Turnhout is echter geen diepere permeabele zone beschreven (Gulinck, 1956).

Mogelijk is de permeabiliteit het gevolg van barsten en spleten in het gesteente die niet in (of op schaal van) de kernen of boorgatmetingen zijn geïdentificeerd, maar die op een grotere schaal spelen, of permeabiliteit langs of in breukzones.

In Turnhout moet een hogere transmissiviteit (of gemiddelde permeabiliteit) of een diepere convectiecel verondersteld worden om de observaties te verklaren. Dit kan het gevolg zijn van de geologische structuur, de seismische data wijst er immers op een complexe, intern verbrokkelde, koepelvormige structuur nabij een breuk met een grote verplaatsing. In Merksplas daarentegen is de boring gezet op een blok dat intern stabiel lijkt, waarbij de meest nabije breuk een kleinere verplaatsing vertoont dan in Turnhout. Dit zou kunnen wijzen op een iets minder goede connectiviteit of permeabiliteit (verticaal). Hierdoor zou de convectie een beperktere temperatuursanomalie tot gevolg hebben, wat overeenkomt met de waarnemingen.

De locatie in Beerse sluit het nauwst aan bij die van Merksplas. De transmissiviteit die verondersteld wordt om de temperatuur in Merksplas te verklaren lijkt dan ook de meest logische verwachting voor Beerse.



Figuur 27: Schematische dwarsdoorsnede langs een geplande doublet met conceptueel de verwachtingen wat betreft permeabiliteit. Enerzijds zijn er de verkarste zones kort onder de top zoals aangeboord in Merksplas (KB165) en Turnhout (KB120), anderzijds is er de mogelijkheid van bijkomende permeabele zones dieper in het reservoir (te verwachten op basis van inzichten rond temperatuur, zie Hoofdstuk 8). In de productieput is er de mogelijkheid om extra permeabiliteit aan te treffen langs de Kasterlee breukzone.

7.2. PETROFYSISCHE EVALUATIE

Geofysische boorgatmetingen zijn niet geëvalueerd om een inschatting te maken van de porositeit en permeabiliteit van het reservoir. Zoals hogerop wordt toegelicht, zijn de verwachte permeabele zones van secundaire oorsprong (verkarsting, breuken) en hebben een effect op reservoirschaal. De boorgatmetingen (en de kernmetingen) geven de karakteristieken van het reservoirgesteente weer op kleinere schaal. Ze zijn niet representatief voor het gedrag van het reservoir op grotere schaal. Een petrofysische analyse levert dan ook niet de gewenste informatie op over de reservoirkarakteristieken.

De boorgatmetingen kunnen wel nuttig zijn in het identificeren van de productieve zones, bijvoorbeeld aan de hand van dipmeter logs of de ROP (Vandenbergh et al., 2000).

7.3. PUTTEST EVALUATIE

Deze reservoirpermeabiliteit (dus op grotere schaal) kan wel afgeleid worden uit pomptesten (doorgaans productie) uitgevoerd in putten geboord tot in de Dinantiaan kalksteensequentie. In de Kempen werden er pomptesten uitgevoerd op meerdere putten. De resultaten werden ofwel gepubliceerd, ofwel kon op basis van de beperkte beschikbare informatie een inschatting gemaakt

worden van de permeabiliteitswaarden. De waarden worden verder toegelicht onder 7.5 Permeabiliteit uit publieke informatie. Gegevens uit de putten in Loenhout zijn niet publiek beschikbaar wegens vertrouwelijkheid.

7.4. PRODUCTIEDATA EVALUATIE

Voor de evaluatie van de permeabiliteit zijn geen productiedata geanalyseerd. Er zijn in een eerdere fase van het project beperkte productiedata uit Loenhout ter beschikking gesteld door Fluxys, in het kader van een studie rond mogelijke interferentie tussen het geothermisch doublet en de ondergrondse gasopslag. De data zijn echter vertrouwelijk en zijn enkel daarvoor aangewend. Er zijn dus geen inschattingen gemaakt van de permeabiliteit op basis van deze vertrouwelijke gegevens.

7.5. PERMEABILITEIT UIT PUBLIEKE INFORMATIE

In het verleden zijn pomptesten uitgevoerd op verscheidene putten tot in de Kolenkalk Groep. De reservoir eigenschappen van het Dinantiaan zijn daardoor gekend vanuit diverse putten in de omgeving van de onderzoekslocatie te Beerse. Dit zijn o.a. Halen, Heibaart/Loenhout, Merksplas, Poederlee, Turnhout. De resultaten van deze putten staan hieronder samengevat (Tabel 10).

*Tabel 10: Overzicht van permeabiliteitsgegevens van het Dinantiaan in enkele putten in de Kempen, bepaald op basis van productietesten. De vermelde netto dikte is diegene gebruikt voor het bepalen van de permeabiliteitswaarde. * Voor Loenhout wordt een dikte van het productief interval van 50 m aangenomen, alhoewel dit niet expliciet vermeld wordt in de literatuur.*

Put	Diepte top (m)	Bruto dikte (m)	Netto dikte (m)	Permeabiliteit (mD)		
				Minimum – Gemiddeld - Maximum		
Halen	608	>700	50	1650		
Loenhout	1102	314	*	2000	3500	5000
Merksplas	1643	>120	52	288	946	1945
Poederlee	1500	>120	167	3-4	85	375
Turnhout	2174	>530	46	635	1568	2500

De putten van Merksplas en Turnhout zijn het dichtst bij de geplande locatie gelegen. Voor Merksplas zijn de resultaten van de pomptesten gepubliceerd door Vandenberghe et al. (2000), variërende tussen 288 en 1945 mD (voor een permeabel interval van ruim 50 m). Voor Turnhout zijn er geen permeabiliteitswaarden gepubliceerd. Gulinck (1956) publiceerde wel informatie over het debiet van de testen (30 m³/h) en de evolutie van het waterniveau (tussen 60 en 11 m onder maaiveld). Daarnaast publiceerde Gulinck analyseresultaten met betrekking tot de samenstelling van het water, en publiceerde Grosjean (1954) temperatuursgegevens. Aan de hand van de formule van Theis kan hieruit een permeabiliteit afgeleid worden, rekening houdende met een dikte van 46 m voor het productieve interval. De waarden liggen tussen 635 en 2500 mD (584-2300 mD herrekend voor 50 m). Voor de put in Halen is dezelfde werkwijze gevolgd als voor de put in Turnhout, wat een waarde rond 1650 mD oplevert (voor een permeabel interval van 50 m).

Ook verder van de projectlocatie af zijn er putten waarvan informatie beschikbaar is. De hoogste waarden tussen 2000 en 5000 mD worden vermeld in publicaties over de omgeving van Loenhout (Vandenberghe et al., 1986; Lagrou & Duser, 2003; Duser & Lagrou, 2008). Deze waarden worden hier als minimum en maximum beschouwd, met een gemiddelde waarde rond 3500 mD. Een

permeabel interval van 50 m wordt hierbij verondersteld, maar dit wordt niet expliciet vermeld in de literatuur. Verdere gegevens zijn niet beschikbaar vanwege vertrouwelijkheid. De laagste permeabiliteitswaarden daarentegen zijn gerapporteerd in Poederlee (Laenen et al., 2005). Injectietesten geven aan dat de permeabiliteit kort bij de put erg laag is (3-4 mD), maar dat op enkele tientallen meter een permeabiliteit aanwezig is van circa 375 mD. Deze waarden houden rekening met een permeabele zone van 167 m.

7.6. BEPALING AQUIFEREIGENSCHAPPEN VOOR DE PROJECTLOCATIE

Aangezien de permeabiliteit (en porositeit) afgeleid uit kernmetingen slechts representatief is op kleine schaal (de gesteente matrix), op niveau van een handstuk, kan deze informatie niet gebruikt worden om uitspraken te doen over de permeabiliteit op grotere schaal (reservoir). De permeabiliteit wordt immers veroorzaakt door barsten en spleten en holten in het gesteente. Deze worden niet (of niet goed) vertegenwoordigd in de handstukken. Vandaar dat gegevens over de permeabiliteit afgeleid uit pomptesten het meest relevant zijn. Ze geven informatie over het reservoir op grotere schaal. Deze informatie is beschikbaar vanuit verscheidene putten in de ruime regio.

De dichtheid van barsten en spleten en het voorkomen van verkarste zones is niet constant over het ganse gebied: het reservoir is niet homogeen en de testdata wijzen erop dat de permeabiliteit en netto dikte niet overal precies hetzelfde zijn. De resultaten van de pomptesten kunnen echter wel gebruikt worden om een grootteorde aan te geven en een indicatie te geven van de minimale en maximale permeabiliteit die kan verwacht worden. Die grootteorde is immers wel vergelijkbaar tussen de verschillende putten.

7.7. ANISOTROPIE

Er is geen onderscheid gemaakt tussen de horizontale en verticale permeabiliteit. Anisotropie is wel toegepast voor sommige scenario's bij het simuleren van de stromingen (reservoirmodel), temperatuur- en drukvariaties in het reservoir. Hierbij is er gewerkt met een verhoogde permeabiliteit in de richting parallel aan de breuken en een verlaagde waarde in de richting loodrecht daarop.

7.8. RESULTATEN EN DISCUSSIE OVER ONZEKERHEID

De meest relevante eigenschappen van het reservoir zijn bepaald op grotere schaal, en worden niet weerspiegeld in kernmetingen. De matrix eigenschappen van het gesteente, zoals porositeit, zijn minder relevant voor het gedrag van het reservoir op grotere schaal.

Zoals aangegeven zijn de gegevens afgeleid uit pomptesten het meest relevant voor de inschatting van de permeabiliteit van het reservoir op de onderzoekslocatie te Beerse. Voor de berekeningen van het potentieel van de top van het Dinantiaan is uitgegaan van de meest nabije put, KB165 in Merksplas (afstand 5 km), en in mindere mate van die van Turnhout (KB120). Gezien de nabijheid en de vergelijkbare diepte lijkt de put in Merksplas het meest representatief. Indien we voor beide putten de permeabiliteit herrekenen naar een netto dikte van 50 m (zie verderop) dan komen de minimum, mediane en maximum waarde uit op respectievelijk 300-983-2022 mD voor Merksplas, en 584-1442-2300 mD voor Turnhout.

De gekozen waarden zijn 300 mD (minimum), 1000 mD (mediaan) en 2300 mD (maximum). De minimum en de gemiddelde waarde zijn gebaseerd op de testen in Merksplas. De maximum waarde is die afgeleid voor Turnhout. Deze ligt iets hoger dan in Merksplas, maar de grootteorde is vergelijkbaar. Deze maximum waarde heeft voornamelijk impact op de P_{10} van het vermogen, niet

op de P_{90} . De grootteorde van de gekozen waarden is in lijn met de permeabiliteitswaarden uit andere putten verderaf (300-5000 mD).

Voor de bruto dikte van het reservoir zijn de waarden genomen zoals afgeleid uit de kartering op basis van de seismische data. Zoals aangegeven is er een onzekerheid op de diepte van de basis van het pakket. Dit maakt dat ook de dikte onzeker is. Op basis van de seismische interpretatie lijkt de dikte rond 500 m te liggen. Een alternatieve interpretatie zou de dikte op sommige plekken doen oplopen tot 800 m.

Op basis van het regionaal voorkomen lijkt een waarde rond 500 m het meest waarschijnlijk. Als spreiding is een minimum van 450 m opgenomen en een maximum van 550 m.

Voor de netto dikte van het reservoir wordt uitgegaan van een grootteorde van 50 m voor de verkarste zones. Dit is een grootteorde die als vuistregel wordt gebruikt in de Kempen. Zowel in Merksplas als in Turnhout zijn er aanwijzingen voor een permeabele zone in de orde van 50 m dikte. In de put van Merksplas zijn zowel geofysische als boordata gebruikt om het productief interval te definiëren (Vandenberghe et al., 2000). Er worden twee permeabele zones geïdentificeerd: een eerste kort onder de top van de sequentie en een tweede onderaan. Aan de hand van de geofysische boorgatmetingen (o.a. dipmeter logs) kunnen zones tussen 1630 en 1656 m en tussen 1739 en 1750 m onderscheiden worden. Dit wordt bevestigd door de boorbeschrijving (cuttings), waarbij er binnen deze zones sporen zijn van calciëet (in aders) die niet op andere diepte voorkomen. Tijdens het boren was de vooruitgang hier ook een stuk sneller. Deze observaties werden vervolgens bevestigd door temperatuur- en stromingsmetingen tijdens productie en injectie. De bovenste zone blijkt de meest productieve te zijn.

In Turnhout wordt een permeabele zone van 46 m gerapporteerd door Gulinck (1956), tussen 2174 en 2220 m diepte.

De 50 m netto dikte in combinatie met de mediane waarde voor de permeabiliteit (1000 mD) levert een transmissiviteit op van 50 D.m. Deze waarden zijn representatief voor de verkarste zones in het bovenste deel van het reservoir.

Op basis van de simulaties uitgevoerd in het kader van de temperatuursinschattingen zijn er aanwijzingen dat de totale transmissiviteit in het reservoir groter is dan 50 D.m. Een grootteorde van 75 D.m lijkt te verwachten (zie Hoofdstuk 8)⁴. De hogere transmissiviteit kan verklaard worden door het voorkomen van bijkomende permeabele zones. Aangezien de boring in Merksplas niet de volledige sequentie heeft aangeboord, maar enkel de top 120 m, valt de aanwezigheid van dieperliggende permeabele zones niet uit te sluiten. Het is best mogelijk dat ze er zijn, de put is gewoon niet diep genoeg geboord.

De hogere transmissiviteit nemen we op door middel van een grotere netto dikte van het reservoir. Voor een mediane permeabiliteit van 1000 mD komt dit overeen met een netto dikte van 75 m.

Om de gemiddelde dikte van de netto permeabele sectie rond 75 m te laten uitkomen is er een mediane waarde van 15% genomen voor de netto/bruto verhouding (met een spreiding tussen 14 en 16%). Deze waarden resulteren in een netto dikte die minimaal 63 m en maximaal 88 m bedraagt. De mediane waarde komt zoals voorzien op 75 m uit.

Tenslotte is er de permeabiliteit die aangetroffen wordt in de breukzone. We gaan ervan uit dat deze nog niet vervat zitten in de hierboven vermeldde transmissiviteit van 75 D.m. De waarde is afgeleid op basis van de temperatuursanalyse, waarbij er een overeenkomst is verkregen met de resultaten in Merksplas (KB165). In de omgeving van Merksplas situeert zich ook een breuk, maar gezien de

⁴ Een transmissiviteit van 75 D.m komt overeen met een gemiddelde permeabiliteit van 150 mD voor het volledige reservoir (500 m). Wanneer deze waarde wordt gebruikt in de simulaties, kan het resulterende temperatuursprofiel de gemeten verhoogde waarden in Merksplas (anomalie) verklaren.

afstand (orde 1 km) lijkt het waarschijnlijk dat de put zich buiten de “*damage zone*” rond de breuk bevindt.

Het kwantificeren van de permeabiliteit in de breukzone is moeilijker. Afgaande op de resultaten van het project in Horst a/d Maas (put CAL-GT-01) is er een permeabiliteit in de orde van 1 D mogelijk, voor een permeabele dikte van 50 m. Deze combinatie wijst dus op een transmissiviteit in de orde van 50 D.m. Ook de put Mol-GT-01 mikte op een breukzone, er werd een productiviteit van 4 tot 5 m³/h per bar vastgesteld (Bos & Laenen, 2017). Voor Beerse gaan we uit van een iets conservatievere waarde van 20 D.m. Deze geldt echter enkel voor de productieput (de injectieput wordt van de breuk weg geboord). De transmissiviteit of permeabiliteit kan dus niet voor het gehele reservoir verhoogd worden.

Het effect van de breukzone voor de productieput kan wel in rekening gebracht worden door middel van een skin factor. Voor het bepalen van deze skin factor is onderstaande redenering gevolgd. Om van een transmissiviteit van 75 D.m (75 m aan 1000 mD) naar 95 D.m te gaan, moet de netto dikte verhoogd worden van 75 m naar 95 m. Om dit te realiseren benaderen we dit alsof de put gedeveerd is geboord, waardoor er een geboorde lengte is van 95 m (schuin) doorheen een interval van 75 m (verticale dikte). Om deze geboorde lengte te verkrijgen is een deviatiehoek van bijna 38° vereist. Gebruik makende van de formules zoals opgenomen in de handleiding van DoubletCalc (Mijnlieff et al., 2014) leidt dit tot een skin factor van -0,34.

De gekozen waarden voor de saliniteit weerspiegelen de gemeten waarden uit de putten in Merksplas en Turnhout. De resultaten zijn opgenomen in volgend hoofdstuk.

Er is geen onderscheid gemaakt tussen de verticale en horizontale permeabiliteit (K_h/K_v).

Tabel 11: Overzicht van de reservoirparameters.

Aquifer	Lage waarde	Midden waarde	Hoge waarde
Bruto dikte (m)	450	500	550
Netto/bruto (-)	0,14	0,15	0,16
Gemiddelde porositeit (%)	NVT	NVT	NVT
Gemiddelde permeabiliteit (mD)	300	1000	2300
Saliniteit (ppm)	100000	134000	165000
K_h/K_v (-)	NVT	NVT	NVT
Skin productieput		-0,34	

HOOFDSTUK 8. FORMATIEWATER KARAKTERISERING

8.1. TEMPERATUUR

8.1.1. GEMIDDELDE REGIONALE GEOTHERMALE GRADIËNT

In België neemt de temperatuur in de ondergrond toe aan een gemiddelde gradiënt van ruim 30 à 31°C/km. Op basis van een gemiddelde geothermale gradiënt van 30°C/km (en een gemiddelde oppervlakte temperatuur van 10°C) zou de temperatuur op een diepte van circa 1600 m zo'n 58°C bedragen.

Deze gradiënt is echter niet overal precies hetzelfde, maar varieert al naargelang de locatie. Bovendien is de gradiënt niet constant maar verandert deze ook met de diepte. De geologische formaties bestaan immers uit verschillende gesteenten. De samenstelling van het gesteente (lithologie) bepaalt de fysische eigenschappen, waaronder de mate waarin het gesteente warmte kan geleiden. Ook de stroming van warm water doorheen de ondergrond kan temperatuursvariaties veroorzaken.

In de boring in Meer (KB149) zijn meerdere temperatuursmetingen gedaan (Vandenberghe et al., 1988). Hieruit is de gemiddelde gradiënt af te leiden. Tot op een diepte van circa 1700 m bedraagt deze 33,3°C/km (met een oppervlaktetemperatuur van 10,5°C), wat zou leiden tot een temperatuur van 63,8°C op 1600 m diepte. Voor een diepte van circa 2000 m (breukzone) zou de temperatuur op basis van deze gradiënt uitkomen op 77,1°C. Deze gradiënt is niet helemaal representatief aangezien die gemeten is tot in het kleirijke pakket boven de kalksteensequentie. Binnen de kalksteensequentie wordt weer een lagere gradiënt verwacht.

8.1.2. HOGERE TEMPERATUURSWAARDEN

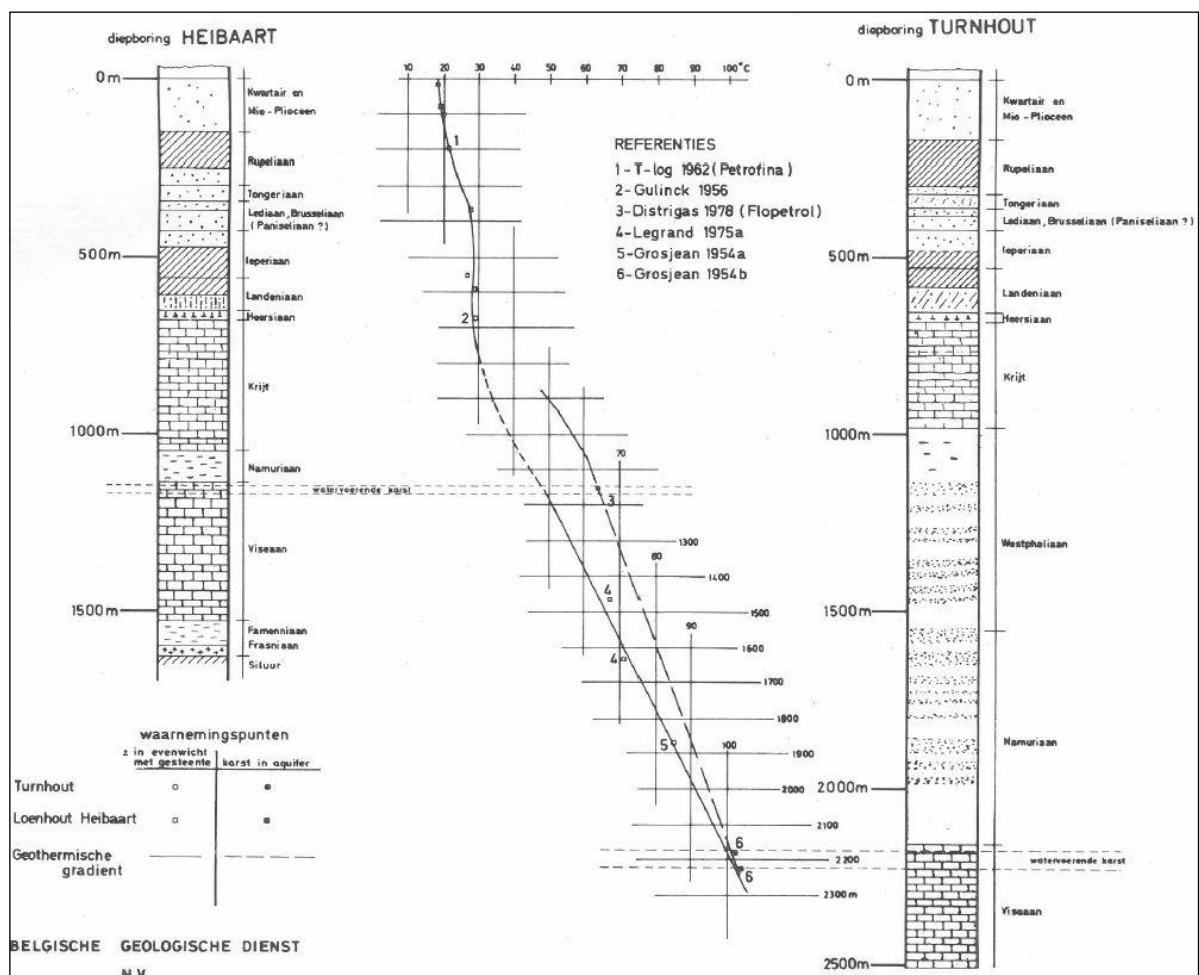
De boringen in Heibaart (KB129), Turnhout (KB120) en Merksplas (KB165) hebben echter verschillen aangetoond tussen de temperatuur op basis van de gemiddelde gradiënt en de temperatuur van het water in permeabele zones in de top van de Dinantiaan kalksteen. Vandenberghe & Bouckaert (1980) hebben deze samengevat voor de putten in Heibaart en Turnhout (Figuur 28). Op de grafiek is bijvoorbeeld te zien hoe de temperatuur aangetroffen in de verkarste zone in Heibaart 10-15°C hoger ligt dan verwacht.

Ook in de recentere put in Mol (Mol-GT-01) werd een hogere temperatuur van 128°C vastgesteld (Bos & Laenen, 2017). De reservoirsectie bevindt zich hier tussen 3100 en 3600 m diepte. In Poederlee (KB170) ligt de temperatuur rond 67°C op een diepte van 1643 m (Bouckaert et al., 1987).

Tabel 12: De verwachte en gemeten temperatuurswaarden (°C) aan de top van de Kolenkalk Groep in de boringen van Merksplas, Turnhout en Heibaart. Bij de verwachting is de waarde aangegeven voor een gradiënt van 30°C/km (10°C aan oppervlak).

Boring	Verwacht (°C)	Gemeten (°C)	Verschil (°C)	Gradiënt (°C/km)
Merksplas	58,9	70	11,1	35,6
Turnhout	75,6	103	27,4	42,6
Heibaart	44,5	63	18,5	44,3

De verhoogde temperatuur kan veroorzaakt worden door het isolerende effect van de hoofdzakelijk kleirijke Namuriaanlagen boven het kalksteenreservoir die ervoor zorgen dat de gradiënt in dit interval hoger is en warmte zich als dusdanig opstapelt aan de top van de kalksteen. Anderzijds kan een verhoogde temperatuur ook veroorzaakt worden door verticale grondwaterstromingen waarbij water vanop grotere diepte (en dus met een hogere temperatuur) naar boven migreert en aldaar de temperatuur verhoogt. Het eerste proces is een puur conductief proces, terwijl het tweede proces een convectieve component kent. Welk van de twee processen de verhoogde temperatuur in beide putten veroorzaakt heeft, is niet gekend.



Figuur 28: Waargenomen temperatuur in de boringen van Heibaart en Turnhout en de temperatuursgradiënt daar (Vandenberghe & Bouckaert, 1980).

8.1.3. TEMPERATUURVERLOOP DOOR CONDUCTIE

De temperatuurstoename met de diepte door invloed van conductie kan berekend worden aan de hand van de warmteflux en de thermische geleidbaarheid van de gesteenten. Dreesen & Laenen (2010) presenteerden een kaart van Vlaanderen met de grootte van de warmteflux. Deze varieert in de regio tussen 55 en $65 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$. De thermische geleidbaarheid van de gesteenten kan bepaald worden op basis van hun samenstelling, waarbij zowel de mineralogie als de porositeit een rol spelen.



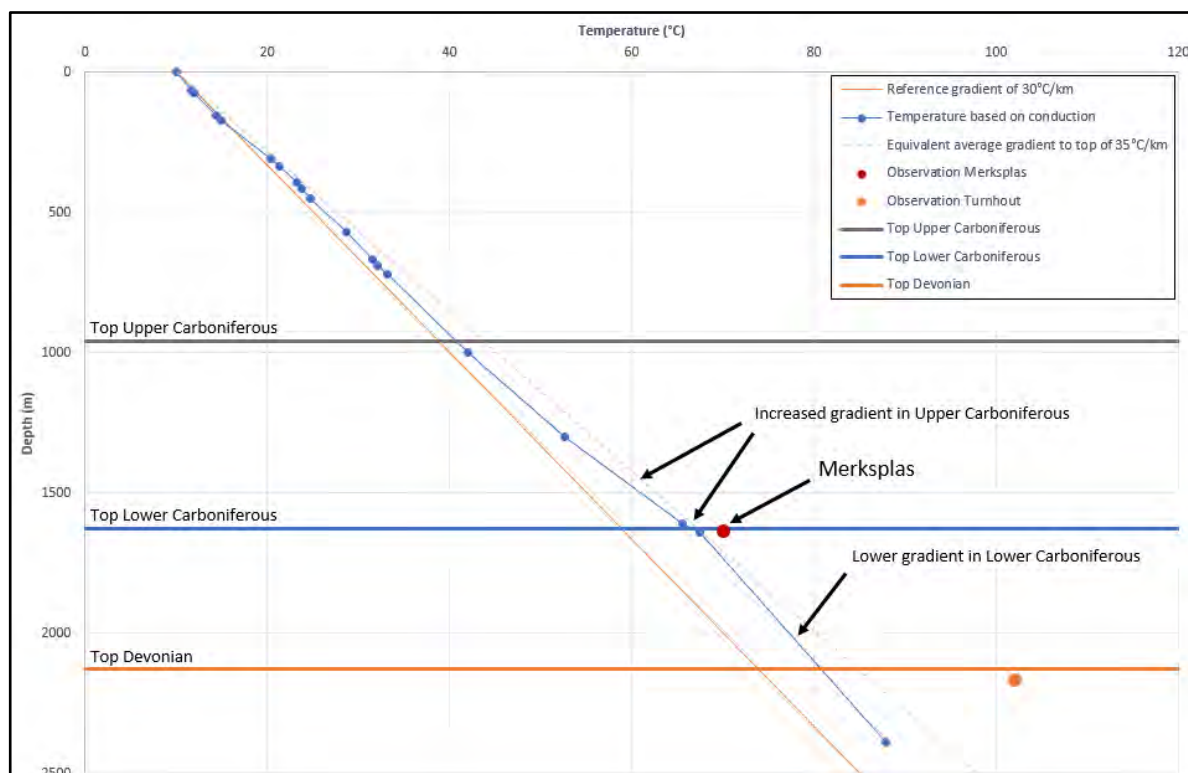
Figuur 29: Schematische weergave van het effect van lagen met verschillende thermische conductiviteit op de temperatuursgradiënt in de ondergrond.

Voor de put in Merksplas kan de samenstelling bepaald worden aan de hand van de boorbeschrijving en de geofysische boorgatmetingen. De hieruit resulterende thermische geleidbaarheid in combinatie met de warmteflux geeft een indicatie van de temperatuurstoename met de diepte. De toename is sneller (de gradiënt hoger) waar de geleidbaarheid kleiner is. Dit is het geval in kleirijke zones. De gradiënt loopt hierbij op tot bijna $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$. De toename gaat trager (de gradiënt is lager) in gesteenten met een hogere geleidbaarheid. De variatie in thermische conductiviteit maakt dat de geothermische gradiënt schommelt tussen 25 en $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Figuur 30). Het resultaat is een temperatuur aan de top van de Onder Carboon kalksteen van $67,4^{\circ}\text{C}$, wat equivalent is met een gemiddelde gradiënt van $35,0^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Binnen het reservoir loopt de gradiënt weer terug, tot een waarde rond $26,8^{\circ}\text{C}/\text{km}$. De anomalie vermindert dus naar onder toe.

Indien we de bekomen temperatuurswaarde vergelijken met de verwachte waarde bij een gemiddelde gradiënt van $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ($58,9^{\circ}\text{C}$) en met de gemeten waarde (70°C), kunnen we besluiten dat op deze manier ongeveer 75-80% van de temperatuursanomalie kan verklaard worden.

Eenzelfde aanpak voor de put in Turnhout wijst op een gemiddelde temperatuur aan de top van het pakket van $90,5^{\circ}\text{C}$. In vergelijking met de verwachte waarde ($75,6^{\circ}\text{C}$) en de gemeten waarde (103°C) kan de temperatuursanomalie zo voor ongeveer 55% verklaard worden. Ook voor Heibaart kan de temperatuursanomalie slechts ten dele verklaard worden door conductie.

De resultaten op basis van conductie kunnen niet de volledige anomalie verklaren zoals die is vastgesteld in Heibaart, Merksplas en Turnhout. Er moet dus nog een ander proces spelen. Daarom is in tweede instantie gekeken naar temperatuurseffecten veroorzaakt door convectie in het reservoir.

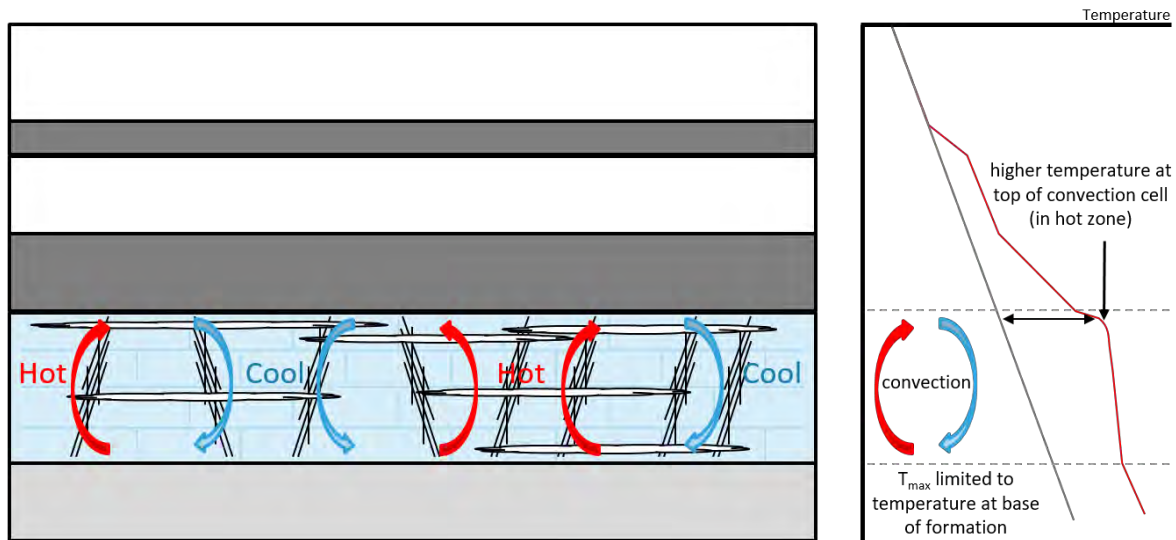


Figuur 30: Temperatuursverloop in Merksplas op basis van conductie, in verhouding tot de normale regionale gradiënt en de gemeten waarde.

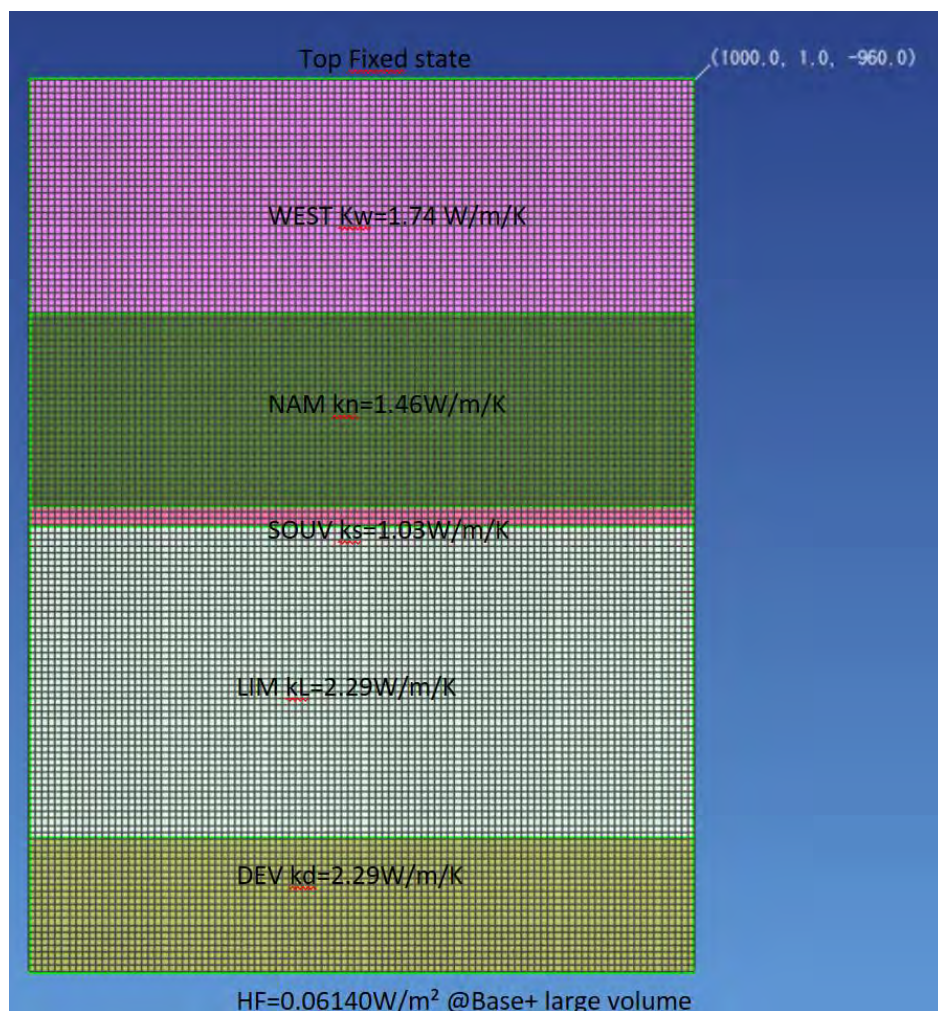
8.1.4. TEMPERATUURSVERLOOP DOOR CONVECTIE

Indien we enkel de beperkte zones met hoge permeabiliteit bekijken, dan lijken er geen aanwijzingen voor convectie. De temperatuursanomalie die is geobserveerd in (vooral) Turnhout en Heibaart suggereert echter dat er nog een proces actief is dat hiervoor verantwoordelijk is. Daarom zijn bijkomende simulaties uitgevoerd om na te gaan wat het effect zou zijn van een convectiecel binnen het Onder Carboon (verticale dikte van circa 500 m in Beerse). Een convectiecel zou ervoor kunnen zorgen dat het warme water aan de basis van het reservoir snel naar boven komt, zodat de temperatuur daar hoger is (Figuur 31). Tussen top en basis is er slechts een beperkt temperatuursverschil (lage gradiënt). Op andere plekken zal het afgekoelde water echter terug naar beneden zakken, daar zal geen verhoogde temperatuur heersen.

De simulaties zijn uitgevoerd met een eenvoudig 2D model in TOUGH2 (Figuur 32). Het model meet 1000 m in horizontale richting, en 2040 m in verticale richting (diepte). Het model is nadien uitgebreid naar 2000 m in horizontale richting. Als aanvangsituatie is een temperatuursverdeling genomen gebaseerd op conductie (deze wijkt lichtjes af van de hierboven opgenomen resultaten). Hierbij is de lagere thermische conductiviteit van de gesteenten boven het reservoir (t/m het steenkoolterrein) in rekening gebracht (vanaf een diepte van 960 m). Vervolgens is het effect van convectie gesimuleerd door het toekennen van een permeabiliteit van 200 mD aan de carbonaatgesteenten van het Onder Carboon. Naast 200 mD zijn er ook simulaties gelopen met een waarde van 150, 250 en 500 mD. Voor de onderliggende zandsteen van het Devooon (Evieux Formatie) is een waarde van 20 mD genomen. In de laatste simulaties voor de situatie in Beerse is de permeabiliteit in de Evieux Formatie teruggebracht tot 5 mD.



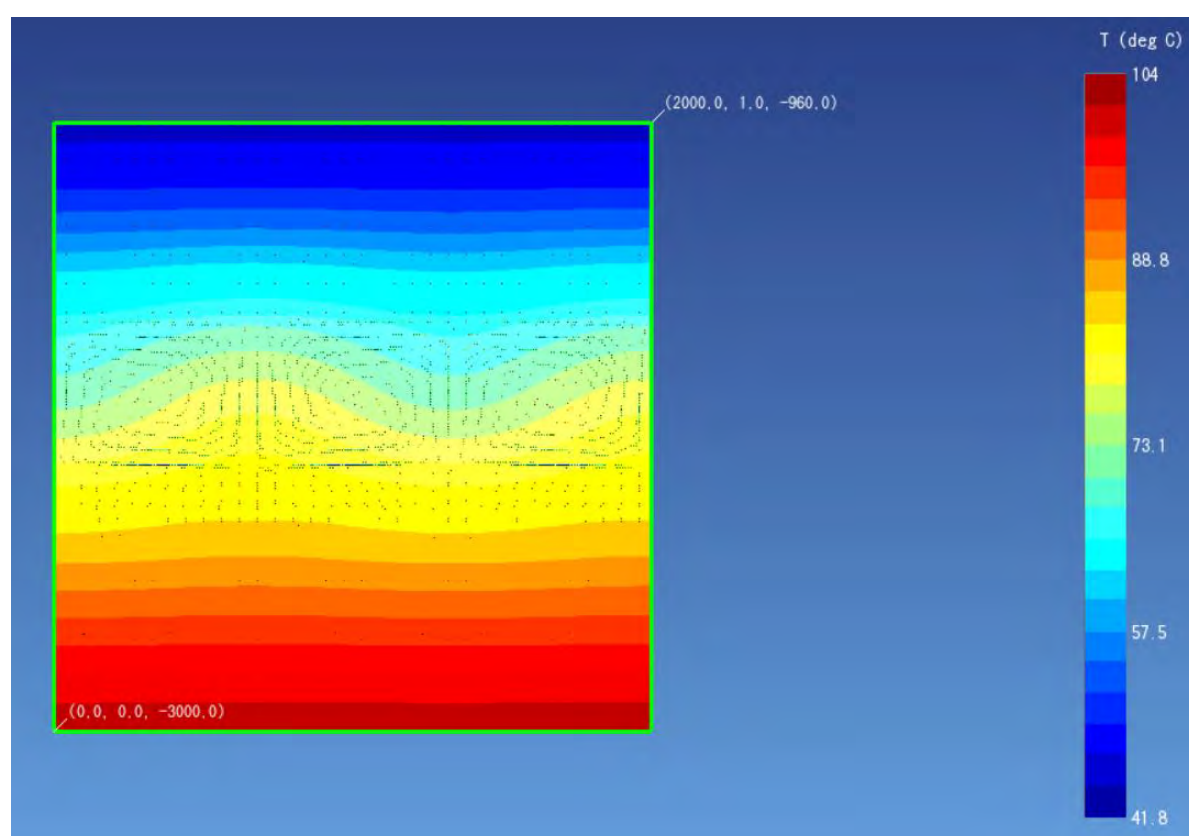
Figuur 31: Schematische weergave van het voorkomen van convection in het reservoir en het effect op de temperatuursgradiënt in de ondergrond (gunstige positie).



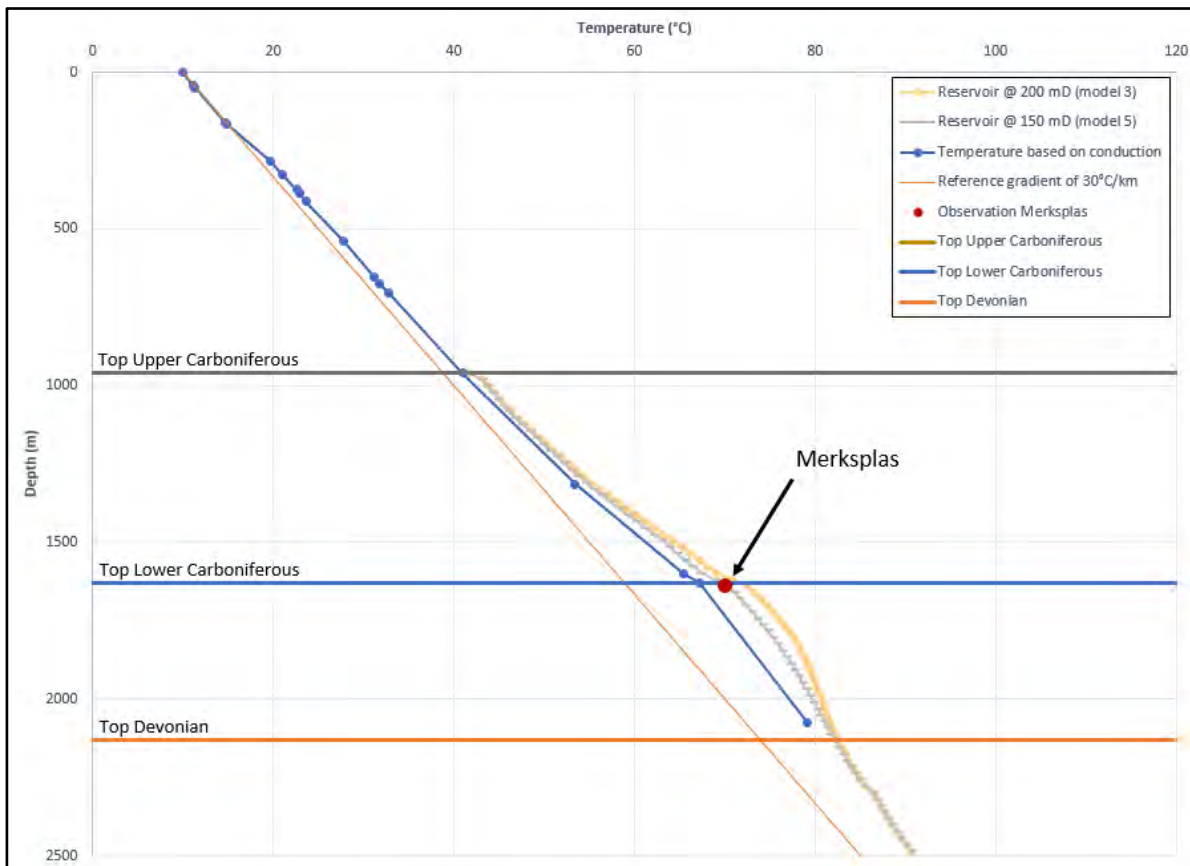
Figuur 32: Opzet van het model om het effect van convection in Beerse te simuleren.

Aan de bovenkant van het model zijn de druk en temperatuur constant gehouden. De randvoorwaarde aan de onderkant van het model is eveneens een constante druk en temperatuur, alhoewel er ook simulaties zijn gelopen met een constante warmteflux. Om randeffecten te vermijden is er onderaan in het model een bijkomende laag toegevoegd. Lateraal is er geen stroming toegelaten aan de grenzen van het model.

De simulaties tonen aan dat convectie begint op te treden vanaf een gemiddelde permeabiliteit tussen 100 en 150 mD. Bij een permeabiliteit van 50 à 100 mD treedt er in dit geval nog geen convectie op. Deze waarde verhoudt zich goed tot de theoretische waarde. Voor de gekozen locatie en parameters wordt het kritische Rayleigh getal immers overschreden bij een permeabiliteit van iets meer dan 150 mD, afhankelijk van de randvoorwaarden (Figuur 33). Deze waarde hangt af van de specifieke locatie en kan in meer gunstige omstandigheden (bij een groter diepte- en temperatuursverschil) veel lager uitkomen (Lipsey et al., 2016). De simulaties zijn uitgevoerd met een constante, gemiddelde permeabiliteit over het ganze reservoir. Eenzelfde effect wordt echter bereikt wanneer de permeabiliteit zich situeert in discrete zones, wat meer aansluit bij de realiteit.



Figuur 33: Simulaties geven aan dat convectie zich in het reservoir van het Onder Carboon (Kolenkalk Groep) voordoet vanaf een permeabiliteit van 150 mD.



Figuur 34: Temperatuursverloop voor de locatie in Beerse in het geval van een convectiecel (bij 150 en 200 mD), in verhouding tot de situatie met enkel conductie en de normale regional gradiënt. Ter vergelijking zijn de waarnemingen in Merksplas en Turnhout aangeduid.

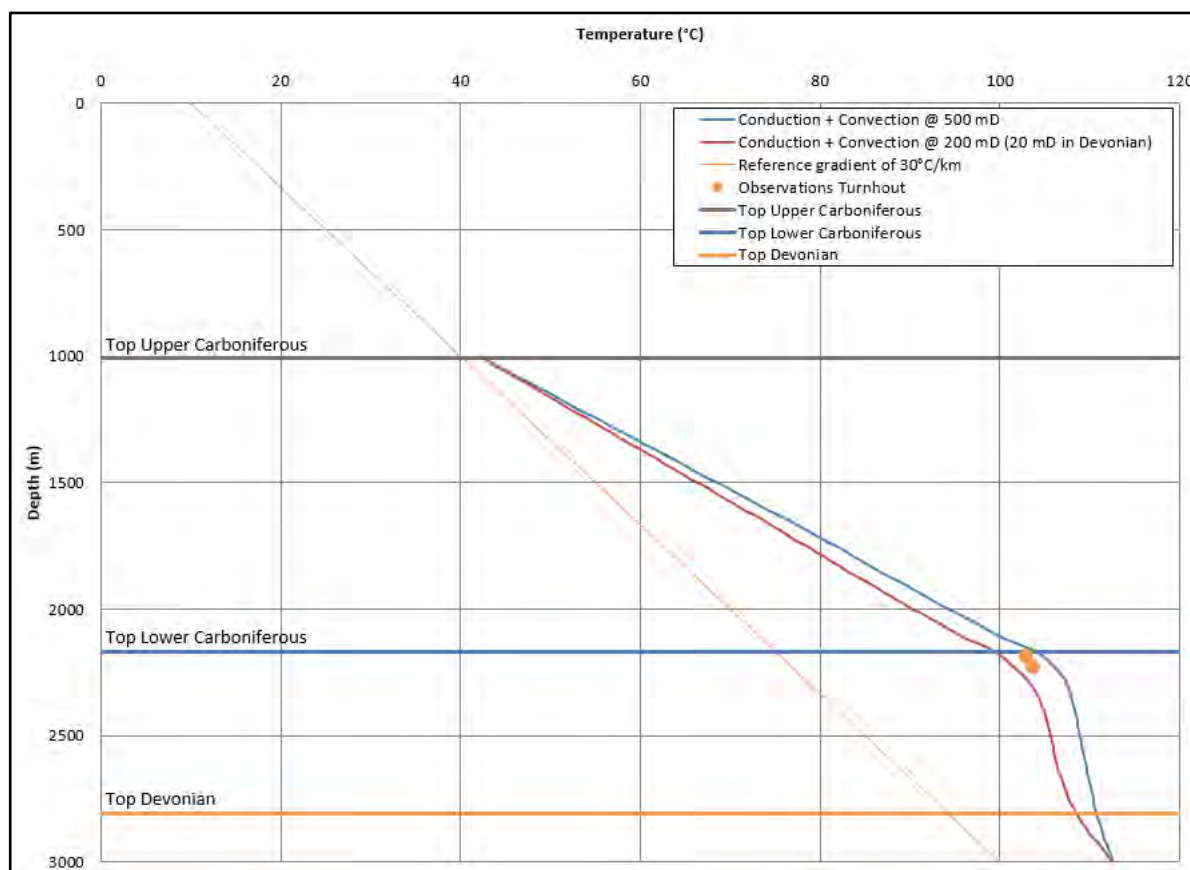
De resultaten (Figuur 34) geven aan dat er in de meest gunstige positie ten opzichte van de convectiecel een anomalie tot +10 tot +11,5°C kan verwacht worden (bij een permeabiliteit van 150 mD). De absolute waarde aan de top loopt hierbij op tot circa 69 à 70,5°C. Halfweg het reservoir, op een diepte van ongeveer 1850 m zou de temperatuur oplopen tot 76,5°C. Aan de basis, op een diepte van 2130 m, heerst een temperatuur van circa 82,1°C.

Bij een permeabiliteit van 200 mD ligt de verhoging iets hoger (+11,9 tot +13,6°C). De resultaten bij 150 mD sluiten echter nauw aan bij de gemeten waarde van 70°C in Merksplas (KB165), waar de situatie wat betreft diepte en dikte zeer vergelijkbaar wordt geacht.

Dezelfde simulaties zijn uitgevoerd voor de locatie in Turnhout (Figuur 35). Hierbij ligt de bekomen temperatuur aan de top in lijn met de gemeten (verhoogde) waarden van ruim 102°C (Grosjean, 1954). Om dit resultaat te bekomen is echter een hogere permeabiliteit vereist, of een convectiecel die dieper reikt (om zo water van hogere temperatuur mee naar boven te brengen).

We moeten hierbij benadrukken dat de gebruikte permeabiliteitswaarden afwijken van de resultaten uit de puttesten en er ook niet wordt vastgehouden aan een dunne zone (circa 50 m) met hoge permeabiliteit. Het is in eerste instantie immers niet de bedoeling om te bewijzen dat er convectie optreedt, wel om na te gaan wat het effect van zulke convectiecel zou zijn en of dit de vastgestelde (verhoogde) temperatuurswaarden zou kunnen verklaren. De conclusie uit de simulaties is dat convectie wel degelijk de vastgestelde anomalie kan verklaren. De simulaties geven ook aan dat eenzelfde effect kan bekomen worden wanneer de permeabiliteit niet homogeen verdeeld is in het

reservoir, maar voorkomt in discrete zones. De vereiste gemiddelde permeabiliteit van 150 mD over 500 m komt daarbij overeen met een transmissiviteit van 75 D.m.



Figuur 35: Temperatuursverloop voor de locatie in Turnhout in het geval van een convectiecel, in verhouding tot de situatie met enkel conductie, de normale regional gradiënt (30°C/km) en de gemeten waarden.

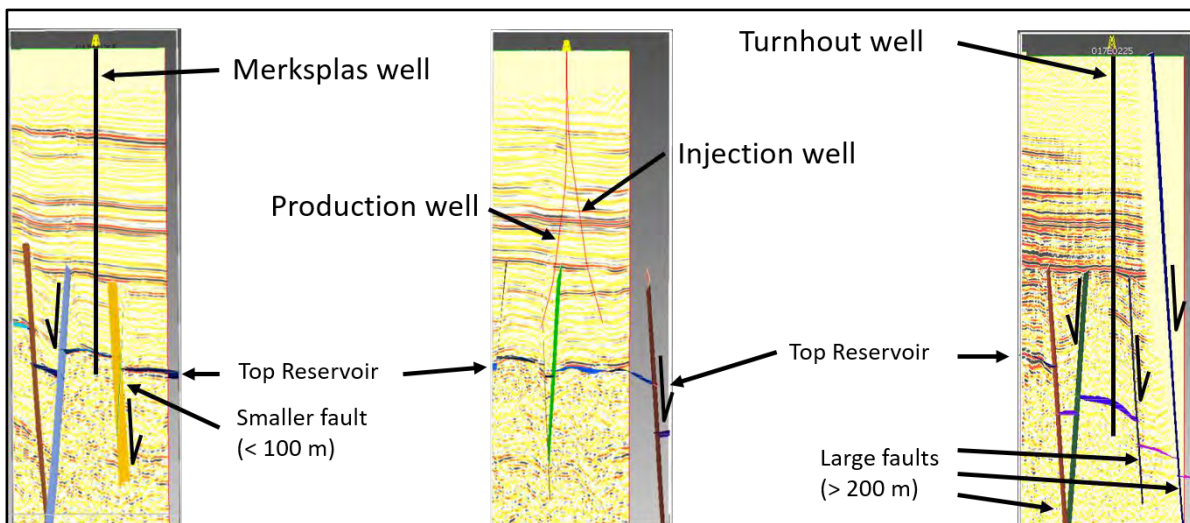
8.1.5. MERKSPLAS OF TURNHOUT?

Voor Merksplas verklaart het conductieve model al grotendeels de temperatuursanomalie en is er slechts een beperkte bijdrage door convectie. In Turnhout en Heibaart lijkt convectie een veel groter effect te hebben op de temperatuur. De reden waarom convectie een grotere impact heeft op de ene locatie en minder op de andere, is nog niet duidelijk.

In Turnhout moet een hogere transmissiviteit (of gemiddelde permeabiliteit) of een diepere convectiecel verondersteld worden om de observaties te verklaren. Dit kan het gevolg zijn van de geologische structuur, de seismische data wijst er immers op een complexe, intern verbrokkelde, koepelvormige structuur nabij een breuk met een grote verplaatsing. In Merksplas daarentegen is de boring gezet op een blok dat intern stabiel lijkt, waarbij de meest nabije breuk een kleinere verplaatsing vertoont dan in Turnhout. Dit zou kunnen wijzen op een iets minder goede connectiviteit of permeabiliteit (verticaal). Hierdoor zou de convectie een beperktere temperatuursanomalie tot gevolg hebben, wat overeenkomt met de waarnemingen.

Afgaande op de seismische lijnen in Beerse en nabij de putten van Merksplas (KB165) en Turnhout (KB120), blijkt dat de locatie in Beerse het nauwst aansluit bij die van Merksplas. De transmissiviteit die verondersteld wordt om de temperatuur in Merksplas te verklaren (75 D.m) lijkt dan ook de

meest logische verwachting voor Beerse. Dit geldt ook voor de te verwachten temperatuurs-anomalie.



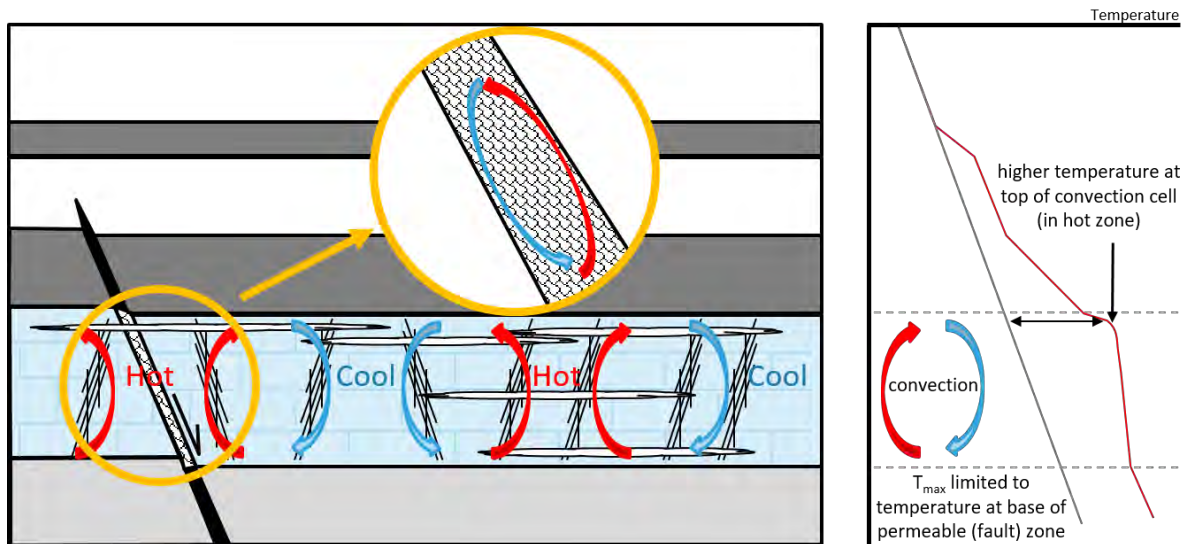
Figuur 36: Vergelijking van de seismische secties langs de locaties in Merksplas (links), Beerse (midden) en Turnhout (rechts). Nabij Turnhout zijn er enkele breuken met een grote verplaatsing, die mogelijk de meer uitgesproken temperatuursanomalie verklaren. De locatie in Beerse sluit meer aan bij die van Merksplas. Merk op dat de puttrajecten voor Beerse (in diepte) zijn geprojecteerd op de seismische sectie (in tijd), vandaar dat het traject niet lijkt overeen te komen met het ontwerp.

8.1.6. TEMPERATUURSANOMALIE IN DE BREUKZONE

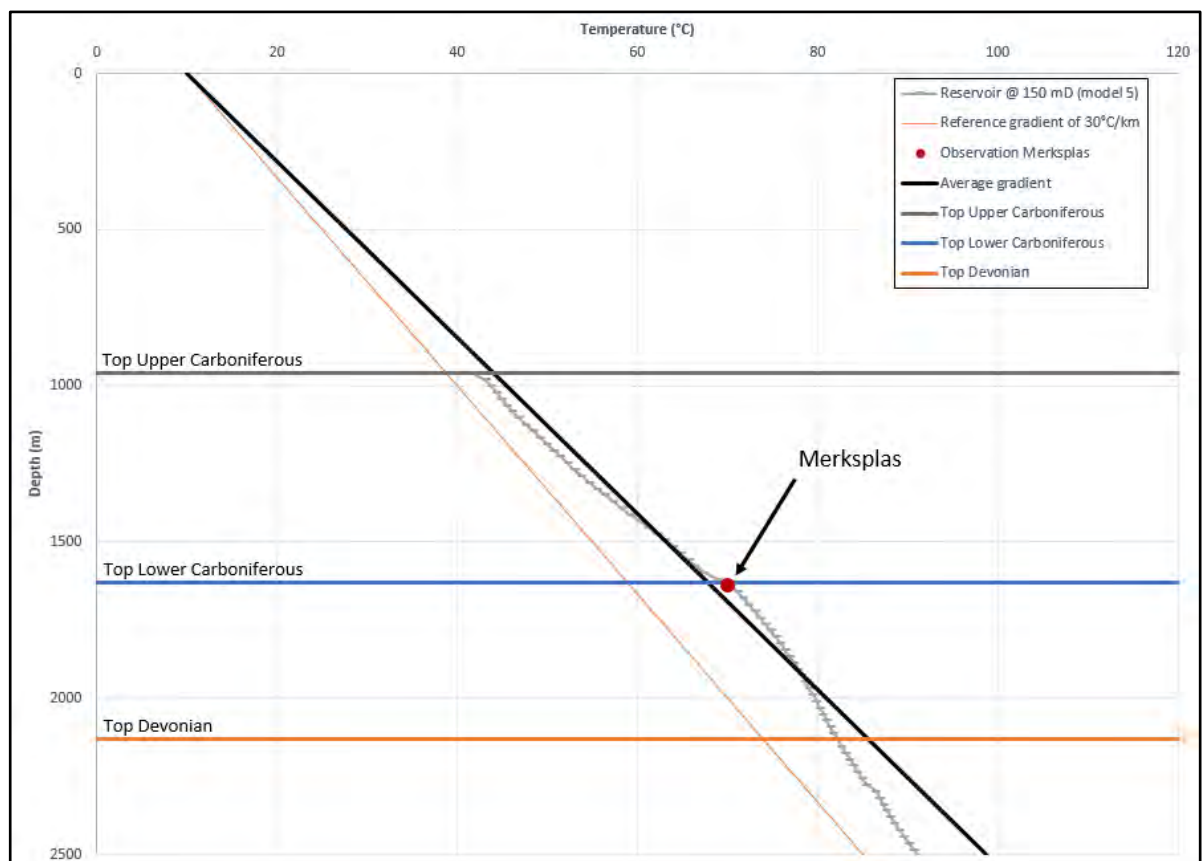
Naast het reservoir op zich is er ook gekeken naar de mogelijke impact van de breukzone op de temperatuur. Het is mogelijk dat er in de Kasterlee breukzone convectie of zelfs opwaartse stroming optreedt waarbij water van grotere diepte en aan hogere temperatuur naar boven komt. Het simuleren van dit proces heeft echter weinig waarde. Het resultaat (temperatuursimpact) is immers sterk afhankelijk van de gemaakte aannames over hoe permeabel de breukzone is en welke afmetingen die heeft, zowel in de breedte als in de diepte. Hoe dieper de breukzone doorloopt, hoe hoger de convectiecel, en hoe hoger de temperatuur van het water dat mee naar boven kan komen. Maar de diepte van de permeabele zone is uiteraard niet gekend. Bovendien zijn er momenteel geen aanwijzingen dat dit nu net gebeurt aan deze breukzone (meer dan aan een andere breuk). Sommige breuken doorheen de kalksteen sequentie (zoals bijvoorbeeld de Tegelen breuk in de put CAL-GT-01, bij Venlo) zijn wel degelijk doorlatend. Daarom is het effect van een doorlatende breukzone binnen het reservoir wel gesimuleerd (Figuur 37). Hiervoor zijn modellen gebruikt in 3D, waarbij een breukzone met een permeabiliteit van 1000 mD verticaal doorheen het reservoir snijdt. Het reservoir op zich heeft in de simulaties een permeabiliteit van 200 mD.

De resultaten tonen aan dat er in de permeabele breukzone wel degelijk een verhoogde temperatuur kan voorkomen, maar enkel bovenaan. De verhoging wordt kleiner naar onder toe. In de onderste helft van de breukzone is er zelfs een iets lagere temperatuur dan in het reservoir zelf. De maximale temperatuur die bereikt wordt blijft steeds gelimiteerd tot de temperatuur aan de basis van de sequentie.

We kunnen besluiten dat een permeabele breukzone doorheen het reservoir niet tot een significante verhoging van de temperatuur leidt. Dit zou wel het geval kunnen zijn indien de permeabele zone verder doorloopt in de diepte, maar hiervoor zijn momenteel geen aanwijzingen. Er zijn dan ook geen argumenten om een hogere temperatuur te postuleren.



Figuur 37: Schematische weergave van het voorkomen van convectie in het reservoir en in een breukzone, en het effect op de temperatuursgradiënt in de ondergrond (gunstige positie).



Figuur 38: Op basis van het temperatuursprofiel bij simulaties met een gemiddelde permeabiliteit van 150 mD is een gradiënt afgeleid van 35,5°C/km. De trendlijn vertrekt van een oppervlakte-temperatuur van 10°C.

8.1.7. GEBRUIKTE GRADIËNT IN BEREKENINGEN

Naargelang het project meer vorm kreeg, is ook de target diepte aangepast. In eerste instantie werd gemikt op permeabele zones aan de basis van het reservoir, nabij de Kasterlee breukzone. Dit kan echter pas bevestigd worden na het boren en testen van de productieput. In het huidige voorstel gaan het putontwerp en het testprogramma er van uit dat er water wordt onttrokken uit de volledige sequentie. Vandaar dat een gemiddelde gradiënt moet worden bepaald tot halfweg het reservoir. Voor het bepalen van de gemiddelde gradiënt zijn de resultaten genomen uit de simulaties (convectie) bij een gemiddelde permeabiliteit van 150 mD over het interval van 500 m (transmissiviteit van 75 D.m). Bij deze permeabiliteit komt de resulterende temperatuursanomalie overeen met de gemeten waarden in Merksplas (KB165).

De temperatuurswaarden voor het ganse interval zijn gebruikt om een trendlijn te bepalen, vertrekkende van een temperatuur van 10°C aan het oppervlak. Het resultaat is een gemiddelde (of equivalente) gradiënt van 35,5°C/km (Figuur 38).

8.2. EVALUATIE VAN HET FORMATIEWATER

8.2.1. SAMENSTELLING

Normaal gesproken neemt het zoutgehalte van diep grondwater toe met de diepte. Als gevolg hiervan is het te verwachten dat ook het water in het Dinantiaan aquifer onder de onderzoekslocatie te Beerse zout zal zijn. In de nabijgelegen put in Merksplas is de samenstelling van het water geanalyseerd (Vandenberghe et al., 2000).

De resultaten van deze analyses (Tabel 13) laten zien dat het water van het type Na-Ca-Cl is (natrium-calcium-chloride). Het totale zoutgehalte (*Total Dissolved Solids*) ligt tussen 125 en 150 g/l. Als gevolg van het zoutgehalte heeft het water een densiteit van 1,067 g/cm³ bij een temperatuur van 70°C (Vandenberghe et al., 2000), en 1,096 g/cm³ bij 15°C.

Ook op andere locaties werd de samenstelling van het water geanalyseerd. Alle resultaten wijzen op een NaCl-rijke pekel met een pH tussen 6 en 6,5. In Turnhout ligt de saliniteit tussen 130 en 134 g/l (Gulinck, 1956; Delmer, 1962).

In de berekeningen is een mediane waarde van 134.000 ppm genomen, met een minimum van 100.000 en een maximum van 165.000 ppm. Hierbij is de spreiding iets ruimer genomen en is de mediane waarde gelijk aan die in Turnhout.

Naast het zoutgehalte is ook het gehalte aan gas (in oplossing) van belang voor de materiaalkeuze en latere operationele parameters. In Merksplas werd het gehalte aan opgelost gas bepaald (Vandenberghe et al., 2000). Voor stalen genomen op diepte ligt de gas/water verhouding tussen 0,71 en 1,62. Tijdens de productietest werd een verhouding van 0,44 gemeten. De samenstelling van het gas is voornamelijk CO₂ (circa 90%), met ook nog 4-5% CH₄ en 5-6% N₂.

8.2.2. AQUIFERDRUK

De putten in de regio tonen aan dat het statisch waterniveau van het reservoir enkele tientallen meter onder maaiveld staat. In Turnhout had het water een stijghoogte 76 m onder maaiveld, in Loenhout ligt dat rond 34 m onder maaiveld (Vandenberghe & Bouckaert, 1980). Voor de put in Merksplas leidden Vandenberghe et al. (2000) een waterniveau in rust af van circa 66 m onder maaiveld. Dit is in overeenstemming met de drukmeting van 161,9 bar op een diepte van 1608 m, rekening houdend met een densiteit van het water van 1,07 g/cm³.

Voor de simulaties werd een hydrostatische druk in het reservoir genomen van 170 bar. De drukwaarde voor iedere cel in het model werd bepaald volgens onderstaande formule:

$$P = 0.1013 + 0.102 \times z$$

Tabel 13: Resultaten van de analyse van de chemische samenstelling van het formatiewater in het Dinantiaan uit de put in Merksplas (Vandenberghe et al., 2000). Alle waarden zijn weergegeven in mg/l. Analyse 1 is uitgevoerd door Tessenderlo Chemie (water afkomstig van de uitgang van de gas separator); Analyse 2 is gedaan door het Studie Centrum voor Kernenergie (SCK-CEN) (water uit een gesloten testsysteem); Analyse 3 en 4 zijn uitgevoerd door Flopetrol (waterstalen genomen op diepte).

	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Analyse 4
Na⁺	39190	41000	33500	38400
K⁺	1940		1790	1820
Ca²⁺	8000	7400	10100	9580
Mg²⁺	1700	1000	970	943
Fe²⁺		35	4.1	0
Fe³⁺	16	< 0.1	36.2	3.12
Mn²⁺		1	4.51	3.01
Ba²⁺		1.5	3.08	9.78
Si	< 10			
HSiO₃⁻		44		
SiO₃²⁻			46.6	47.2
Cl⁻	78460	81000	70900	71250
SO₄²⁻	708	670	652	700
HCO₃⁻		839	350	427
NH₄⁺			174	168
Total solids	126	142	137.5	147.75

Tabel 14: Zoutgehalte van het water (in ppm) zoals gemeten op monsters afkomstig uit verschillende boringen.

Boring	Diepte	Formatie	Saliniteit
Merksplas	> 1600	Kolenkalk Groep	126000 – 147750
Turnhout	2174 – 2220	Kolenkalk Groep	130000 – 134000

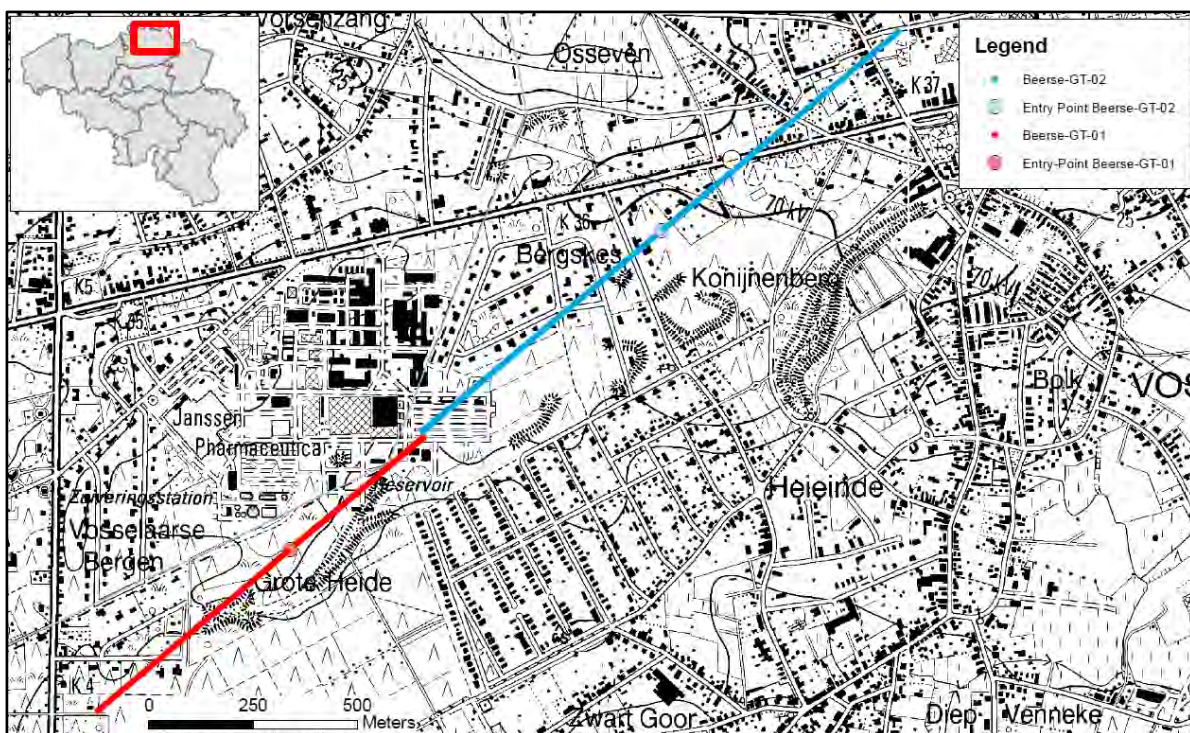
Tabel 15: Gekozen waarden voor de saliniteit van het formatiewater.

Minimum	Gemiddeld	Maximum
100000	134000	165000

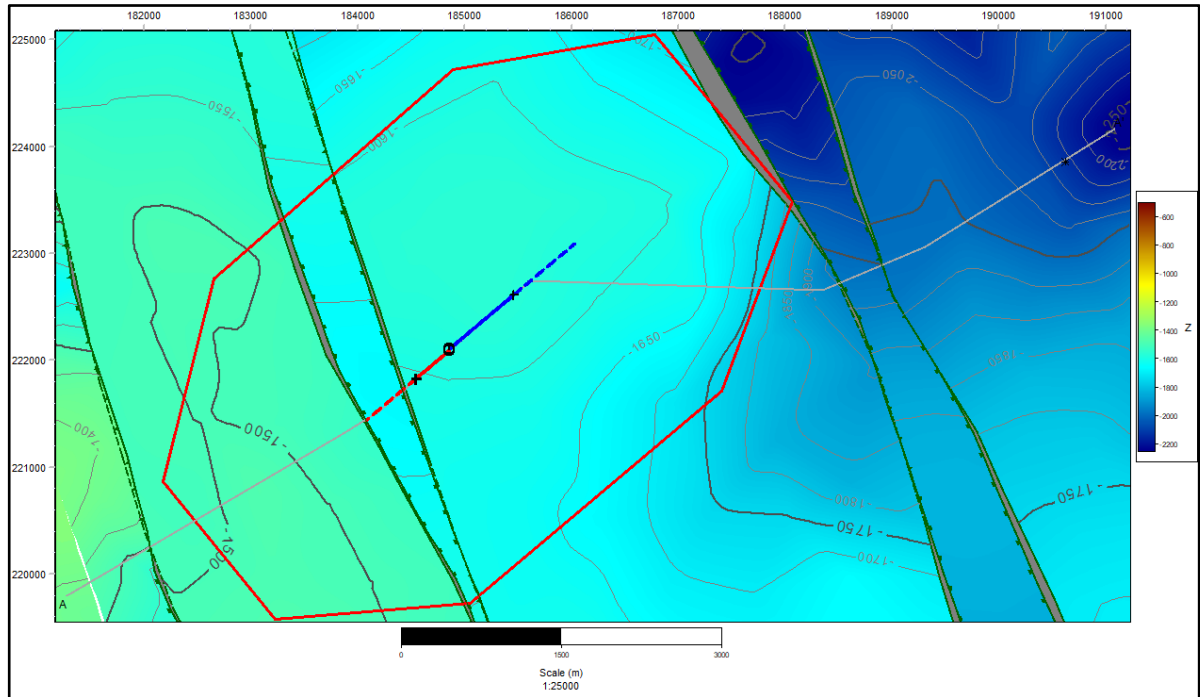
HOOFDSTUK 9. DOUBLET BESCHRIJVING

9.1. DOUBLET CONFIGURATIE IN DE ONDERGROND

Zowel de productie- als de injectieput worden geboord vanop de site van Janssen Pharmaceutica in Beerse. De productieput (Beerse GT-01) wordt gedeveerd naar het zuidwesten, terwijl de injectieput (Beerse GT-02) naar het noordoosten wordt geboord. De productieput mikt hierbij zowel op permeabele zones hogerop in het reservoir als op productieve zones in en nabij het Kasterlee breuksysteem. De puttrajecten zijn hieronder aangeduid op kaart (Figuur 39 en Figuur 40), en in profiel (Figuur 41).



Figuur 39: Kaart met aanduiding van de puttrajecten. De productieput (GT-01) wordt naar het zuidwesten gedeveerd, de injectieput (GT-02) naar het noordoosten.



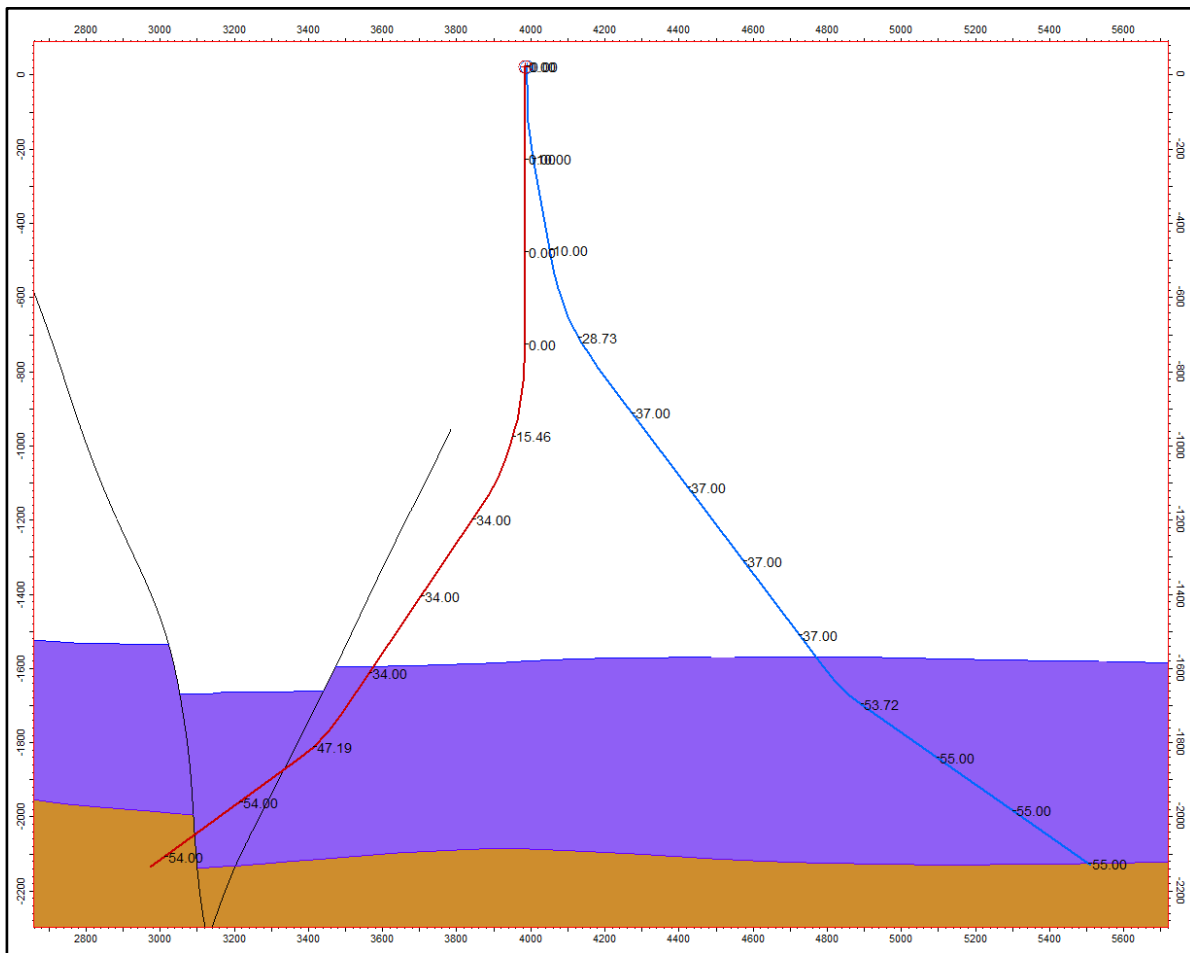
Figuur 40: De puttrajecten voor Beerse GT-01 (rood) en Beerse GT-02 (blauw) uitgezet ten opzichte van de diepte van de top van het reservoir (m onder TAW). De kruisjes geven de positie van het doorpriekpunt weer voor iedere put.

Tabel 16: Ruimtelijke coördinaten van de beoogde doellocaties en oppervlaktelocaties van de putten (in Lambert 1972 coördinaten).

Positie	X coördinaat	Y coördinaat
Oppervlaktelocatie productieput	184857	222092
Doorpriekpunt aquifer productieput	184524	221828
TD productieput	184084	221443
Oppervlaktelocatie injectieput	184858	222108
Doorpriekpunt aquifer injectieput	185462	222621
TD injectieput	186023	223086

Omwille van hun deviatie doorsnijden de putten het reservoir onder een hoek, waardoor de sectie in het reservoir iets langer is. Dit heeft een impact op de stroming vanuit het reservoir naar de put toe. Om dit effect mee in rekening te brengen, wordt een skin waarde bepaald en mee gebruikt bij de berekening.

De productieput doorsnijdt het reservoir met een deviatiehoek van circa 54°. Bij de injectieput is dit iets minder en wijkt de put 37° af van verticaal. Afhankelijk van het juiste punt van vergelijking liggen de beide putten in het reservoir op een afstand van ruim 1720 m van elkaar (circa 1200 m aan de top van het pakket). De tussenafstand is bepaald rekening houdende met een gemiddelde dikte van het reservoir van 500 m, vertrekkende vanaf de diepte van de top van het pakket zoals aangeboord in iedere put.



Figuur 41: Dwarsdoorsnede met weergave van de boortrajecten voor productie- (rood) en injectieput (blauw). Bron: Erdwerk, 2018.

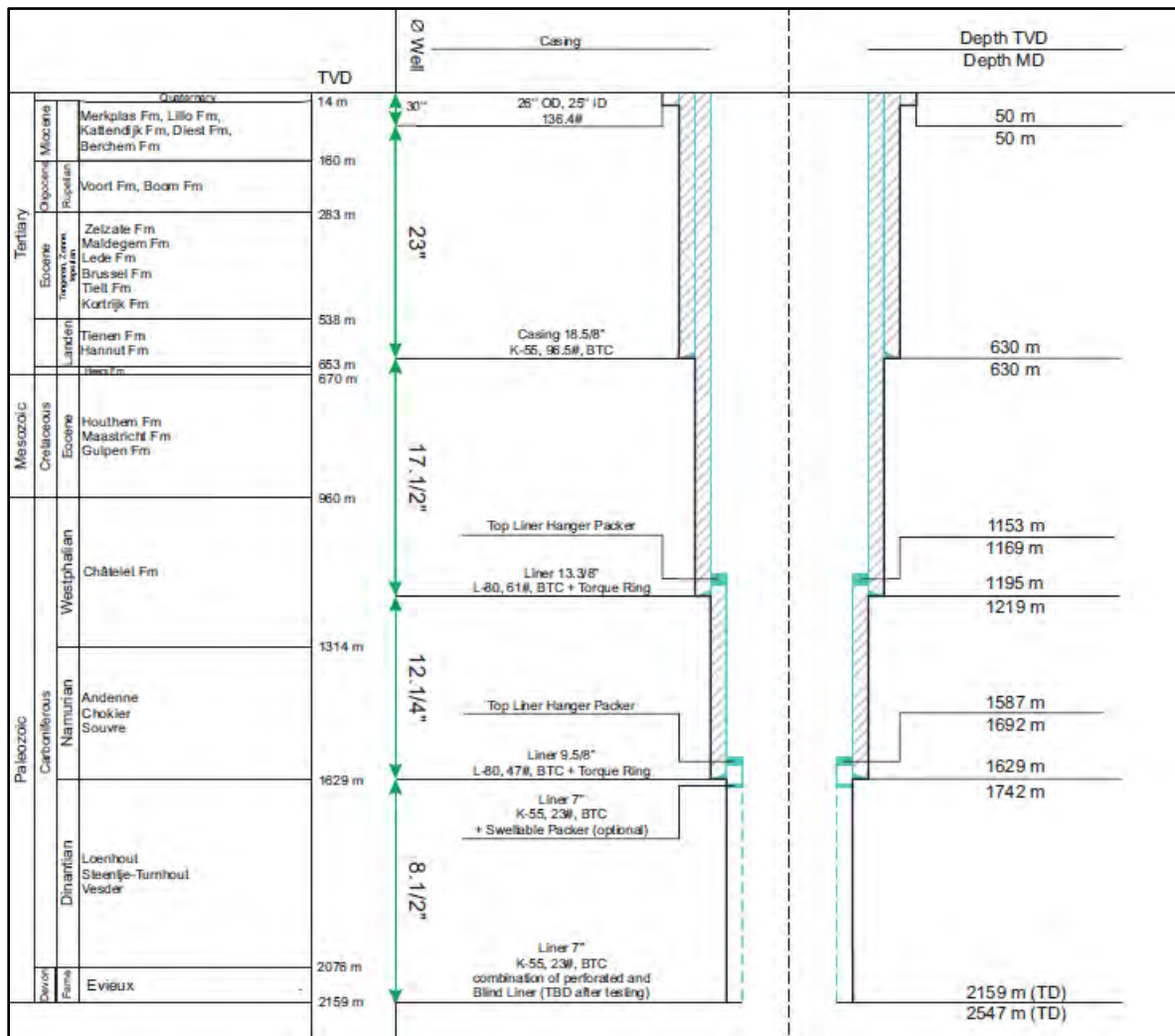
9.2. PUTARCHITECTUUR

Het putontwerp is opgesteld door Erdwerk GmbH in opdracht van Janssen Pharmaceutica. Voor beide putten zijn vier secties voorzien. Onder de geleidingsbuis (tot 50 m) volgt er een eerste boorsectie (23") tot in het onderste deel van de Paleogene formaties. Hier komt een *casing* in van 18 5/8". De tweede sectie wordt geboord met een diameter van 17 1/2", tot in het steenkoolterrein. Hier komt een *casing* in van 13 3/8". Vervolgens wordt er geboord tot net boven de top van de Kolenkalk Groep. Deze sectie heeft een diameter van 12 1/4", waarbij er een *liner* geplaatst wordt van 9 5/8". De laatste sectie wordt geboord in de Kolenkalk Groep aan 8 1/2". De putten gaan tot in de top van het Devoon (Evieux Formatie). Indien er indicaties zijn dat er bovenaan reeds voldoende permeabiliteit is, kan besloten worden om de injectieput eerder te stoppen en niet het volledige pakket te doorboren.

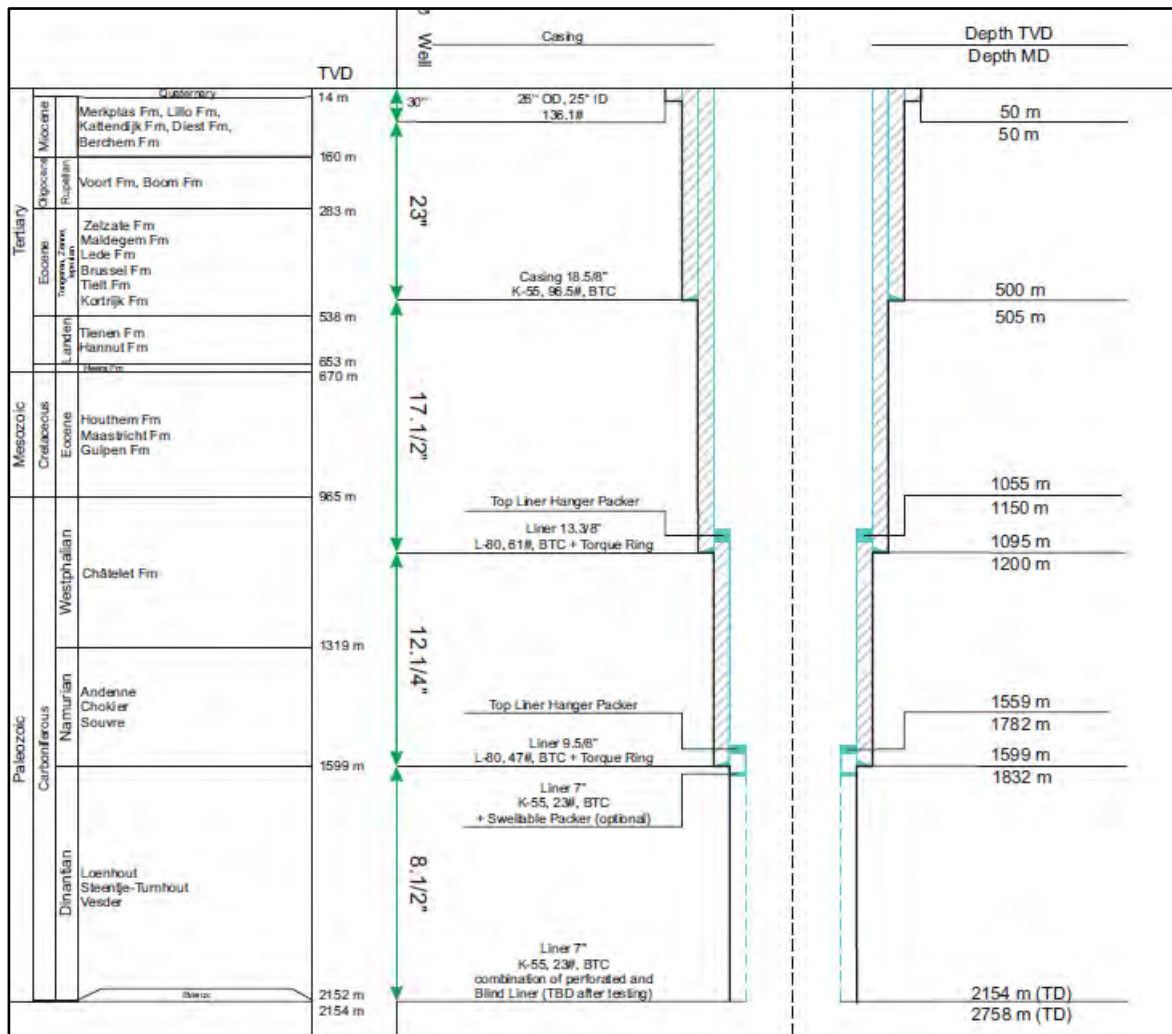
Voor de afwerking van deze diepste sectie wordt een geperforeerde 7" *liner* geplaatst. De *liner* wordt echter pas geplaatst na afronding van de testfase. De positie en diepte van de geperforeerde secties (versus dichte secties – *blind liner*) wordt bepaald op basis van de gegevens bekomen tijdens de boring, boorgatmetingen en de testfase.

Voor de productieput zijn er nog twee alternatieven mogelijk wat betreft de diepte van de 17 1/2" sectie.

Janssen Pharmaceutica heeft een testprogramma opgesteld, rekening houdend met de aanwezigheid van NORM in het formatiewater en met de bovengrondse beperkingen voor opslag van het testwater. Het programma wordt toegelicht in bijlage.



Figuur 42: Ontwerp voor de productieput Beerse GT-01 (Erdwerk 2017). De 7" liner wordt pas geplaatst na afloop van de testfase.



Figuur 43: Ontwerp voor de injectieput Beerse GT-02 (Erdwerk 2017). De 7" liner wordt pas geplaatst na afloop van de testfase.

9.3. OPERATIONELE INSTELLINGEN

De instellingen zoals opgegeven voor de berekeningen in DoubletCalc zullen verschillen van de uiteindelijke uitvoering zoals die gebruikt zal worden tijdens de operationele fase. Dit heeft te maken met enerzijds het feit dat de reservoir eigenschappen nog niet precies genoeg gekend zijn, en anderzijds met de opzet van het testprogramma. Het testprogramma houdt immers zowel een korte als een langdurige test in. Zoals hogerop beschreven zijn de individuele puttesten slechts beperkt in de tijd en is er voor een airlift test gekozen. Dit is dus sowieso verschillend van de uiteindelijke operationele fase.

De hier opgegeven zijn wel realistische waarden, te verwachten waarden, die de finale instellingen benaderen. De finale parameters zullen vastgelegd worden op basis van de puttesten, zowel van korte als van lange (doublettest) duur. Belangrijk hierbij is wel dat wanneer na afloop en analyse van een puttest het gehaalde thermisch vermogen wordt herberekend (en geëvalueerd of de put succesvol is of niet), dezelfde parameters worden gebruikt als bij de voorafgaande inschatting van de verwachtingen (in het huidige rapport). Dit geldt zowel voor de pompspecificaties als voor de lengte en diameter van de opvoerbuizen.

De keuze voor de retourtemperatuur van 55°C wordt hieronder eveneens toegelicht.

9.3.1. POMPGEGEVENS

Er kan in de uiteindelijke installatie (in de operationele fase) zowel een productiepomp als een injectiepomp geplaatst worden, afhankelijk van het nodige drukverschil, en na optimalisatie naar COP en pompvermogen. De finale diepte waarop de pomp zal afgehangen worden, de efficiëntie en het opgelegde drukverschil (in combinatie met een eventuele injectiepomp) zijn nog niet gekend. Dit zal pas beslist worden aan de hand van de informatie bekomen tijdens de puttesten en de langdurige doublettest, aangezien de instellingen afhankelijk zijn van de productiviteit en injectiviteit van de putten.

Voorlopig wordt er in de berekeningen gewerkt met een (gecombineerde) opvoerdruk van 60 bar, waarbij dus zowel productie- als injectiepomp vervat zitten. In het uiteindelijke systeem kan de productiepomp (of in combinatie met de injectiepomp) voor een drukverschil zorgen dat groter (of kleiner) is dan 60 bar. Bij een hoger drukverschil zal uiteraard ook het vereiste pompvermogen toenemen. Op dit moment is nog geen afzonderlijke injectiepomp gepland.

De productiepomp kan afgehangen worden op een diepte van circa 500 m onder maaiveld. De binnendiameter van de put (13 $\frac{3}{8}$ " casing) volstaat hiervoor. De pomp wordt zo ook gehangen in het verticale deel van de put. Het putontwerp laat hier echter nog ruimte voor enige flexibiliteit, in de ontwerpfase is rekening gehouden met een maximale diepte van 600 m.

Er wordt een efficiëntie van 70% vooropgesteld. De werkelijk gerealiseerde waarden zullen echter afhangen van het ontwerp van de pomp in combinatie met het opgelegde drukverschil, het debiet en de temperatuur.

Tijdens de puttest zal nog geen ESP geïnstalleerd worden, maar zal gebruik gemaakt worden van *airlift*. Hierbij zal de buis voor aanvoer van lucht tot op een diepte van circa 400 m geplaatst worden, waarbij een initiële druk van zo'n 35 bar verwacht wordt.

9.3.2. OPVOERBUIZEN

De lengte van de opvoerbuis (tubing) in de productieput zal afhangen van de diepte waarop de pomp wordt geplaatst. Er wordt in het ontwerp uitgegaan van een diameter van 8 $\frac{5}{8}$ " (40 lb/ft).

Voor de injectieput is nog geen injectiebuis vastgelegd. De verwachting is dat er een buis van circa 100 m nodig zal zijn, met een diameter tussen 9 $\frac{5}{8}$ " en 10 $\frac{3}{4}$ ". Voorlopig is in de berekening een binnendiameter van 9,5 aangehouden.

9.3.3. RETOURTEMPERATUUR

Een belangrijke (niet-geologische) parameter bij het bepalen van het vermogen van een geothermisch doublet is temperatuur van het geïnjecteerde water. De reële retourtemperatuur van een geothermisch doublet is afhankelijk van de uitkoeling die kan gerealiseerd worden, en dus van de bovengrondse installaties.

Sinds enige tijd is er een proces gestart waarbij het bestaande warmtenet en de installaties op de site van Janssen Pharmaceutica worden omgebouwd van een hoge naar een lage temperatuur. Deze wijzigingen vergen echter veel tijd en zullen nog verder plaatsvinden in de komende jaren (circa 15 jaar). De te realiseren uitkoeling en retourtemperatuur zullen hierdoor veranderen en in de volgende jaren dalen. Niet alleen is er op dit moment nog geen precieze waarde gekend, de waarde zal ook dalen doorheen de tijd, tijdens de operationele fase van het doublet.

Daarom is voor de berekeningen in DoubletCalc een arbitraire waarde van 55°C aangehouden, wat overeenkomt met een temperatuursprong van ongeveer 20°C. Deze waarde ligt hoger dan de verwachte retourtemperatuur, en de ambitie is om uiteindelijk een uitkoeling te realiseren tot onder de 40°C.

De waarde van 55°C kan gebruikt worden om het thermisch vermogen van het doublet in te schatten. Vervolgens zullen de prestaties van de putten (op basis van de pomptesten) afgetoetst worden, gebruik makende van dezelfde waarde (55°C).

Deze werkwijze verzekert dat het resultaat bepaald wordt door de geologische parameters (de eigenschappen van de ondergrond) en dat dit niet wordt beïnvloed door de bovengrondse installaties. De bedoeling is immers om net een inschatting te maken van het vermogen rekening houdend met de geologische onzekerheid (risico), zeker in een verzekeringscontext. De bovengrondse aspecten staan hier los van.

Op deze manier is het nu ingeschatte vermogen (P_{90}) echter verschillend van het thermisch vermogen dat uiteindelijk zal gerealiseerd kunnen worden op de site.

9.4. INDICATIE EN EVALUATIE VAN AANDACHTSPUNTEN BIJ BOREN

Er zijn verscheidene aandachtspunten tijdens het boren van de putten. De risico's en de mitigerende maatregelen om deze te voorkomen of te beheersen worden meer in detail toegelicht in de technische documenten voor de boringen. Hieronder volgt slechts een selectie van de belangrijkste aandachtspunten.

→ Doorboren van grondwatervoerende lagen (drinkwater)

De zandrijke formaties in de top 100-200 m zijn watervoerend (drinkwater). Hier bestaat het risico dat verschillende aquifers met elkaar in contact zouden kunnen komen, en dat er uitwisseling zou zijn tussen het grondwater en de vloeistof in de put.

In beide putten zal, nog voor het Krijt aangeboord wordt, een eerste casing (18 5/8") geplaatst en gecementeerd worden. Een goede cementering is hierbij van belang. Hiertoe moet het volume van de put goed bepaald worden (bijvoorbeeld omwille van uitspoelingen).

→ Zwellende kleien

Zowel in de Formatie van Boom als in de Ieper Groep komen kleien voor die zouden kunnen reageren met water en gaan zwellen. Om dit op te vangen moet de boormodder goed geconditioneerd worden en moeten er *wiper trips* uitgevoerd worden indien nodig om de put vrij te houden.

→ Zones met verhoogde poriëndruk (*overpressured zones*)

Er worden geen formaties verwacht waar de poriëndruk meer dan hydrostatisch is.

→ Zones met minder dan hydrostatische druk (*underpressured zones*)

Er zijn meerdere formaties waar een minder dan hydrostatische druk geanticipeerd wordt. Dit is o.a. het geval voor de Miocene zanden en de Lede Formatie. Zowel in het Krijt als in de kalksteen van het onder Carboon bestaat de mogelijkheid dat er zich significante of zelfs volledige spoelingsverliezen voordoen in karstzones. In het Krijt kan dit opgevangen worden door de dichtheid van de boormodder te verlagen, LCM⁵ te gebruiken om de verliezen te stoppen en desnoods cement pluggen te plaatsen. Bij het boren in het Onder Carboon kan overgegaan worden tot het boren met zoet water (lage

⁵ LCM: Lost Circulation Material

densiteit). LCM kunnen eventueel gebruikt worden, maar dan wel materiaal dat oplosbaar is, zodat het nadien weer kan verwijderd worden.

→ **Gasvoorkomens**

Gas zou kunnen voorkomen in het steenkoolterrein. Om dit te controleren worden standaard maatregelen genomen om te vermijden dat er een influx is vanuit de formatie naar de put. De boorparameters worden hierop afgestemd, de *trip* snelheid moet beperkt worden, er moet voldoende circulatie zijn en indien nodig kan de densiteit van de boormodder verhoogd worden. Er wordt wel verwacht dat gas aanwezig is in oplossing, zowel in het steenkoolterrein als in het reservoir.

→ **Breuken waar spoelingsverliezen kunnen optreden**

In het Onder Carboon kunnen zich spoelingsverliezen voordoen wanneer de Kasterlee breukzone doorboord wordt. Dezelfde maatregelen als hierboven kunnen aangewend worden.

→ **Hardere lagen**

Hardere lagen kunnen voorkomen in de Formatie van Boom (kalkconcreties), het Krijt (kalkareniet met chert) en sterk gecementeerde zandsteenbanken in het onderste deel van het steenkoolterrein. Dit kan opgevangen worden door een adequate keuze van materieel, boorparameters en de samenstelling van de stangentrein. Goed uitboren (naboren) van de put is van belang om te voorkomen dat er vernauwingen ontstaan.

9.5. INDICATIE EN EVALUATIE VAN AANDACHTSPUNTEN BIJ PRODUCTIE EN INJECTIE

→ **NORM**

In lijn met de resultaten van het project in Merksplas, wordt verwacht dat het geproduceerde formatiewater stoffen zal bevatten die onder de NORM wetgeving vallen. De geldende regels hiervoor zullen dus in acht moeten genomen worden bij o.a. het onderhoud van de installatie. Verdere gegevens hierover zullen verzameld worden tijdens putttesten en doublet testen, waardoor aanpassingen of toevoegingen gedaan kunnen worden aan procedures.

→ **Maximale injectiedruk & seismiciteit**

De resultaten van de put- en doublettesten zullen aangeven welke injectiedruk nodig is in functie van het debiet. Het maximale operationele debiet zal bepaald worden door de maximale druk (of drukgradiënt). De gegevens uit de boring zullen aangewend worden om die maximale drukgradiënt te bepalen en een bovengrens vast te leggen zodat op veilige wijze geïnjecteerd kan worden rekening houdend met de stabiliteit van de put en het nevengeesteente.

Het risico op geïnduceerde seismiciteit zal geëvalueerd worden, waarbij de verwachte drukimpact rondom de put een eerste indicatie zal geven (rekening houdend met de afstand tussen de injectieput en de Kasterlee breukzone).

Er wordt momenteel gewerkt aan een plan voor de monitoring (zoals vereist), waarbij minstens 3 (mogelijk 4) meetpunten in een boorgat komen, samen met een bovengronds meetpunt.

→ **Scaling & corrosie**

De vorming van neerslagen en het voorkomen van corrosie zijn mogelijk afgaande van gegevens en resultaten uit de boringen in Turnhout en Merksplas. Tijdens de put- en doublettesten zal bijkomende informatie verzameld worden over de samenstelling van het water. Deze informatie zal bepalend zijn voor de keuze van het materiaal van de installaties, de meest gepaste inhibitor, onderhoudsprocedures en dergelijke.

→ **Interferentie met andere activiteiten (bv gasopslag in Loenhout)**

De locatie van het doublet bevindt zich nog net binnen de veiligheidszone rondom de ondergrondse gasopslagsite van Loenhout (maar wel buiten de concessies). Er zijn reeds contacten geweest met de uitbater van de opslag (Fluxys NV). Dit heeft geleid tot de uitwisseling van informatie en het opstellen van modellen om de wederzijdse beïnvloeding na te gaan. Het uitbaten van het geothermisch doublet zal een beperkte drukimpact hebben op de gasopslag. Er zijn afspraken gemaakt tussen Janssen Pharmaceutica en Fluxys over het verdere verloop van het project en de opvolging ervan.

REFERENTIES

- Arup, 2015a. Technical due diligence review of geothermal reservoir study – Beerse geothermal energy project, Belgium. 38p.
- Arup, 2015b. Beerse geothermal energy project – Review of estimated production rates. 3p.
- Arup, 2017. Beerse Geothermal Project. Limit of influence from proposed geothermal system. 15p.
- Bos S. & Eggenkamp H., 2013. Haalbaarheidsonderzoek naar de mogelijkheden voor diepe geothermie op de site van Janssen Pharmaceutica te Beerse. VITO rapport 2013/ETE/R/283, 58p.
- Bos S., Broothaers M., Harcouët-Menou V. & Loveless S., 2015. Reservoir modeling of a geothermal doublet in the Carboniferous limestones on the location of Janssen Pharmaceutica in Beerse. Impact on pressure, temperature and system configuration. VITO rapport, 62p.
- Bos S. & Laenen B., 2017. Development of the first deep geothermal doublet in the Campine Basin of Belgium. *European Geologist* 43, 16-20.
- Bouckaert J., Vandenberghe N., Voets R. & Duser M., 1987. Boring Poederlee – 30W/371 – DzP1. BGD rapport, 37p.
- Delmer A., 1962. Coupes des sondages du Bassin Houiller du Nord de la Belgique. Sondage de Turnhout (n° 120). *Annales des Mines de Belgique* 1962/2: 101-138.
- Dreesen R., Bouckaert J., Duser M., Soille J. & Vandenberghe N., 1987. Subsurface structural analysis of the late-Dinantian carbonate shelf at the northern flank of the Brabant Massif (Campine Basin, N-Belgium). *Toelichtende Verhandelingen voor de Geologische en Mijnkaarten van België (Memoirs of the Geological Survey of Belgium)*, 21, 37p.
- Dreesen R. & Laenen B., 2010. Technology watch: geothermie en het potentieel in Vlaanderen. VITO rapport 2010/SCT/R/001 in opdracht van ALBON, 72p.
- Duser M. & Lagrou D., 2008. Paleokarst-enhanced reservoir for geothermics and gas storage in Carboniferous limestone (Campine Basin, NW European Carboniferous Basin). In Sasowsky I.D., Feazel C.T., Mylroie J.E., Palmer A.N., Palmer M.V. (eds.), *Karst from recent to reservoirs: Special Publication 14*, Karst Waters Institute, Leesburg Virginia, 43-51.
- Grosjean A., 1954. Mesures de température aux profondeurs de 2.185 et 2.225 m dans le sondage de Turnhout (Campine belge). *Bulletin de la Société belge de Géologie*, Tome LXIII, Fasc. 1: 69-73.
- Gulinck M., 1956. Caractéristiques hydrogéologiques du sondage de Turnhout. *Communication de l'Observatoire Royal de Belgique*, n° 108, série Géophysique, n° 37, p. 1-6.
- Harcouët-Menou, V., 2014. Study of the possible interference between the gas storage in Loenhout and a geothermal project in Beerse. VITO rapport 2014/ETE/R/125, 52p.
- Laenen B., 2003. Lithostratigrafie van het pre-Tertiair in Vlaanderen, deel II: Dinantiaan en Devoon. Studie uitgevoerd in opdracht van ANRE, VITO rapport 2003/ETE/R/095, 90p.

- Laenen B., van Tongeren P., Dreesen R., De Koninck R. & Hildenbrand A., 2005. Re-evaluation of the gas storage potential of the Poederlee structure. VITO rapport 2005/MAT/R/214, 87p.
- Lagrou D. & Duser M., 2003. Dinantian limestones in North Belgium: karst reservoirs for storage of natural gas. In Mijnlief H. (ed.), Core display at the ICCP conference, XVth International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy, Utrecht, August 2003, Abstracts, 606-609.
- Langenaeker V., 2000. The Campine Basin. Stratigraphy, structural geology, coalification and hydrocarbon potential for the Devonian to Jurassic. Aardkundige Mededelingen 10, 1-142.
- Lipsey L., Pluymaekers M., Goldberg T., van Oversteeg K., Ghazaryan L., Cloetingh S. & van Wees J.-D., 2016. Numerical modelling of thermal convection in the Luttelgeest carbonate platform, the Netherlands. Geothermics 64, 135-151.
- Michon L. & Van Balen R.T., 2005. Characterization and quantification of active faulting in the Roer Valley rift system based on high precision digital elevation models. Quaternary Science Reviews 24, 457-474.
- Mijnlief H.F., Obdam A.N.M., van Wees J.D.A.M., Pluymaekers M.P.D. & Veldkamp J.G., 2014. DoubletCalc 1.4 manual. English version for DoubletCalc 1.4.3. TNO rapport 2014 R11396, 54p.
- Muchez Ph., Viaene W., Wolf M. & Bouckaert J., 1987. Sedimentology, coalification pattern and paleogeography of the Campine-Brabant Basin during the Visean. Geologie en Mijnbouw 66, 313-326.
- Muchez Ph. & Langenaeker V., 1993. Middle Devonian to Dinantian sedimentation in the Campine Basin (northern Belgium): its relation to Variscan tectonism. Spec. Publs. Int. Ass. Sediment. 20, 171-181.
- SGS, 2015. Milieueffectrapport – Geothermisch Project Janssen Pharmaceutica Beerse. 338p.
- Steiner U., Scanzoni C. & Mirjolet F., 2016. Geothermal Wells at Beerse GT-01 & GT-02. Detailed planning – well proposal. Erdwerk. 17p.
- Vandenberghe N. & Bouckaert J., 1980. Geologische aspecten van de mogelijkheid tot de aanwending van geothermische energie in Noord-België. Professional Paper 1980/1, nr 168, 21p (excl. figuren).
- Vandenberghe N., Poggiagliolmi E. & Watts G., 1986. Offset-dependent seismic amplitudes from karst limestone in northern Belgium. First Break 4, 9-27.
- Vandenberghe N., Duser M., Laga P. & Bouckaert J., 1988. The Meer well in North Belgium. Toelicht. Verhand. Geologische en Mijnkaarten van België. Nr. 25, 23p.
- Vandenberghe N., Duser M., Boonen P., Lie S.F., Voets R. & Bouckaert J., 2000. The Merksplas-Beerse geothermal well (17W265) and the Dinantian reservoir. Geologica Belgica 3, 349-367.
- VITO, 2012. Verslag boring CAL-GT-01. Beknopt verslag van boring CAL-GT-01 naar aardwarmte, met inbegrip van de pomptesten. M10C8/MB/CALGT01-beknopt, 5p.

Wong T.E., Bathes D.A.J. & De Jager J., 2007. Geology of the Netherlands. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 354p.

BIJLAGE 1: GEDETAILLEERDE LIJST VAN GEBRUIKTE GEGEVENS

Overzicht geraadpleegde diepe boringen, met naam en locatie van de put, diepte, X en Y coördinaten, en of de put is gebruikt voor geologische interpretatie en/of putttest gegevens. Voor de Nederlandse putten zijn de coördinaten opgegeven in RD, behalve de offshore putten. Daarvoor is latitude en longitude opgegeven.

Put	Locatie	Diepte	X	Y	Interpretatie	Putttest
KB35	Geel	1244	194040	207942	V	
KB36	Tongerlo	806	186991	201005	V	
KB37	Noorderwijk	995	182705	202725	V	
KB38	Kessel	704	169096	203659	V	
KB57	Vlimmeren	1028	178390	221333	V	
KB59	Olen	936	187187	208512	V	
KB86	Wijvenheide	1912	217105	187372	V	
KB120	Turnhout	2706	190625	223855	V	V
KB127	Loksbergen	422	199289	180714	V	
KB128	Rillaar	372	187277	184912	V	
KB129	Heibaart	1638	173343	231025	V	
KB131	Halen	1367	202197	181886	V	V
KB132	Booischoot	1330	177651	193309	V	
KB135 (DzH1)	Heibaart	1399	173185	230809	V	V
KB141 (DzH2)	Loenhout	1354	172131	229884	V	
KB149	Meer	2517	177370	237170	V	
KB165	Merksplas	1761	181968	225865	V	V
KB170	Poederlee	1690	182667	212654	V	V
KB202 (DzH14)	Rijkevorsel	1404	175610	227355	V	
KB203 (DzH15)	St-Lenaerts	1390	172063	228544	V	
KB204 (DzH18)	Rijkevorsel	1600	175785	225912	V	
KB210 (DzH26)	Oostmalle	1480	177098	222787	V	
Mol-GT-01	Mol	3610	201783	212961	Nog niet beschikbaar tijdens onderzoek	V
Mol-GT-02	Mol	4341	201791	212962	Nog niet beschikbaar tijdens onderzoek	
Mol-GT-03	Mol	4905			Nog niet beschikbaar tijdens onderzoek	

Put	Locatie	Diepte	X	Y	Interpretatie	Putttest
O18-01	offshore	3051	52,132125°	2,9242167°	V	
S02-02	offshore	2878	51,856039°	3,6089722°	V	
S05-01	offshore	2230	51,792556°	3,5632778°	V	
BHG-01	Brouwershaven se Gat	2907	43455	423528	V	
CAL-GT-01	Horst a/d Maas	2730	203895	381599	Nog niet beschikbaar	V

					tijdens onderzoek	
CAL-GT-02	Horst a/d Maas	1694	203898	381606	Nog niet beschikbaar tijdens onderzoek	
CAL-GT-03	Horst a/d Maas	2977	203901	381613	Nog niet beschikbaar tijdens onderzoek	
KTG-01	Kortgene	1900	47489	399317	V	
RSB-01	Rijsbergen	4645	106485	393476	V	
WDR-01	Woensdrecht	1205	79140	384600	V	

Overzicht geraadpleegde seismische campagnes

Seismische campagne	Jaar	2D/3D	# lijnen	# km	Formaat	Versie
Kempen	1953- 1956	2D	29	1157	seggy (gedigitaliseerd)	Reprocessing 1991
Noordflank Brabant Massief	1980	2D	15	575	seggy (gedigitaliseerd)	
Oostmalle	1981	2D	14	174	seggy	Origineel & reprocessing
Loenhout	1990	2D	22	126	seggy	
Loenhout	1991	2D	14	75	seggy	
Mol-Herentals	2010	2D	4	68	seggy	

Kaarten zijn reeds opgenomen in de tekst.

BIJLAGE 2: RESULTATEN EN DETAILS VAN DE PETROFYSISCHE EVALUATIE EN FORMATIEWATERANALYSE

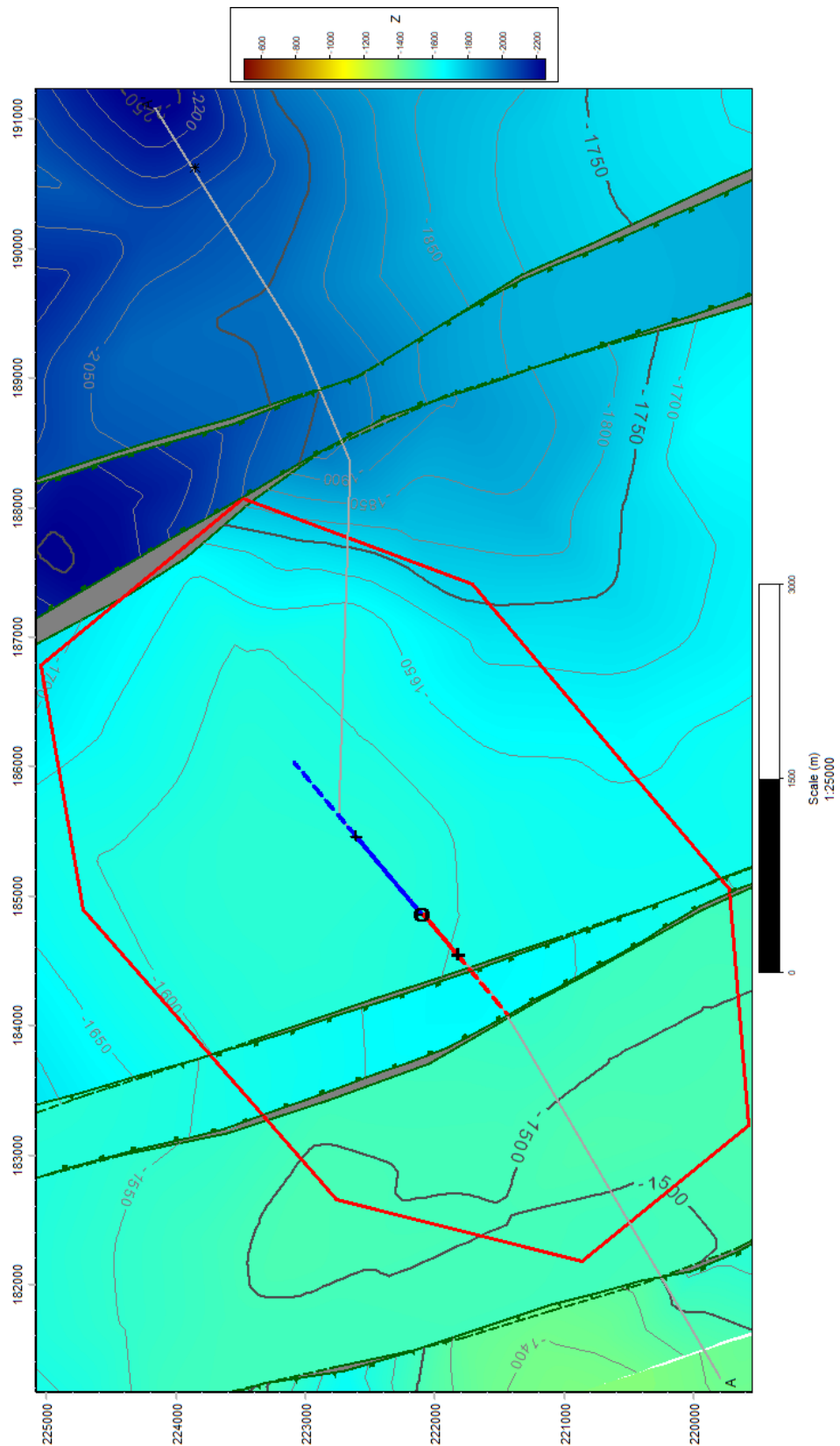
Niet van toepassing

BIJLAGE 3: LIJST VAN UITGEVOERDE PUTTESTEN, DETAILS EN RESULTATEN VAN DE EVALUATIE

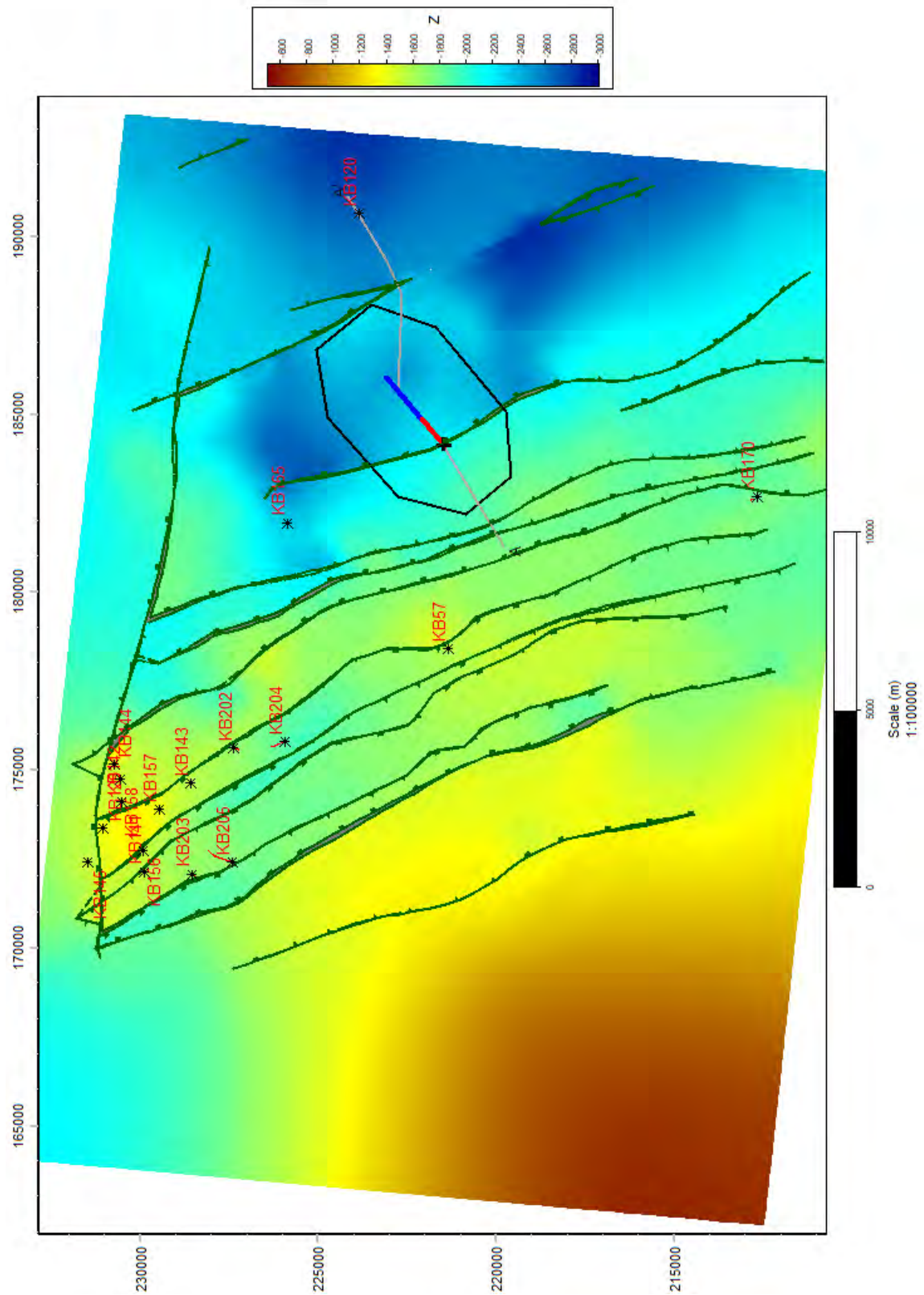
De belangrijkste puttesten zijn die van de boring in Merksplas, gepubliceerd door Vandenberghe et al. (2000).

BIJLAGE 4: LIJST VAN PRODUCTIEDATA, DETAILS EN RESULTATEN VAN DE EVALUATIE

Er zijn geen productiedata gebruikt bij de analyse.



Kaart met de diepte van de top van het reservoir (ingezoomd op het vergunningsgebied).



Kaart met de diepte van de basis van het reservoir. De zuidwestelijke tot westelijke zone is niet betrouwbaar wegens extrapolatie.

BIJLAGE 6: PUTONTWERP

De putontwerpen zijn reeds opgenomen in de tekst.

BIJLAGE 7: LITHOSTRATIGRAFISCHE BESCHRIJVINGEN

Formatie van Loenhout (Plo)

Deze formatie is (van de drie meest nabije boringen) alleen aangeboord in de boringen Turnhout en Heibaart 1/1bis

Naam: Afgeleid van het dorp Loenhout gesitueerd in de Antwerpse Noorderkempen.

Typelocatie: boring 007E178 (KB129 – Loenhout, Heibaart) tussen 1141 m en 1320 m (Figuur 11a).

Parastratotype: boring 076E243 (KB131 - Halen) tussen 633 m en 984 m; boring 017E225 (KB120 - Turnhout) tussen en 2186,6 m en 2273 m (Figuur 11c).

Lithologie: bleke, fossielhoudende mudstones, bio- en lithoklastische wacke- tot grainstones en boundstones. Lokaal worden dunne, donkere, kleirijke lagen aangetroffen. Er kunnen vier facies-types onderscheiden worden:

1. Fossielrijke mud-, wacke- en boundstones, die geïnterpreteerd zijn als riffen en lokaal afgewisseld worden met peritidale kalkstenen. De boundstones worden aangetroffen in de boringen uitgevoerd rond de ondergrondse gasopslag te Loenhout en in boring 030W371 (KB170 - Poederlee).
2. Massieve, fossielarme kalkstenen. De kleur varieert van grijs tot donkergrijs - zwart. Lokaal komen verkiezelde niveaus voor. De monotone fossielinhoud en de sedimentologie wijzen op een ingesloten afzettingmilieu.
3. Veelal bleke, dikgebankte, bioklastische (brachiopoden en crinoden) kalkstenen en cryptoalgair microbeccia afgezet in een ondiep, open marien milieu.
4. Dikke pakketten carbonaatconglomeraten en -breccies. Microfossielen tonen aan dat een deel van de lithoklasten herwerkt zijn uit oudere Dinantiaan formaties (Arundiaan), maar de matrix wijst op een Holkeriaan- tot Warnantiaanouderdom.

In de typeboring belooft de totale dikte van de Formatie van Loenhout 185 m. De dikte varieert echter sterk. Dit is toe te schrijven aan sedimentologische verschillen (het al dan niet voorkomen van rifstructuren), differentiële subsidentie en de graad van post-Dinantiaan erosie. In de boringen uit het westelijk deel van het Kempisch Bekken rust de Formatie van Loenhout concordant op de kalkstenen van de Formatie van Velp. De top valt samen met de basis van de eerste verkiezelde, donkere schiefers van de Formatie van Souvré. In boring 017E225 (KB120 - Turnhout, zwemdok) wordt dit contact versterkt door een kleine hoekdiscordantie. De overgang wordt bovendien gekenmerkt door een abrupte wijziging in het patroon van γ -ray en snelheidslogs. Daar waar jongere Carboonsedimenten ontbreken, wordt de Formatie van Loenhout discordant afgesneden door het Krijt. Verder naar het noorden - noordwesten (boring S02-02 (NL)) wordt de formatie concordant afgedekt door donkere, kleiige kalkstenen en dolomieten van de Formatie van Goeree. Het contact is scherp te trekken op basis van de uitgesproken verschillen in het γ -ray en snelheidspatroon van beide lithostratigrafische eenheden.

Voorkomen: De Formatie van Loenhout komt voor in het grootste deel van het Kempisch Bekken.

Ouderdom: Vroeg Brigantiaan tot Holkeriaan (foraminiferenzones: Cf6 γ tot Cf5; koraalzones: CR7 β /RC8 tot CR6)

Formatie van Velp (PVI)

Deze formatie is in alle drie nabije boringen aangeboord.

Naam: Afgeleid van het riviertje de Velp die doorheen Halen, de plaats waar de typeboring werd uitgevoerd, stroomt.

Typelocatie: boring 076E243 (KB131 - Halen) tussen 984 m en 1082 m.

Lithologie: Compacte, bioklastische en pellet wacke- tot grainstones. De kleur varieert van donker-grijs - zwart tot lichtgrijs en bruingrijs. Lokaal komen kleirijke niveaus voor. In de typeboring bestaan de onderste 5 m uit donkergrijze dolomieten. Zowel in boring 076E243 (KB131 - Halen) als in boring 059E146 (KB132 - Booischot) (Figuur 11b) kan de Formatie van Velp opgedeeld worden in twee pakketten die van elkaar gescheiden worden door een kleirijke zone onder een breccieus interval.

De dikte van de Formatie van Velp varieert sterk. Dat is waarschijnlijk een gevolg van erosie tijdens het Laat Arundiaan en het Holkeriaan. Een maximale dikte van 131 m werd aangeboord te Booischot. In deze boring wordt de Formatie van Velp discordant afgesneden door het Krijt. In de typesectie bedraagt de dikte ca. 98 m. De formatie wordt er afgesneden door breccieus kalkstenen van de Formatie van Loenhout. De overgang is bruusk en erosief. De basis van de Formatie van Velp valt samen met de basis van de eerste, fijne, vaak kleirijke crinoïden-kalksteen of dolomietbank boven een sequentie van massieve, bleke, oölitische kalkstenen (Kalksteen van Steentje-Turnhout) of de klei- en zandrijke afzettingen (Formatie van Kessel).

Voorkomen: De Formatie van Velp werd enkel aangeboord in het westelijk deel van het Kempisch Bekken. Er zijn geen gegevens beschikbaar voor het oostelijk deel van het bekken. In boringen 108W359 (KB192 - 's Gravenvoeren) en Heugem-1/1a worden tijdsequivalente afzettingen van de Formatie van Berneau aangetroffen. Dit wijst erop dat de verbreiding van de platformkalkstenen naar het oosten toe beperkt is.

Ouderdom: Laat Arundiaan (foraminiferenzones: Cf4γ-δ; koraalzone: RC5)

Formatie van Kessel (PKe)

Deze formatie is alleen aangeboord in de boring Booischot en de typeboring van Kessel.

Naam: Afgeleid van het gehucht Kessel nabij Lier waar de typeboring werd uitgevoerd.

Typelocatie: boring 044W011 (KB38 - Kessel-bij-Lier) tussen 622 m en 703,6 m.

Lithologie: Afwisseling van massieve, grijze tot roodbruine kalksteen met kleirijke, nodulaire kalksteenbanken, rode, kalkrijke zandstenen en rode, gevlekte en zwarte kleistenen. Lokaal komen dunne dolomietbanken voor. In het bovenste deel van de typesectie en in het interval tussen 660 m en 675 m worden verschillende niveaus met plantenresten aangetroffen. In boring 059E146 (KB132 - Booischot) is er sprake van verschillende wortelbodems en zelfs dunne kolige laagjes. In de zones met plantenresten bestaat de lithologie hoofdzakelijk uit bonte kleistenen, mergels en mica- en kalkhoudende zandstenen.

De Formatie van Kessel heeft een totale dikte van ongeveer 80 m (minimaal 81,6 m in typeboring 044W011 en 79,5 m in boring 059E146). Het contact met de onderliggende kalkstenen van Steentje-Turnhout is scherp. Daar waar de Formatie van Kessel niet wordt afgesneden door het Krijt, wordt

de top gevormd door een paleobodem onder de crinoïdenkalksteen- en dolomietbanken aan de basis van de Formatie van Velp.

Voorkomen: Het is onmogelijk een gedetailleerd beeld te schetsen van het verspreidingsgebied van de Formatie van Kessel, gezien ze slechts in twee boringen werd aangetroffen. Op sedimentologische gronden wordt verondersteld dat het voorkomen van de Formatie van Kessel beperkt is tot het gebied gekneld tussen de paleokustlijn van het Massief van Brabant in het westen en zuidwesten en de open mariene kalkstenen en riffen van de Kalksteen van Steentje-Turnhout in het oosten.

Ouderdom: Laat Arundiaan tot Chadiaan (foraminiferenzones: Cf4 α - δ ; koraalzones: RC5 tot RC4 β)

Kalksteen van Steentje-Turnhout (PSt)

Deze Formatie is aangeboord in alle drie de nabije boringen.

Naam: Genoemd naar de oude brandweerkazerne van Turnhout, nu cultureel centrum, vlakbij de plaats waar de typeboring werd uitgevoerd.

Typelocatie: boring 017E225 (KB120 - Turnhout) tussen 2306,5 m en 2705,55 m (Figuur 11c)

Lithologie: Massieve, grijze tot lichtgrijze kalkstenen en dolomieten, lokaal verkarst en met breccieuze niveaus. In de typeboring kunnen drie lithologische eenheden onderscheiden worden:

1. Bleke, massieve, oölitische kalkstenen met lokaal microbreccieuze niveaus aan de top (2306,5 m – 2390 m)
2. Fijne, grijze tot donkergrijze kalkstenen met kleirijke niveaus lokaal rijk aan crinoïden in het midden (2390 m – 2563,3 m)
3. Algaire boundstones met intercalaties van bioklastische wacke- tot grainstones aan de basis (2563,3 m – 2706,55 m). Dit onderste pakket is ten dele gedolomitiseerd.

De dikte van de Kalksteen van Steentje-Turnhout varieert sterk. Zo blijkt de formatie afwezig of slechts dun ontwikkeld te zijn in de regio Heibaart (boring 007E178), terwijl in de typeboring een pakket van minimaal 399 m werd aangeboord. De dikteverschillen zijn waarschijnlijk terug te voeren op verschillen in paleotopografie en blokkentektoniek. Daar waar jongere afzettingen van de Kolenkalk Groep voorkomen, wordt de top gevormd door het contact met bonte mergels en zandige carbonaatgesteenten van de Formatie van Kessel of met de fijne, vaak kleirijke crinoïdenkalkstenen of dolomieten aan de basis van de Formatie van Velp. Elders wordt de top gevormd door het discordantievlak aan de basis van het Krijt. De massieve kalkstenen van Steentje-Turnhout rusten concordant op dolomieten van de Formatie van de Vesder. Het contact is scherp. Het wordt tevens gekenmerkt door een abrupte wijziging in het patroon van gamma-logs.

Voorkomen: De Kalksteen van Steentje-Turnhout komt voor doorheen heel het Kempisch Bekken, maar de verspreiding en dikte zijn beïnvloed door blokkentektoniek.

Ouderdom: Vroeg Arundiaan tot Chadiaan (foraminiferenzones: Cf4 α - β ; koraalzones: RC5 tot RC4)

Formatie van de Vesder (PVe)

Deze formatie wordt alleen aangetroffen in de boringen Booischot en Halen.

Naam: Afgeleid van de rivier de Vesder in het noordoosten van de provincie Luik.

Stratotype: Talud 500 m ten noorden van het station van Dolhain (basis van de Vesder Formatie) en Walhorn groeve (top van de Vesder Formatie).

Parastratotype: boringen 076E243 (KB131 - Halen) tussen 1165 m en 1366,5 m ;boring Kastanjelaan-2 (regio Maastricht, NL) tussen 338 m (?) en 382 m ;boring S02-02 (offshore (NL)) tussen 2604 m en 2836 m.

Lithologie: Grijs tot beige dolomieten met donkere, organisch rijke intervallen en verkiezelde of chertrijke niveaus. Plaatselijk worden dunne kalksteenniveaus aangetroffen, evenals siltige niveaus en dunne kleisteenbanken. Lokaal komen anhydrietpseudomorfen voor. De basis wordt gekenmerkt door bruine tot grijsbruine, dikgebankte, grofkorrelige dolomieten.

In het Vesder gebied is de formatie ongeveer 150 m dik. De dolomieten zijn er ingesloten door kalkschievers van de Formatie van Pont d'Arcole en de kalksteenbreccies van Belle Roche. Een gelijkaardige opeenvolging wordt aangetroffen in de regio Maastricht. In het Belgisch deel van het Kempische Bekken werd de Formatie van de Vesder aangeboord te Booischot en te Halen. Ze ontbreekt in de regio Loenhout. De dikte van het dolomietpakket varieert sterk (van 0 m te Heibaart tot meer dan 200 m in boring 076E243 (Halen)). Deze dikteverschillen zijn waarschijnlijk het gevolg van synsedimentaire blokkentektoniek. In boringen uit het Kempisch Bekken waarin de dolomieten voorkomen, rusten ze op rode silt- en zandstenen van de Formatie van Evieux en worden ze afgedekt door oölitische kalkstenen en dolomieten van de Kalksteen van Steentje-Turnhout. Beide contacten zijn scherp maar concordant.

Voorkomen: De Formatie van de Vesder wordt aangetroffen in het Vesder gebied, de regio Maastricht en het noorden en oosten van het Kempisch Bekken. In het westelijk deel van het Kempisch Bekken is het voorkomen gecontroleerd door blokkentektoniek. Zo blijkt de formatie volledig te ontbreken in de omgeving van Loenhout. De Formatie van de Vesder ontbreekt eveneens in regio Visé.

Ouderdom: Vroeg Molinaciaan tot Tournaisiaan (De bovengrens verloopt duidelijk diachroon.)

BIJLAGE 8: OPZET VAN HET TESTPROGRAMMA

Janssen Pharmaceutica heeft gekozen voor een testprogramma aangepast volgens enkele limiterende factoren. Deze factoren zijn gebaseerd op (1) de aanwezigheid van NORM in het formatiewater en de beperkte verwerkingsmogelijkheden hiervan, en (2) met de bovengrondse beperkingen voor de opslag van het geproduceerde water. Het is daarbij niet mogelijk om een groot opvangbekken aan te leggen om gedurende langere tijd water op te pompen.

Zowel op de productie- als de injectieput is een puttest gepland. Onderstaand schema geeft de beslissingsboom weer voor het uitvoeren van de testen en de momenten waarop de resultaten getoetst worden.

De injectieput Beerse GT-02 wordt als eerste geboord en getest, gevolgd door de productieput (Beerse GT-01). Deze volgorde is anders dan doorgaans gedaan wordt bij geothermische doubletten. Meestal wordt de productieput eerst geboord omdat die dan ook meteen informatie levert over de temperatuur (en samenstelling) van het water. Op die wijze kan na de puttesten de onzekerheid op zowel het te halen debiet (afhankelijk van de permeabiliteit) als de temperatuur weggewerkt worden. De keuze om de injectieput eerst te boren is echter gebaseerd op de bovengrondse beperkingen en de gekozen teststrategie. Dit laat toe een injectietest uit te voeren op de injectieput Beerse GT-02, waardoor nadien een korte productietest uitgevoerd kan worden op de productieput Beerse GT-01 en het testwater onmiddellijk geïnjecteerd kan worden in de injectieput.

Dit testprogramma garandeert dat de verzamelde data, aangeleverd conform industrie-standaard methodieken, eenduidig geïnterpreteerd kan worden. Het eenduidig bepalen van transmissiviteit en de mechanische skin staat voorop om hieruit het gerealiseerde geothermische vermogen te berekenen.

Schoonsoelen en testen

Het schoonsoelen van de putten wordt uitgevoerd in verschillende stappen, waarbij met het gebruik van zuur de put schoongemaakt wordt. Deze stap wordt mogelijk herhaald om te zorgen dat alle *cuttings* en boormodder verwijderd worden.

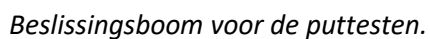
Op het ogenblik dat bij het schoonsoelen formatiewater gedetecteerd wordt, kan aangenomen worden dat de put voldoende schoon is. Per put wordt het spoelwater samen met een beperkte hoeveelheid formatiewater opgevangen in een bovengrondse opslagtank met een maximaal volume van 600 m³.

Puttest(en)

Op de injectieput (Beerse GT-02) worden in totaal twee testen uitgevoerd. Na het schoonsoelen van de injectieput wordt aan de hand van een productietest een beperkte hoeveelheid formatiewater geproduceerd. Het formatiewater wordt samen met het spoelwater opgevangen in de bovengrondse opslagtank met een maximaal volume van 600 m³. Nadien wordt deze samengestelde vloeistof afgevoerd ter verwerking. Vervolgens wordt een injectietest uitgevoerd.

De productieput (Beerse GT-01) wordt na het schoonsoelen getest door middel van een korte productietest waarbij het formatiewater onmiddellijk geïnjecteerd wordt via de injectieput. Deze individuele test richt zich specifiek op het genereren van data afkomstig uit de productieput.

Bijkomend wordt na het afwerken (plaatsen van de liner) van beide putten het doublet als geheel getest via een productie- en interferentietest.



Evaluatie van de kwaliteit van de data

Na afloop van de testen zal de kwaliteit van de data geëvalueerd worden om te beoordelen of de reservoir eigenschappen met voldoende betrouwbaarheid afgeleid kunnen worden. Op basis van de evaluatie zal besloten worden of het nodig is bijkomende testen uit te voeren.

Evaluatie van de resultaten en beslissing

Reservoir parameters worden bepaald op basis van de resultaten van de *puttesten*. De gegevens van de testen, in combinatie met informatie verzameld tijdens het boren en uit boorgatmetingen, worden gebruikt om de relevante parameters in DoubletCalc te actualiseren en te vervangen met de werkelijk gemeten of gerealiseerde waarden. Deze parameters liggen aan de basis van een nieuwe berekening in DoubletCalc om te bepalen of het resultaat al dan niet aan de verwachtingen beantwoordt. Hierna volgt een beslissing om met het project door te gaan of om een claim in te dienen.

Afwerking

Na het beslissingsmoment moet de put nog afgewerkt worden alvorens met het boren van de volgende put kan gestart worden.

In eerste instantie is een geperforeerde *liner* voorzien over gans de reservoirsectie, in beide putten. Het bereiken van een voldoende hoge productietemperatuur is van belang voor het aanwenden van de warmte op de site van Janssen Pharmaceutica. De meetgegevens uit de productieput kunnen daarom aangewend worden om na te gaan of een hogere temperatuur of efficiëntie kan bekomen worden door bij de afwerking van de put enkel het onderste deel open te laten. Hierbij zou bijvoorbeeld bovenaan een dichte buis (*blind liner*) geplaatst kunnen worden, en enkel onderaan een geperforeerde buis. Dit zijn echter verbeteringen die pas nadien (na de puttest) gerealiseerd zullen worden. Ze worden dan ook niet mee opgenomen in de huidige berekeningen.

Langdurige doublettest

Na afloop van beide boringen en de testen daarop plant Janssen Pharmaceutica een langdurige periode (6-12 maanden) waarin het doublet in zijn geheel wordt getest, en waaruit parameters met meer betrouwbaarheid kunnen worden afgeleid. Dit geldt ook voor eigenschappen van het formatiewater zoals temperatuur en samenstelling.

Op basis van de langdurige doublettest zal bepaald worden wat de optimale parameters, instellingen en afwerking zijn voor het geothermisch doublet. Deze zullen dus afwijken van de inzichten na de korte testen en van de huidige verwachtingen. Hieronder vallen bijvoorbeeld de diepte van de pomp, het nodige drukverschil, het gebruik van een injectiepomp, de druk in de leidingen, de lengte en diameter van opvoerbuizen, enz.