Injectie-protocol Zevenbergen

Van:	Visser & Smit Hanab	**Datum:**	18 november 2019
Onderwerp:	Maximale injectiedruk ZVB Geothermie		
Status:	FINAL V4		

1 Inleiding

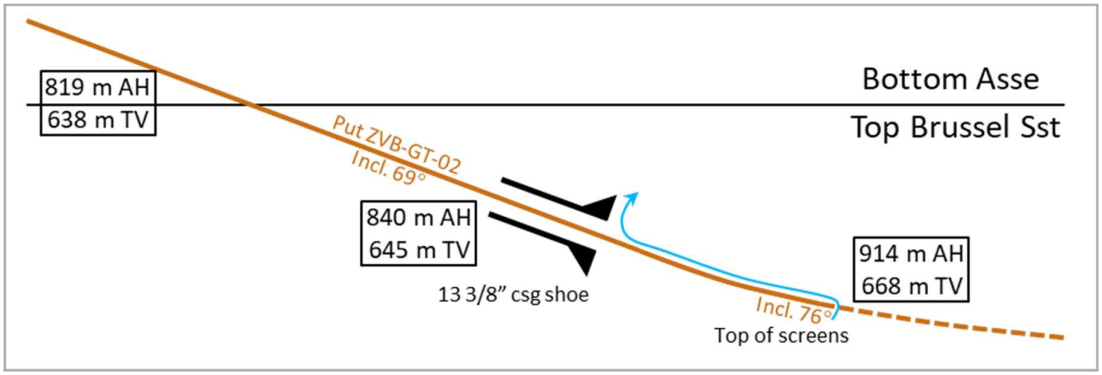
Deze notitie dient als onderbouwing voor de aanvraag van een maximale injectiedruk van 17 bar voor de injectieput ZVB-GT-02 in het Zevenbergen geothermische doublet.

Voor het bepalen van de maximale injectiedruk is gekeken naar de sterkte van het gesteente, de sterkte van de 13 3/8” casing en de sterkte van de bovengrondse installatie. Voor het bepalen van de sterkte van het gesteente zijn verschillende methoden gebruikt en met elkaar vergeleken. Er is een inschatting gemaakt van de onzekerheidsmarges en er is een veiligheidsmarge toegepast.

Er is een Integriteit Risico Beheersplan opgesteld met daarin de in maximale injectiedruk en de gegevens die regelmatig moeten worden geregistreerd om veranderingen in het injectie-gedrag te kunnen vaststellen. Als er een onverwachte verandering optreedt in het injectiegedrag moet het injectie-debiet (en daarmee ook het productie-debiet) onmiddellijk worden gereduceerd en moet de oorzaak van de verandering worden onderzocht. Dit plan is toegevoegd aan deze notitie als Bijlage 2.

2 Bepaling van de sterkte van het gesteente

Het geothermisch doublet ZVB-GT-01 en ZVB-GT-02 is gecompleteerd op de Brussels Sandstone Member. Aan de bovenzijde wordt deze begrensd door de Asse Member, die een dikte heeft van rond 65 meter. De onderste helft hiervan bestaat voornamelijk uit kleisteen, terwijl de bovenste helft iets zandiger is. Op basis van de Gamma Ray metingen is de Asse member goed te correleren tussen de Zevenbergen putten onderling en met putten in de omgeving op 12 en 20 km afstand (STB-01, STH-01 en RSB-01). Op de diepte waarop de Brussel Sandstone Member en de Asse Member zijn gelegen zijn naar verwachting geen tektonische spanningen waardoor de maximale hoofdspanning verticaal is (de lithostatische druk) en de minimale hoofdspanning horizontaal. De onderstaande figuur geeft schematisch weer hoe de put ZVB-GT-02 de top van de Brussel Sandstone Member doorsnijdt en wat de positie van de 13 3/8” casing schoen is. De ondiepste plek waar het geïnjecteerde water in aanraking met gesteente komt is bij de 13 3/8” casing schoen.



In de injectieput ZVB-GT-02 ligt de top van de Brussels Sandstone Member rond 638 m TV. Dit is relatief ondiep. Voor zulke ondiepe gesteenten zijn er verschillende methoden om te bepalen wat de maximaal toelaatbare injectiedruk is. Bij deze methoden hangt het eindresultaat af van aannames van onbekende grootheden. Daarom is het van belang voor de maximale injectiedruk een conservatieve waarde te kiezen, de

onzekerheidsmarge inzichtelijk te maken, een veiligheidsmarge aan te houden en tijdens het injecteren de injectiedruk voortdurend te monitoren zodat afwijkend gedrag van de injectieput tijdig kan worden gesignaleerd.

Hieronder worden de verschillende opties voor het bepalen van de maximale injectiedruk en onzekerheden kort besproken. Uiteindelijk wordt gekozen voor de methode die gangbaar is in de olie- en gasindustrie.

2.1 Protocol SodM-AGE (2013)

Deze methode geeft als maximale injectie-druk voor ZVB-GT-02:

WHP = 638 [m] * (0,135 [bar/m] – 0,100 [bar/m]) = 22 bar

Voor de diepte is hier gekozen voor top Brussels Sandstone Member boven de 13 3/8" casing schoen omdat daar de formatie het zwakste is. Het geïnjecteerde water verlaat het verbuisde deel van de put via de filter-sectie (screens). De weg van de minste weerstand voor het water is langs de buitenkant van de 7 5/8" liner en de 11" boorgatwand richting de 13 3/8" casing. De druk van de vloeistof gradiënt (0,100 bar/m) gebaseerd op de meting van de s.g. van formatiewater monsters.

Deze methode is ontwikkeld voor diepe geothermie en wordt niet geschikt geacht voor formatie ondieper dan 1000 m TV.

2.2 Formation Integrity Testen

Formation Integrity Testen (FIT) zijn uitgevoerd beneden de 13 3/8" casing-schoen in beide putten. De 13 3/8" casing-schoen is in beide putten in de Brussel Sandstone Member geplaatst en dus niet in de bovenliggende Asse Member. De toegepaste bovengrondse druk was equivalent aan een gradiënt van 1,33 s.g. spoeling. Dit komt overeen met een bovengrondse injectiedruk van 19,5 bar met formatiewater in de put. Echter een FIT wordt gemeten met een mud-cake in het boorgat en warme boorspoeling en is daardoor **niet** representatief voor een druk die de schone aquifer en afsluitende aquitard kan weerstaan bij injectie van koud formatiewater:

- Bij injectie van koud water krimpt het gesteente enigszins waardoor de sterkte afneemt
- Bij injectie wordt de vloeistofdruk in de zandsteen hoger, waardoor de sterkte iets toeneemt door het poro-elastisch effect

Deze effecten zijn tegengesteld en van dezelfde orde grootte. Het is daarom niet met zekerheid vast te stellen of de uiteindelijke Formation Breakdown Pressure hoger of lager uitvalt dan de FIT druk. Bovendien is de FIT is gedaan in de Brussels Sandstone Member (aquifer) en niet in de daarboven liggende Asse Member (aquitard).

2.3 Olie- en gasindustrie methode

In de olie- en gas industrie wordt gebruik gemaakt van de volgende relatie tussen totale horizontale en verticale spanning in gebieden die niet tektonisch beïnvloed zijn:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - p_f) + p_f \quad \text{...(eq.1)}$$

waarbij σ_h horizontale hoofspanning is, σ_v de totale verticale hoofdspanning, ν de Poisson's ratio en p_f de vloeistofdruk in de poriën. Bij waterinjectie wordt voor de Formation Breakdown Pressure (FBP) in verticale putten de volgende relatie gebruikt:

$$FBP = \frac{2\sigma_h - A_p p_f - A_T(T_{res} - T_{inj})}{2 - A_p} \quad \text{...(eq.2)}$$

waarbij A_p de poro-elastische constante is, A_T de thermo-elastische constante, T_{res} de temperatuur van de formatie en T_{inj} de temperatuur van het geïnjecteerde water. Als kernmateriaal beschikbaar is kunnen ν, A_p en A_T met metingen in het laboratorium worden bepaald. Als dit niet het geval is kan op basis van ervaringsgetallen voor deze waarden een inschatting gemaakt worden van de FBP en de bijbehorende maximale injectiedruk (eq.2 is equivalent met vergelijking 2.102 in de PhD dissertatie "Waterflooding under fracturing conditions" van E.J.L. Koning in 1988, TU Delft).

Voor het geval van injectie in ZVB-GT-02 wordt de verhoging van de FBG door toename van de poriedruk niet meegenomen. De formatie is het zwakst op het moment dat de injectie begint en de drukconus nog niet volledig is doorgewerkt in de formatie. Deze situatie bestaat aan het begin van de exploitatie-fase van de put, maar ook op momenten waarop het geothermisch doublet voor geruime tijd niet is gebruikt en de oorspronkelijke druk in het reservoir is hersteld (bijvoorbeeld gedurende langdurig onderhoud van put of installatie).

Deze sterkteberekening is afhankelijk van de aannames van de lithostatische gradiënt (en daarmee de gemiddelde porositeit van de overburden), Poisson's ratio's, A_T en A_P. Op basis van de density-log in de pilot boring ZVB-GT-01 en aannames van de range van mogelijke waarden van de Poisson's ratio's, A_T en A_P is een conservatieve inschatting van de FBP gemaakt en bijbehorende maximale injectiedruk. Als uitgangspunt wordt genomen dat bij de maximale injectiedruk de afsluitende laag boven producerende laag niet breekt. Bij deze druk is het mogelijk dat de zandlaag waarin wordt geïnjecteerd zelf wel breekt.

De op deze manier bepaalde maximale injectiedruk is 18 bar. Met een veiligheidsmarge van 1 bar mag de maximale injectiedruk de 17 bar niet overschrijden.

In **bijlage 1** bij deze notitie is de berekening van de maximale injectie opgenomen met een overzicht van de gebruikte parameters, de ranges van de parameters en onzekerheden.

Met het programma GEOMECH_V2 (https://www.nlog.nl/tools) kunnen equivalente berekeningen worden verricht van de verwachte spanningstoestanden.

2.4 Grondwatermechanica methode

Als alternatief is er ook gekeken naar de methode zoals beschreven door Olsthoorn (KIWA, 1982). Deze methode is afkomstig uit de grondwatermechanica en is speciaal geschikt voor ondiepe formaties met verwaarloosbare cohesie. Hierbij wordt beschreven dat de minimale horizontale spanning σ_3 voldoet aan de volgende relatie:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} > \frac{1}{\lambda} = \frac{1-\sin(\phi)}{1+\sin(\phi)}$$

waarbij de passieve gronddruk coëfficiënt λ alleen afhankelijk is van de hoek van de interne frictie van de formatie. Voor klei wordt in deze methode aangenomen dat de hoek van interne frictie 30° is en dus $1/\lambda$ = 1/3, voor zand wordt 40° gebruikt en dus $1/\lambda \approx 1/5$. Hierdoor is dus de minimale horizontale spanning in klei hoger dan in zand en is dus de weerstand tegen breken ook hoger in klei dan in zand.

De maximale injectiedruk kan worden berekend met de volgende relatie:

$$\Delta h = \frac{\gamma_g - \gamma_w}{\gamma_w} \frac{h}{\lambda}$$

waarbij γ_g de bulk dichtheid is van formatie inclusief water en γ_w de dichtheid van alleen het water en h de diepte van de top van de formatie. De bulk dichtheid hangt af van de gemiddelde porositeit van de overburden. De petrofysische evaluatie van de Zevenbergen putten laat zien dat de gemiddelde porositeit van de

overburden boven de Brussel Sandstone Member 37% is. De onderstaande tabel laat de maximale injectiedruk zien die op basis van bovenstaande relaties kan worden berekend. Er is ook een berekening gemaakt voor het geval de gemiddelde porositeit van de overburden 10% hoger ligt dan de porositeit van de Brussels Sandstone Member.

Diepte (m TV)	Formatie	Interne Frictie (°)	1/λ	Maximale injectiedruk (bar)	Maximale injectiedruk met 10% sensitivity op porositeit (bar)
638	Klei	30	0,33	21	19
645	Zand	40	0,22	14	13

Als de formaties zich inderdaad zouden gedragen als geheel ongeconsolideerd zou de kleisteen 21 bar kunnen weerstaan en de het zand 14 bar. Op basis van deze getallen zou bij een injectiedruk van meer dan 14 bar een frac in het zand geïnitieerd worden die echter niet doorzet in de bovenliggende klei. In deze methode uit de grondwatermechanica is effect van temperatuurverschil tussen geïnjecteerd water en aquifer niet meegenomen.

2.5 Conclusie gesteentesterkte

Op basis van de in olie- en gas industrie gangbare rekenmethode (paragraaf 2.3) is het aannemelijk dat bij een injectiedruk van 17 bar afsluitende kleilaag van de Asse member niet breekt (zie bijlage 1 voor de afleiding van dit getal). Het kan niet uitgesloten worden dat de zandlaag waarin wordt geïnjecteerd zelf wel breekt.

De resultaten van de grondwatermechanica methode houden geen rekening met afkoeling en zijn voornamelijk kwalitatief.

Omdat er onzekerheden zijn in de mechanische eigenschappen van het gesteente is er onzekerheid in de precieze druk waarbij het gesteente breekt onder invloed van de injectiedruk. Daarom is het continu observeren van het injectie-gedrag tijdens langdurig testen en tijdens de operationele fase van belang.

3 Sterkte van de casing en de bovengrondse installatie

De 13 3/8” casing van ZVB-GT-02 is op 28-1-2018, na de cementatie en vóór het uitboren van de shoe-track is afgeperst met een druk van 20 bar. De druk was stabiel voor 20 minuten.

De nominale burst pressure van de 13 3/8” L80 68 lbs/ft BTC casing is 346 bar. Op 20-12-2018 is er een multifinger caliper survey uitgevoerd in ZVB-GT-02. Deze survey laat zien dat er geen slijtage heeft plaatsgevonden en dat dus de nominale wanddikte nog intact is. Verder is aangetoond dat alle casing connecties geen afwijkingen laten zien van het verwachte profiel. Op basis van deze resultaten is de verwachting dat de casing nog de nominale sterkte heeft. Deze sterkte ligt significant hoger dan de verwachte injectiedruk.

De bovengrondse installatie, inclusief de wellhead, is ontworpen en getest voor een maximale injectiedruk van 20 bar.

4 Beheersing van risico’s bij injectie

Het economische succes van het geothermisch doublet is in grote mate afhankelijk van het debiet dat kan worden opgepompt en weer geïnjecteerd. Daarom zal het streven zijn om tot dichtbij de maximale injectie-druk te injecteren, mocht dit nodig zijn om het debiet te halen. De limiterende factor bij het bepalen van de maximale injectiedruk is de sterkte van de afsluitende laag (Asse) boven de producerende zandsteen (Brussels Zandsteen). Wegens onzekerheden in de mechanische eigenschappen van het gesteente is continu monitoren van het injectie-gedrag noodzakelijk. In Bijlage 2 van dit document is het “Integriteit risico

beheersplan” opgenomen. Hierin wordt beschreven welke monitoring er plaats moet vinden en welke parameters bepalen of kan worden doorgegaan met het injecteren van water.

Bijlage 1. Berekening maximale injectiedruk op basis van olie- en gasindustrie methode

Met de formule

$$FBP = \frac{2\sigma_h - A_p p_f - A_T(T_{res} - T_{inj})}{2 - A_p} \quad \text{...(eq.2)}$$

is een berekening gemaakt van de Formation Breakdown Pressure (FBP) van het zand waarin geïnjecteerd wordt en van de bovenliggende kleisteen. De formule zelf is gebaseerd op de situatie van een verticale put. In de praktijk blijkt dat in gedevieerde en horizontale putten het gesteente minder makkelijk breekt.

Voor de inschatting van de horizontale hoofdspanning is de volgende formule gebruikt:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - p_f) + p_f$$

Er zijn aannames gedaan voor de variabelen in deze formule. De onderstaande tabel geeft een overzicht van de aannames van de variabelen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de combinaties van variabelen die worden gebruikt leiden tot waarden van σ_h gradiënten die in de praktijk voorkomen en ook consistent zijn met de gradiënten die in GEOMECH_V2 worden berekend.

Variabele	**Aangenomen waarde**	**Opmerking**
σ_v, verticale hoofdspanning	122,9 – 129,9 – 139,9 bar	De verticale hoofdspanning is de lithostatische druk het resultaat is van het gewicht van de overburden op 638 m TV. Dit gewicht is hoofdzakelijk een functie van de porositeit van het gesteente. Voor de gemiddelde dichtheid van het formatiewater dat de poriën vult is 1,01 kg/l gebruikt, wat het midden houdt tussen zoet oppervlakte water en de dichtheid van het zoute water in de producerende formatie.
Porositeit overburden	Range 34%-37%-40%	De porositeit van de overburden wordt gebruikt voor het berekenen van σ_v. De porositeit is gebaseerd op density logs in pilot put ZVB-GT-01. De density log is voor de formaties boven de Brussel's Sandstone Member is geïntegreerd en dit levert een gemiddelde dichtheid op van 2,01 kg/l, wat overeen komt met een porositeit van 37%. Hierop is een meetnauwkeurigheid van +/- 3 por-% toegepast zodat de porositeit kan variëren tussen 34% en 40% met 37% als centrale waarde. De 40% waarde wordt gebruikt voor de conservatieve inschatting van de FBP en komt met een Poisson's ratio van 25% overeen met een horizontale spanningsgradiënt van 0,131 bar/m (iets lager dan de 0,135 bar/m uit het SodM protocol 2013 die is bedoeld voor diepere reservoirs).
ν, Poisson's ratio	0,18-0,25-0,30 voor zandsteen 0,25-0,25-0,40 voor kleisteen	De Poisson's ratio's van verschillende gesteentes zijn heel variabel. In de grondwatermechanica wordt voor het berekenen van de sterkte van ondiepe formaties gewerkt met hoeken van interne frictie. Voor zand wordt 40° gebruikt en voor klei 30° (Olsthoorn 1982). Dit kan worden omgezet naar

Variabele	Aangenomen waarde	Opmerking
		een Poisson's ratio van 0,25 voor zand en 0,35 voor klei (Vásárhelyi 2009). De range die wordt gebruikt voor zandsteen in de berekening is gebaseerd op ervaringswaarden voor zandsteen in de Nederlandse bodem. Er is geen meting verricht op de mechanische eigenschappen van de Brussel's Sandstone Member. De range die wordt gebruikt voor kleisteen is een range bekend uit de literatuur (Vásárhelyi 2009). Als centrale waarde wordt 0,25 gebruikt. Dit is een conservatieve waarde voor kleisteen. Dit is dezelfde waarde als de lage waarde.
p_f, reservoir druk	64,2 bar	Hiervoor wordt de originele reservoir druk gebruikt op 638 m TV. Er wordt vanuit gegaan van de conservatieve aanname dat de drukconus aan het begin van de injectie nog niet is verspreid in het gesteente.
A_P, de poro-elastische constante	0,4 - 0,6 – 0,8	Voor sedimentaire bekkens ligt de waarde tussen 0,4 en 0,8.
A_T, de thermo-elastische constante	0,3 – 0,5 – 0,7 bar/Kelvin	Deze is afhankelijk van de thermische expansie/contractie coëfficiënt, de Young's modulus en de Poisson's ratio. Al deze waarden zijn niet gemeten. 1 bar/K is een typische waarde uit de praktijk voor meer geconsolideerde formaties. Voor minder geconsolideerde formaties kan de Young's modulus een orde grootte kleiner zijn en daarmee kan de waarde van A_T veel kleiner worden dan 1 bar/K. Voor de centrale waarde voor de minder geconsolideerde formatie is 0,5 bar/Kelvin aangenomen. Met 0,3 als lage en 0,7 als hoge waarden.
T_{res}, reservoir temperatuur	30,4°C	Gebaseerd op een gemiddelde bovengrondse temperatuur van 10°C, een diepte van 638 m TV en een geothermische gradiënt van 0,032 Kelvin/m. Dit is consistent met de in het reservoir gemeten temperatuur tijdens de petrofysische logging.
T_{inj}, temperatuur van het geïnjecteerde water	7 - 8 - 12°C	Gebaseerd op de maximale afkoeling die wordt verwacht bij maximale warmtevraag van de afnemer. Zeker in het begin zal de waarde enigszins hoger liggen wegens opwarming van het water in het boorgat.

Met behulp van eq.2 is voor alle combinaties van waarden van bovenstaande variabelen de injectiedruk berekend waarbij de formatie kan breken. De resultaten hiervan zijn hieronder weergegeven. De verdeling van de uitkomsten van deze berekeningen zijn weergegeven in een tabel en een histogram.

De ranges van de vijf variabelen die zijn gebruik voor de berekening van de Formation Breakdown Pressure voor kleisteen en zandsteen zijn in de tabellen hieronder weergegeven.

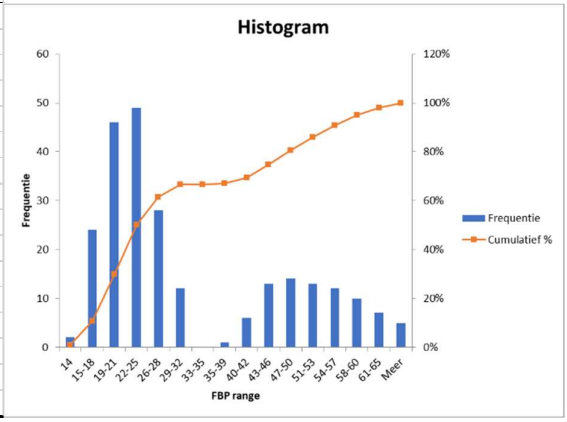
Kleisteen			
	laag	**middel**	**hoog**
Gem. porositeit overburden	34%	37%	40%
Poisson's ratio	0,25	0,25	0,4
Thermo-elastic constant (At)	0,3	0,5	0,7
Poro-elastic constant (Ap)	0,4	0,6	0,8
Temperature injected (°C)	7	8	12

Zandsteen			
	laag	**middel**	**hoog**
Gem. porositeit overburden	34%	37%	40%
Poisson's ratio	0,18	0,25	0,3
Thermo-elastic constant (At)	0,3	0,5	0,7
Poro-elastic constant (Ap)	0,4	0,6	0,8
Temperature injected (°C)	7	8	12

Resultaten Kleisteen (Seal)

Voor de kleisteen zien de resultaten van het doorrekenen van de ”parameter space” er als volgt uit:

Verzamelbereik voor de FBP in bar	*Frequentie*	*Cumulatief %*
14	2	1%
15-18	24	11%
19-21	46	30%
22-25	49	50%
26-28	28	62%
29-32	12	67%
33-35	0	67%
35-39	1	67%
40-42	6	69%
43-46	13	75%
47-50	14	81%
51-53	13	86%
54-57	12	91%
58-60	10	95%
61-65	7	98%
Meer	5	100%

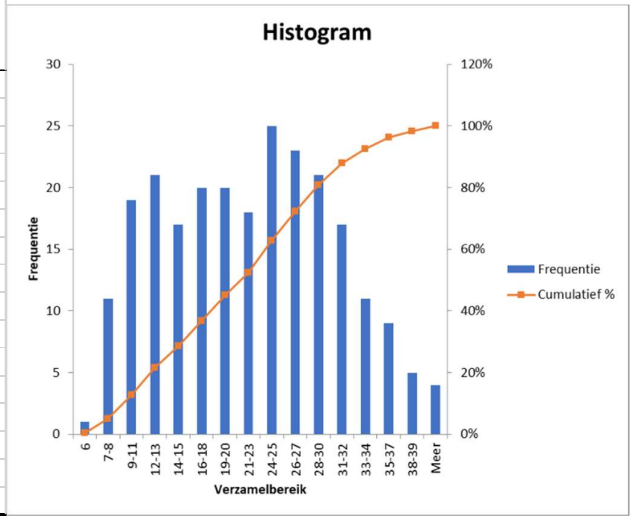


Hier valt op dat de verdeling een groep lage waarden laat zien en een groep hoge waarden. Dit is het gevolg van de keuze om voor de Poisson’s ratio voor kleisteen de lage waarde en de midden waarde beide op 0,25 te zetten tegenover een hoge waarde van 0,4. In het hele spectrum van uitkomsten komen lage waarden beneden de 18 bar betrekkelijk weinig voor. In ongeveer 90% van de uitkomsten is de FBP hoger dan 18 bar.

Resultaten Zandsteen (Reservoir)

Voor de zandsteen zien de resultaten van het doorrekenen van de “parameter space” er als volgt uit:

Verzamelbereik voor de FBP in bar	*Frequentie*	*Cumulatief %*
6	1	0%
7-8	11	5%
9-11	19	13%
12-13	21	21%
14-15	17	29%
16-18	20	37%
19-20	20	45%
21-23	18	52%
24-25	25	63%
26-27	23	72%
28-30	21	81%
31-32	17	88%
33-34	11	93%
35-37	9	96%
38-39	5	98%
Meer	4	100%



Dit laat zien dat binnen de gekozen parameter space een groot deel van de uitkomsten een relatief lage FBP hebben. Waarden beneden de 18 bar komen vaker voor.

Omdat er onzekerheid bestaat in de werkelijke Fracture Breakdown Drukken is de aanbeveling in het injectie protocol om het injectiegedrag goed te monitoren en alert te zijn op plotselinge veranderingen in de injectiviteit.

In Bijlage 2 van deze notitie is het Integriteit Risico Beheersplan beschreven. Hierin worden criteria vermeld voor veranderingen in het injectiegedrag die aanleiding geven voor het stoppen van de waterinjectie.

Van:	Visser & Smit Hanab	**Datum:**	04-12-2019
Status:	Final	**Versie:**	5

Integriteit risico beheersplan Zevenbergen Geothermie

(Bijlage 2 bij Injectieprotocol, Bijlage 7 bij Monitoringsplan LTA Zevenbergen)

1. De fasen van inbedrijfstelling

In lijn met het Commissioning Plan (27-11-2019, Rev. 5) worden verschillende fasen onderscheiden bij de opstart en operatie van de installatie in Zevenbergen. De onderstaande tabel geeft een overzicht van deze fasen met een inschatting van begin- en einddatum.

Tabel 1. Fasen van de opstart en operatie van de Zevenbergen aardwarmte installatie

Beschrijving van de fase	Begindatum	Einddatum
I – Schoon produceren van de put	19-11-2019	05-12-2019
II - Extended Well Test – Eerste deel	06-12-2019	31-12-2019
III - Extended Well Test – Tweede deel	01-01-2020	30-06-2020
IV - Operationele fase	01-07-2020	

2. De maximale injectiedruk

De maximale toegestane injectiedruk is 17 bar. Dit is de maximale wellhead druk van de injectieput ZVB-GT-02ST1. Om er voor te zorgen dat deze druk niet wordt overschreden reduceert het besturingssysteem van het doublet het debiet wanneer de maximale injectiedruk wordt benaderd.

Het SCADA systeem registreert drukken en debieten iedere seconde. Het besturingssysteem kan dus iedere seconde de injectiedruk vergelijken met de maximale waarde.

De maximale injectiedruk is geldig in alle fasen van inbedrijfstelling.

Tabel 2. Maximale injectiedruk

Geobser-veerde waarde	Tag ID	Eenheid	Frequentie observatie	Grenswaarde	Wijze van observeren	Actie bij overschrijden grenswaarde	Wijze van uitvoeren actie	Toepasbaarheid
Injectie-druk	39PT03 en 39PS01	Bar(g)	Iedere seconde	Maximum 17 bar	Geautomatiseerd in het besturings-systeem	Uitschakelen installatie, verlagen van het debiet	Uitschakelen automatisch, verlagen debiet is automatisch als de attentiewaarde 16,5 bar wordt bereikt	In alle fasen van de opstart en operatie

3. De minimale injectietemperatuur

De minimale injectietemperatuur is 8 °C. Dit is de temperatuur van het geïnjecteerde water die wordt gemeten bij de wellhead van de injectieput ZVB-GT-02. Om er voor te zorgen dat de temperatuur van het geïnjecteerde water niet minder dan 8 °C wordt geeft het besturingssysteem een alarm wanneer deze temperatuur wordt bereikt. Vermindering van de uitkoeling moet door de operator handmatig worden geregeld.

Het SCADA systeem registreert temperaturen iedere seconde. Het besturingssysteem kan dus iedere seconde de temperatuur van het geïnjecteerde water vergelijken met de minimale waarde.

De minimale temperatuur van het geïnjecteerde water is geldig in alle fasen van de opstart en operatie.

Tabel 3. Minimale injectie temperatuur

Geobser-veerde waarde	Tag ID	Eenheid	Frequentie observatie	Grenswaarde	Wijze van observeren	Actie bij overschrijden grenswaarde	Wijze van uitvoeren actie	Toepasbaarheid
Temperatuur van geïnjecteerd water	38EM01TT02	°C	Iedere seconde	Minimum 8 °C	Geautomatiseerd in het besturings-systeem	Alarm, verlagen uitkoeling	Automatisch alarm, Vermindering uitkoeling automatisch	In alle fasen van de opstart en operatie

4. Veranderingen in het injectiegedrag

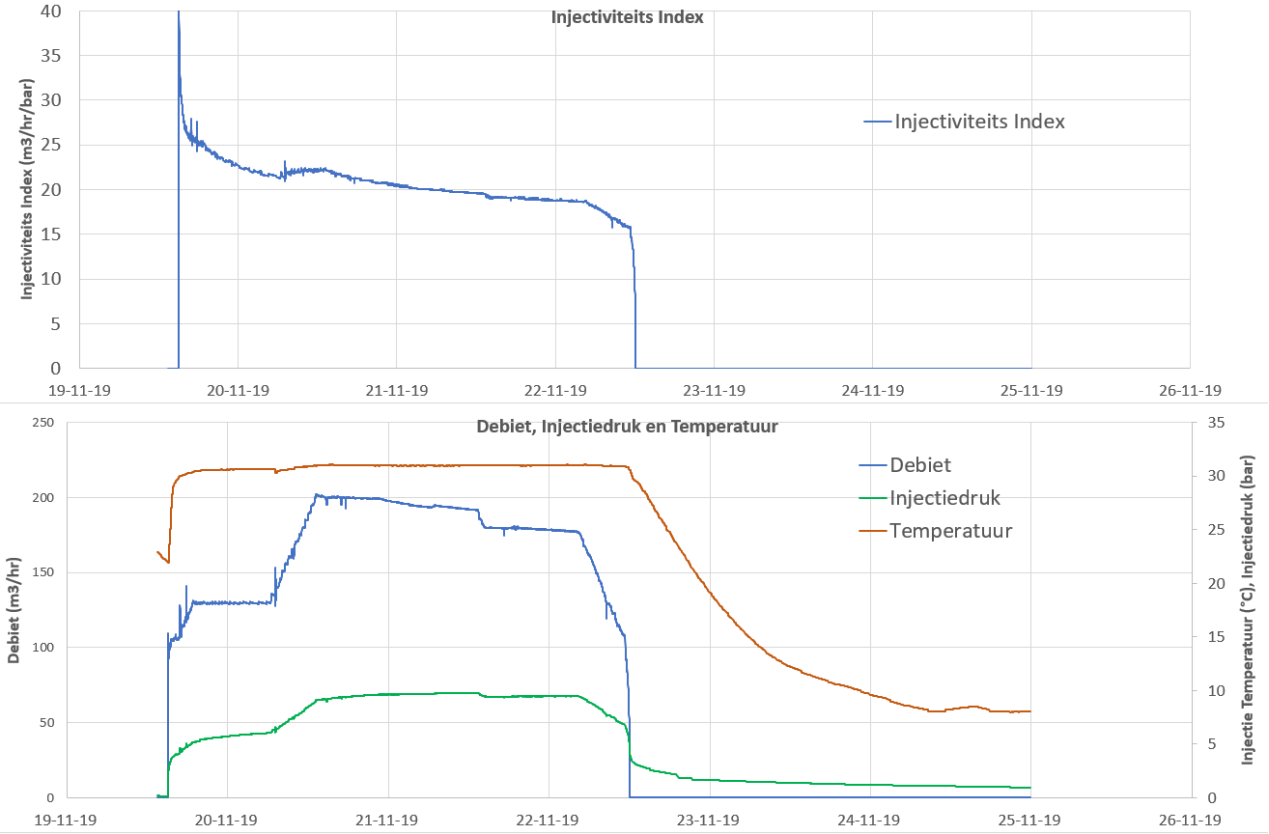
Veranderingen in het injectie gedrag van de put kunnen verschillende oorzaken hebben. De injectiviteitsindex is een goede indicator van het injectiegedrag. De onderstaande tabel wordt een overzicht van mogelijke oorzaken van verandering van de injectiviteitsindex.

Tabel 4. Oorzaken van veranderingen in injectiegedrag

Verlaging van de injectiviteit	Verhoging van de injectiviteit
Verlagen van de temperatuur van het geïnjecteerde water. De viscositeit van het water wordt hoger bij verlagen van de temperatuur.	Verhogen van de temperatuur van het geïnjecteerde water. De viscositeit van het water wordt lager bij verhogen van de temperatuur.
Toename van de skinfactor als gevolg van vervuiling door kleine deeltjes of neerslag van zouten in de formatie rond de injectieput.	Vorming van scheuren in de formatie waarin het water wordt geïnjecteerd door de combinatie van injectiedruk en/of verlaging van temperatuur.
Toename van de frictie in de put door vorming van scale of het ophopen van zand in de put.	“Out-of-zone” injectie waarbij water niet alleen in de gewenste formatie wordt geïnjecteerd maar ook in een ondiepere formatie doordat de afsluitende laag boven de gewenste formatie is gescheurd.

Het bewaken van het injectiegedrag is er vooral op gericht om “out-of-zone” injectie te voorkomen. Daarom moeten vooral onverwachte verhogingen van de injectiviteit op tijd worden opgemerkt.

In november 2019 is het doublet opgestart om de productieput schoon te produceren. Er werd 69 uur geproduceerd met wisselende debieten. Tijdens deze periode zijn metingen geregistreerd door het SCADA systeem. Op basis hiervan is de verwachte injectiviteitsindex voor water van 31°C rond 19 m^3/hr/bar. De onderstaande grafieken geven een overzicht van de gemeten data en de daaruit afgeleide trend van de injectiviteitsindex.



Figuur 1. Grafieken van observatiewaarden op een tijd-as.

Na opstarten van de injectie toonde de injectiviteit enige uren overgangsgedrag (*transient* gedrag) alvorens te stabiliseren. Het wordt verwacht dat dit overgangsgedrag zich steeds opnieuw zal voordoen bij opnieuw opstarten van de injectie en bij grote veranderingen van het debiet. Ook zal na enige tijd van stilstand van de installatie de benodigde injectiedruk aanvankelijk relatief laag zijn en dan geleidelijk oplopen. Op basis van gesteente-mechanische berekeningen is het niet aannemelijk dat de afsluitende laag boven de Brussel Zandsteen breekt bij een injectiedruk van 13 bar of minder.

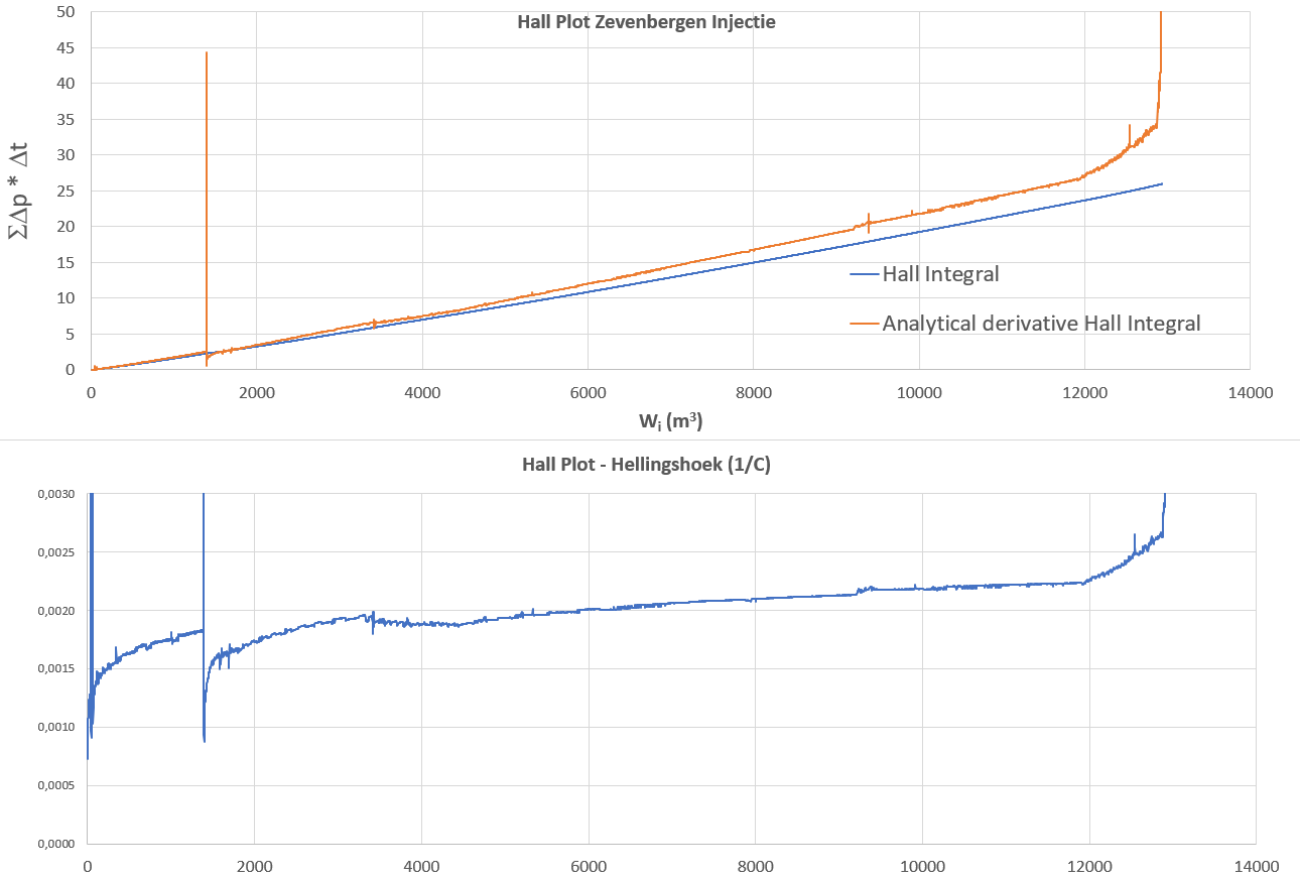
Zoals in tabel 4 is aangegeven is het mogelijk dat de injectiviteitsindex geleidelijk hoger wordt door het breken van de Brussel Zandsteen. Dit is op zich geen probleem. Het is ook mogelijk dat de injectiviteit snel hoger wordt door “out-of-zone” injectie. Dit wordt voorkomen door tijdig ingrijpen. Hiervoor wordt een maximum injectiviteitsindex gedefinieerd waarop het geautomatiseerde besturingssysteem de installatie uitschakelt. Dit hoeft alleen te gebeuren wanneer de injectiedruk zelf meer dan 13 bar is. Als dat gebeurt zal nadere analyse uitwijzen of doorgaan met de injectie de integriteit van de afsluitende laag niet in gevaar brengt.

Tabel 5. Maximale injectiviteitsindex

Geobserveer-de waarde	**Tag ID**	**Eenheid**	**Frequentie observatie**	**Grenswaarde**	**Wijze van observeren**	**Actie bij overschrijden grenswaarde**	**Wijze van uitvoeren actie**	**Toepasbaarheid**
Injectiviteits-index	38FQ01 / 39PT09	m^3/hr/bar	Iedere seconde	Maximum 28 m^3/hr/bar (bij een injectiedruk meer dan 13 bar)	Automatisch in het besturings-systeem	Uitschakelen installatie	Automatisch door het besturings-systeem	In alle fasen van de opstart en operatie

Figuur 2 geeft voor de bovengenoemde periode de Hall plot met de Analytical Derivative van de Hall Integral, en grafieken van de hellingshoek van de Hall Plot. De Hall Plot met de Derivative van de Hall Integral is een goede grafiek om het productiegedrag te monitoren. Deze plot is geschikt om het begin van het scheuren van

de formatie waarin wordt geïnjecteerd te identificeren (ref. SPE-109876, Izgec en Kabir 2007). Echter, deze grafieken kunnen op dit moment niet op het SCADA systeem van Zevenbergen worden geïmplementeerd, maar wel handmatig worden gegenereerd.



Figuur 2. Grafieken van observatiewaarden versus cumulatieve injectie

De viscositeit van het geïnjecteerde water is afhankelijk is van de temperatuur. De injectiviteitsindex is lineair afhankelijk van het omgekeerde van de dynamische viscositeit. Dus bij veranderingen van de temperatuur van het geïnjecteerde water zal de injectiviteitsindex ook veranderen. Een verandering van bijvoorbeeld 3 Kelvin verandert de viscositeit met rond 8%.

Behalve de geautomatiseerde bewaking van het injectiegedrag is het ook noodzakelijk een handmatige analyse uit te voeren van de trends van de diverse indicatoren (zoals in bovenstaande grafieken). Als deze analyse uitwijst dat er gevaar is voor “out-of-zone” injectie wordt de installatie stilgelegd en wordt nader onderzoek in de put gepland. Dit handmatige stilleggen kan ook gebeuren als de in het besturingssysteem geïmplementeerde grenswaarden niet worden overschreden. Een indicator voor de mogelijke “out-of-zone” injectie is een snelle toename van de injectiviteitsindex zonder dat deze het gevolg is van verhoging van de injectietemperatuur. Voor deze toename wordt een stoplichtsysteem met grenswaarden gehanteerd. Dit stoplicht systeem wordt in tabel 6 nader uitgewerkt.

Tabel 6. Stoplicht-systeem grenswaarden toename injectiviteitsindex

Toename van injectiviteitsindex in % per 24 uur	Kleur stoplicht	Actie
<2%	Groen	Installatie blijft in bedrijf. Handmatige analyse frequentie zoals in tabel 8.
2% tot 5%	Oranje	Bij de eerste dag "oranje": installatie blijft in bedrijf en de frequentie van handmatige analyse gaat naar dagelijks. Bij de tweede dag "oranje": installatie blijft in bedrijf en de frequentie van handmatige analyse gaat blijft dagelijks. Bij de derde dag "oranje": installatie wordt gestopt en er wordt nader onderzoek gedaan naar de oorzaak van de toename.
>= 5%	Rood	Installatie wordt gestopt en er wordt nader onderzoek in de put naar de oorzaak van de toename. De operator treedt in overleg met SodM over voorwaarden voor weer opstarten van de installatie.

In tabel 7 wordt de grenswaarde voor toename in injectiviteitsindex nogmaals samengevat in hetzelfde format als de grenswaarden voor andere indicatoren.

Tabel 7. Maximale toename van injectiviteitsindex per etmaal

Geobserveerde waarde	Tag ID	Eenheid	Frequentie observatie	Grenswaarde	Wijze van observeren	Actie bij overschrijden grenswaarde	Wijze van uitvoeren actie	Toepasbaarheid
Snelheid van toename injectiviteits-index bij stabiele injectie temperatuur	n.v.t.	% per 24 uur	Volgens analyse schema in tabel 8	Volgens stoplicht systeem in tabel 6: 2-4% per 24 uur is oranje, >5% per 24 uur is rood	Handmatig	Oranje: dagelijkse analyse uitvoeren Rood: injectie stoppen, onderzoek, overleg met SodM	Handmatig	In alle fasen van de opstart en operatie

De frequentie van de handmatige analyse wordt weergegeven in de onderstaande tabel wanneer de toename van de injectiviteitsindex in de groene zone zit (<2% per 24 uur).

Tabel 8. Frequentie van handmatige analyse injectiegedrag

Fase	Frequentie van de handmatige analyse
I - Schoon produceren van de put	Iedere dag
II - Extended Well Test – Eerste deel	Iedere twee dagen
III - Extended Well Test – Tweede deel	Iedere week
IV - Operationele fase	Iedere twee weken

5. Toetsing van het beheersplan

De productie van Lage Temperatuur Aardwarmte uit relatief ondiepe en mogelijk minder sterk geconsolideerde zandsteen is nieuw voor de operator (Visser & Smit Hanab) en voor de toezichthouder (SodM). Daarom is het van belang planmatig de effectiviteit en haalbaarheid van het beheersplan te toetsen. Bij de toetsing worden de hier ondergenoemde onderdelen van het beheersplan beschouwd:

- Fasering van inbedrijfstelling
- Grenswaarden van de geobserveerde waarden
- Meetfrequenties
- Frequentie van handmatige analyse
- Procedures voor de analyse
- Trendanalyses van belangrijke indicatoren

De resultaten van iedere toetsing en eventueel beoogde veranderingen aan het beheersplan worden door de operator ter goedkeuring voorgelegd aan de toezichthouder. De onderstaande tabel geeft de planning van deze toetsingen.

Tabel 9. Frequentie van de toetsing van het beheersplan

Fase	**Frequentie van de toetsing van het beheersplan**
I - Schoon produceren van de put	Iedere week
II - Extended Well Test – Eerste deel	Iedere twee weken
III - Extended Well Test – Tweede deel	Iedere maand
IV - Operationele fase	Iedere twee maanden

6. Samenvatting

Tabel 10. Samenvatting grenswaarden, stoplicht-systeem en acties

Geobserveerde waarde	**Injectiedruk**	**Injectie-temperatuur**	**Injectiviteits-index**	**Toename Injectiviteits-index per etmaal**
Normale waarde	<= 17 bar(g)	>= 8 °C	< 28 m3/hr/bar	<2%
Attentie waarde	16,5 bar(g)			2% tot 5%
Grenswaarde	> 17 bar(g)	< 8 °C	>= 28 m3/hr/bar bij een injectiedruk > 13 bar	>= 5%
Wijze van observeren	Automatisch	Automatisch	Automatisch	Handmatig
Actie bij overschrijden grenswaarde	Uitschakelen installatie, bij attentie waarde debiet verlagen	Alarm, Verminderen van de uitkoeling	Uitschakelen installatie	Uitschakelen installatie en onderzoek put. Overleg met SodM.
Wijze van uitvoeren actie	Uitschakelen Automatisch, verlagen debiet automatisch	Automatisch alarm, Vermindering uitkoeling automatisch	Automatisch	Handmatig