

Hydraulische verbindingen tussen Nedmag cavernes

Onderliggend mechanisme, kans op nieuwe
verbindingen en mogelijke consequenties



Auteur : J. Visser
Versie : 3
Datum : 19 Oktober 2018

Dit is een Nederlandstalige publieksversie van het rapport "Hydraulic connections between Nedmag caverns. Underlying mechanism, chance of connection and possible consequences" van 19 oktober 2018. Deze Engelstalige versie is leidend.

1. INLEIDING

In het 2018 Winningsplan ¹⁾ beschrijft Nedmag de route om hun pekelpductie van 315 ktpa MgCl₂ zeker te stellen. In Periode 1 van het Winningsplan wordt pekelp geproduceerd door aflaten uit het grote TR-1,8 / VE-4-cluster bij toenemende drukverlaging, ondersteund door injectie en productie uit cavernes TR-9 en VE-3. Omdat de gemakkelijk squeezen de pekelp uit het grote cluster mogelijk binnen 2 jaar uitgeput zal zijn, zal Nedmag ook vier nieuwe cavernes VE-5...8 vanuit Well Head Centre 1 te Borgercompagnie gaan boren en ontwikkelen om de pekelpductie op een voldoende niveau te houden. De boringen van VE-5..8 zijn gericht op de Bischofiet houdende lagen van de ZE-III 1b afzetting. Aanvankelijk zullen de nieuwe VE-cavernes worden ontwikkeld met bijna lithostatische drukken gevolgd door squeeze-productie bij sub-lithostatische drukken. Naar verwachting zullen de nieuwe putten VE-5 & 6 en VE-7 & 8 paarsgewijs hydraulisch met elkaar verbinden binnen de looptijd van Periode 1 van het 2018 Winningsplan. Wanneer 1.7 miljoen ton MgCl₂ is geproduceerd, zal de injectie worden geminimaliseerd en begint Periode 2.

In Periode 2 zal uitsluitend pekelp worden geproduceerd door het aflaten van vrije pekelp uit het cluster en bronnen TR-9, VE-3 en VE-5..8.

In Periode 1 met actieve uitloging kunnen nieuwe hydraulische verbindingen ontstaan die een effect hebben op caveerne operatie. Deze studie start met een historische analyse van bestaande verbindingen gevolgd door een voorspelling van de kans op nieuwe verbindingen tussen bestaande en nieuwe bronnen en mogelijke effecten hiervan op caveerne operatie.

2 HISTORIE EN AARD VAN HYDRAULISCHE VERBINDINGEN

2.1 Historie van hydraulische verbindingen

De status van de hydraulische verbinding wordt bepaald door de observatie van permanente synchronisatie van drukvariaties van aangrenzende cavernes. De eerste verbinding werd waargenomen in oktober 1989 tussen cavernes TR-1 en TR-2 die toen onder licht sub-lithostatische drukken opereerden. Deze verbinding werd waargenomen tijdens het uitloggen van bovenliggende Carnallitische cavernes in ZE-III 2b/3b wijzend op een mogelijke verbinding ter hoogte van bovenzakken.

Later, tijdens de sub-lithostatische squeeze-productie die vanaf 1995 wordt toegepast, is in november 1996 caveerne TR-5 verbonden met het TR-1/2-subcluster. Tijdens testen van het squeeze concept met caveerne TR-4 in de periode 1993 - 1995 werd aanvankelijk een drukverschil afhankelijke aan-uit verbinding opgemerkt met TR-6, die in januari 1998 permanent werd. Bij het verdere productieverloop werd caveerne TR-7 in juli 1999 verbonden met het TR-1/2/5-subcluster, enkele maanden later verbond ook caveerne TR-3. In het verder verloop van de productie zijn ook caveerne TR-8 en het TR-4/6-subcluster verbonden met het grote cluster. De laatste twee verbindingen

hoogstwaarschijnlijk door contact met de dichtstbijzijnde TR-5 caveerne. Dit resulteerde in oktober 2002 in een volledige connectiviteit van alle TR cavernes. Een extra verbinding met caveerne VE-4 via caveerne TR-7 in november 2009 resulteerde in volledige verbondenheid van cavernes TR-1..8 / VE-4 die de huidige grote cluster vormen.

Caverne VE-1, die in tegenstelling tot de andere cavernes alleen in ZE-III 2b/3b is ontwikkeld, is nog steeds zelfstandig.

Hoewel eerder een verband tussen VE-2 en VE-3 werd gerapporteerd ²⁾, duiden de lage compressibiliteit van 180 m³/bar en het lage squeeze-potentieel van caveerne VE-3 erop dat de gesuspendeerde caveerne VE-2 en caveerne VE-3 nog steeds zelfstandig zijn.

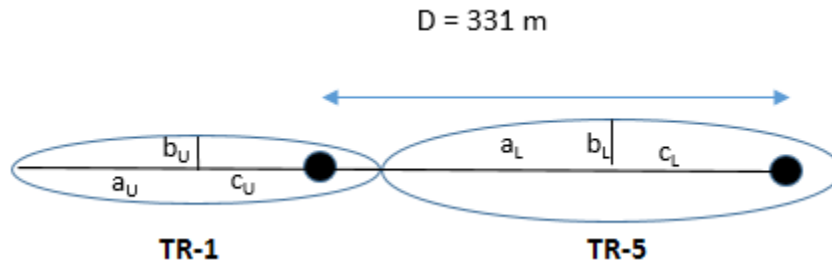
Momenteel wordt door druk aflatens pekels geproduceerd uit het grote cluster en zelfstandige cavernes TR-9 en VE-3.

2.2 De aard van hydraulische verbindingsspaden

Volgens de productiedata ontstond in november 1996 een permanente hydraulische verbinding tussen cavernes TR-1 en TR-5 na een periode van 7.8 jaar Bischofiet oplossen. De zoutlogs van de boorgaten laten zien dat Bischofiet aanwezig is in een aantal afzonderlijke lagen die sommeren tot een totale hoogte van 10.6 en 20.6 m voor respectievelijk cavernes TR-1 en TR-5. Voor een verbinding moet een afstand van 331 m worden overbrugd bij een globale opwaartse inclinatie van 9 graden van caveerne TR-5 naar caveerne TR-1. Volgens massabalansberekeningen ²⁾ was op het moment van verbinding ongeveer 260,000 m³ Bischofiet opgelost uit caveerne TR-1 en 370,000 m³ uit caveerne TR-5.

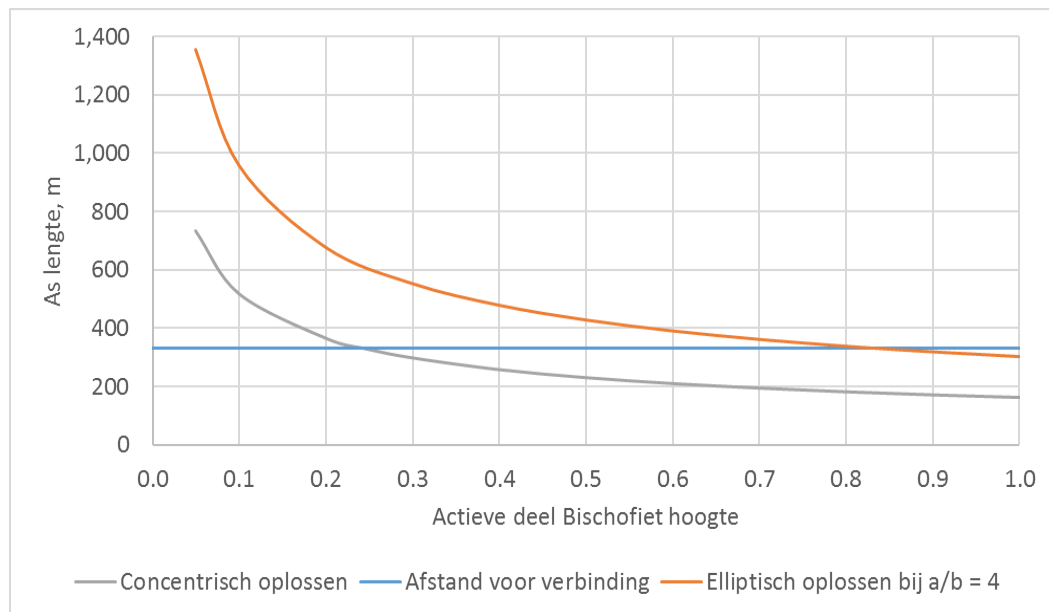
Uit elementaire geometrische berekeningen volgt dat in het geval van concentrische oplossen van Bischofiet rond het injectiepunt slechts een kwart van de totale Bischofiet hoogte in contact zou zijn geweest met oplosmiddel. Berekende radii hierbij zijn 179 m voor TR-1 en 152 m voor TR-5, wat resulteert in een globale oplossnelheid van 23 m/jaar voor TR-1 en 19 m/jaar voor TR-5.

Gezien de helling van de lagen is preferent opwaarts gerichte (up-dip) oplossingsvorm veel waarschijnlijker dan een perfecte cirkelvorm. Een dergelijke opwaartse oplossingsvorm kan worden benaderd met een ellips met lange as a en korte as b met het injectiepunt in het brandpunt. De hoogte van het opgeloste lichaam met volume V kan dan worden berekend met: $H = V / (\pi ab)$.



Figuur 1: Bovenaanzicht van rakende elliptische oplosvorm van cavernes TR-1 en TR-5

In de extreme situatie van een up-dip oplossnelheid die vier maal groter is dan de horizontale oplossnelheid ($a/b = 4$), kan worden berekend dat een 0.84 fractie van de Bischofiet hoogte in contact is geweest met oplosmiddel.

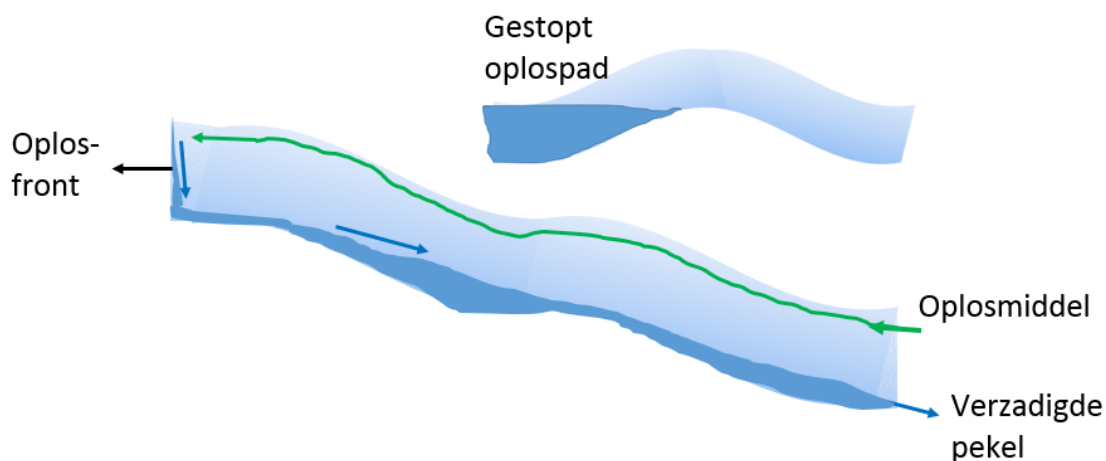


Figuur 2: Afstand tussen oplosfronten van cavernes TR-1 en TR-5 bij concentrisch en elliptisch up-dip oplossen

Dit resulteert in afstand van of 325 m voor caveerne TR-5 ($a_L + c_L$) met opwaartse oplossnelheid van 42 m/jaar en een neerwaartse afstand van 6 m ($a_U - c_U$) vanuit caveerne TR-1 met een neerwaartse snelheid van minder dan 1 m/jaar. Volgens de elliptische benadering is de 331 m lange verbinding tunnelvormig met een breedte (b) van ongeveer 80 m.

Het belangrijkste massatransportmechanisme in de rustiger zones ver verwijderd van het turbulente injectiezone is natuurlijke convectie gedreven door dichtheidsverschillen.

Na turbulente pluimmenging van injectiewater en cavernezout in de caverne stroomt de licht verdunde pekkel opwaarts naar de oplossende Bischofiet wand, waar een verzadigde pekkel ontstaat. De aldus zwaardere pekkel migreert naar het centrum van caverne zoals afgebeeld in figuur 3.

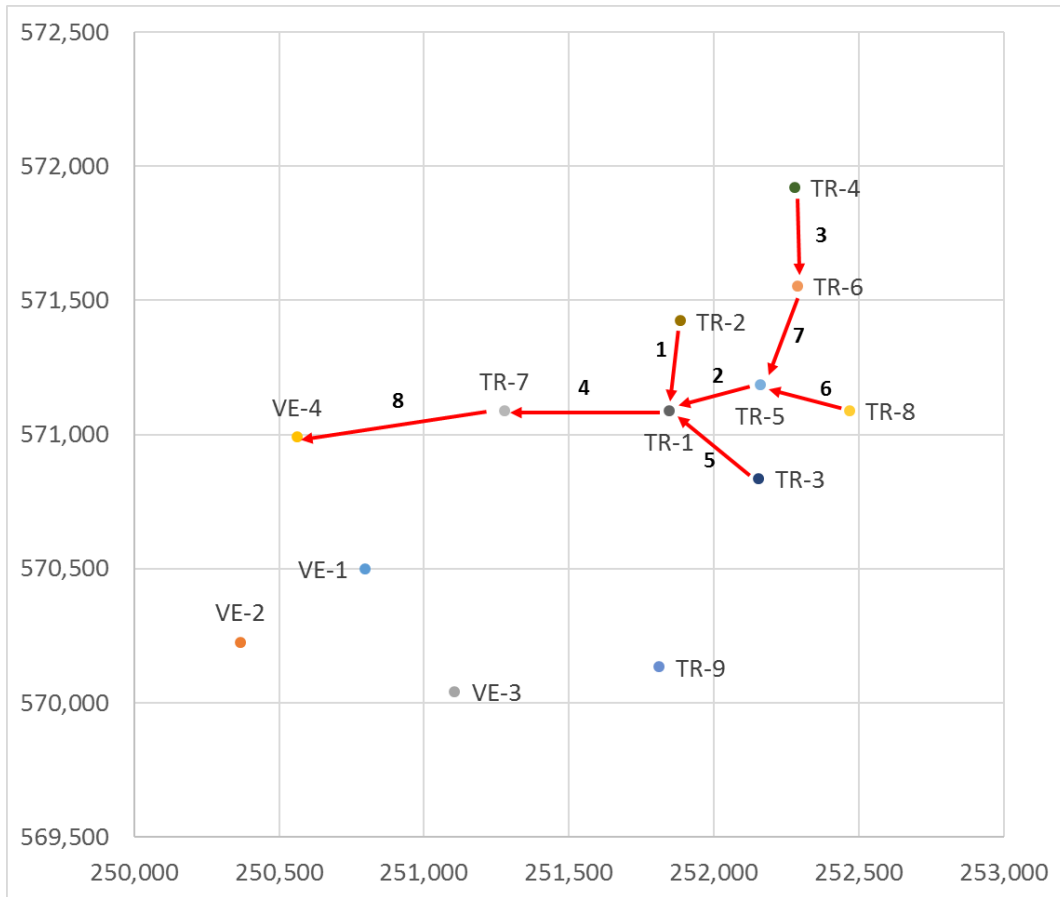


Figuur 3: Schematische up-dip oplospaden

Het al of niet ontstaan van een verbinding tussen cavernes hangt af van de structuur en continuïteit van het tussenliggende Bischofiet. De aanwezigheid van een continu doorlopende Bischofiet laag tussen een diepe en een minder diepe caverne bevordert de vorming van een verbinding. In geval van een neerwaartse vervorming, waarbij het Bischofiet oppervlak wordt bedekt door verzadigde pekkel, stopt verder oplossen in opwaartse richting.

2.3 Historie van hydraulische verbindingen tussen bestaande cavernes

In figuur 4 wordt de historie van verbindingen weergegeven door pijlen die de opwaartse richting van de Bischofiet lagen volgen tussen de injectiepunten.



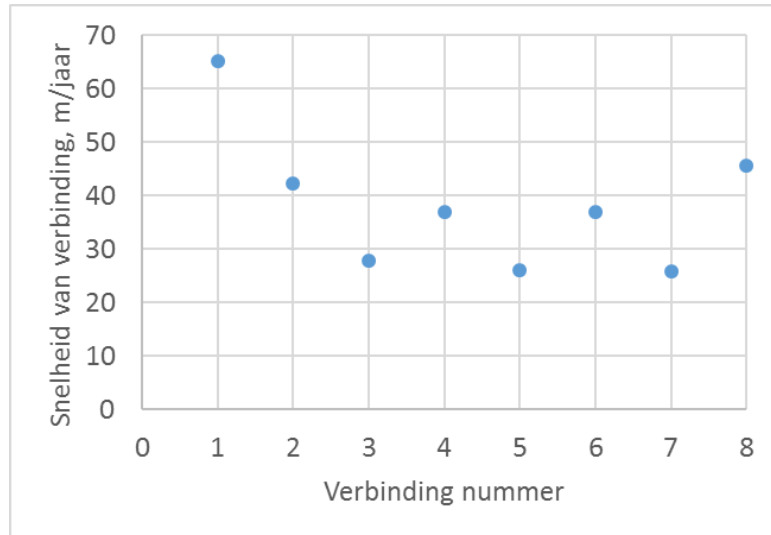
Figuur 4: Ontwikkeling van het Nedmag cluster van 1984 tot 2009

In Tabel I zijn de afstanden tussen injectiepunten langs de Bischofiet laag, de globale inclinatie, het opgelost volume alsmede de verbindingssnelheid weergegeven.

Verbinding	Tussen cavernes	Afstand	Start Bischofiet loging	Tijdstip van verbinding	Tijd nodig voor verbinding	Globale 1b inclinatie	Opgelost Bischofiet lagere caveerne	Globale verbinding snelheid
		m			jaar	graden	m ³	m/jaar
1	TR-2 -> 1	342	jul-84	okt-89	5.3	10	79,780	65
2	TR-5 -> 1	331	jan-89	nov-96	7.8	9	369,768	42
3	TR-4 -> 6	376	jul-84	jan-98	13.5	12	219,059	28
4	TR-1 -> 7	571	feb-84	jul-99	15.4	6	260,577	37
5	TR-3 -> 1	403	jun-84	nov-99	15.4	9	312,844	26
6	TR-8 -> 5	326	mei-92	mrt-01	8.8	9	613,536	37
7	TR-6 -> 5	398	jun-87	okt-02	15.3	12	284,576	26
8	TR-7 -> VE-4	725	okt-93	sep-09	15.9	4	980,841	46

Tabel I: Afstand tussen cavernes, duur Bischofiet oplossen tot verbinding, globale inclinatie en snelheid van verbinding

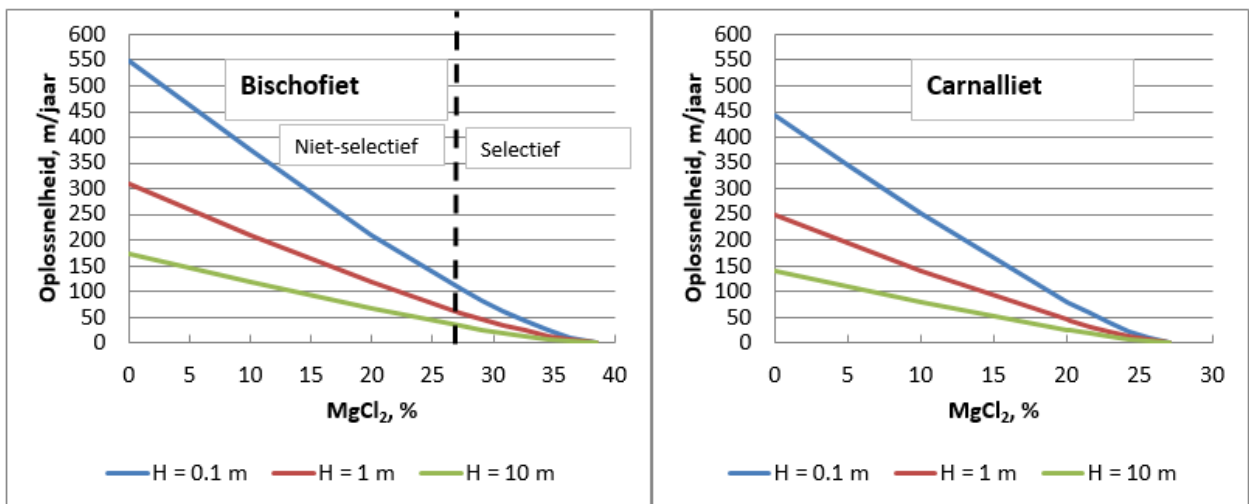
De gevonden globale snelheid van verbinding is gemiddeld 38 m/jaar met een maximum van 65 m/jaar. Tegengesteld de verwachting was er geen significante correlatie hiervan met inclinatie, opgelost Bischofiet volume of het volume geïnjecteerd water.



Figuur 5: Globale snelheid van verbinding

2.4 Theoretische oplossnelheid van Bischofiet en Carnalliet

De oplossnelheid van magnesiumzouten kan worden benaderd met de Durie en Jessen³⁾ aanname dat deze wordt bepaald door de concentratiegradiënt over een dunne grenslaag aan een verticale cavernewand. De oplossnelheid is afhankelijk van het zouttype, de concentratie in het oplosmiddel, de temperatuur en de hoogte (H) van de oplossende wand.



Figuur 6: Oplossnelheid van Bischofiet bij 67 °C en Carnalliet bij 62 °C als een functie van cavernen concentratie bij zoutwand hoogten van: 0.1, 1 and 10 m.

Bij een wandhoogte van 1 m bedraagt de oplossnelheid van Bischofiet in puur water bij 67 °C ongeveer 300 m/jaar en die van Carnalliet bij 62 °C ongeveer 250 m/jaar.

Als gevolg van turbulente pluimmenging mengt geïnjecteerd water effectief met verzadigde caveerne-pekkel, waarbij een licht verdunde pekkel ontstaat dat als oplosmiddel fungeert. Uit relevante fasediagram kan worden afgeleid dat voor het selectief oplossen van Bischofiet een minimale oplosmiddel concentratie van 27 % MgCl₂¹⁾ nodig is. Bij lagere MgCl₂-concentraties lossen naast Bischofiet ook Carnalliet, Haliet en Kieseriet op, waarbij een minder zuivere Carnallitische zoutoplossing wordt gevormd.

Gegeven een injectiesnelheid van 20 - 50 m³/uur, die volumetrisch laag ten opzichte van een typisch 1b caveerne volume van 500.000 m³, zal de efficiënte turbulente pluimmenging⁴⁾ naar verwachting een zeer beperkte lokale verdunning geven tot een MgCl₂ concentratie van 33 %.

Hoogte	Oplossnelheid, m/jaar	
	@ 27 % MgCl ₂	@ 33 % MgCl ₂
0.1	106	42
1	60	24
10	34	13

Tabel II: Theoretische Bischofiet oplossnelheid bij 27 en 33 % MgCl₂

De theoretische oplossnelheden bij 33% MgCl₂ voor een Bischofiet hoogte van 1 m of lager zijn goed vergelijkbaar met de gevonden caveerne verbindingssnelheden van 26 - 65 m/jaar.

Dit leidt tot de conclusie dat hydraulische verbindingen tussen ZE-III 1b cavernes kunnen ontstaan door het oplossen van continue Bischofite lagen dunner dan 1 m. De resulterende oplospaden volgen de sterk vervormde Bischofiet structuren, waardoor een kronkelig netwerk van kanalen tussen verbonden cavernes ontstaat.

3. MOGELIJKE TOEKOMSTIGE VERBINDINGEN

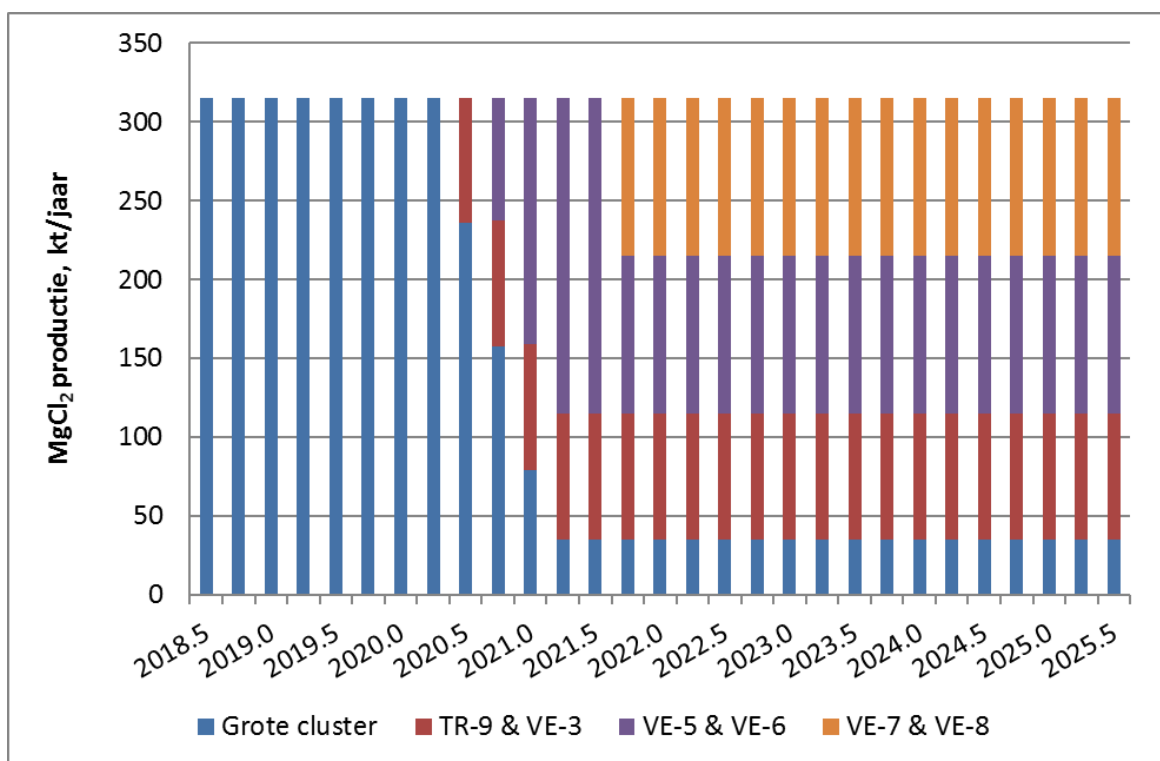
3.1 Productie schema volgens het 2018 Winningsplan

In het 2018 Winningsplan¹⁾ is een productie van 315 ktpa MgCl₂ voorzien. In eerste instantie zal de belangrijkste pekkelproductie afkomstig zijn van het aflaten uit het grote TR-1..8 / VE-4 cluster. Wanneer de pekkelproductie uit het grote cluster geleidelijk afneemt, als gevolg van een afnemend vrije pekkelvolume, moet deze worden aangevuld met productie uit bestaande cavernes TR-9 en VE-3.

Bij verder teruglopende clusterproductie zullen, nog onder het 2013 Winningsplan, VE-5 en VE-6 worden geboord in 2019. Na initiële cavernewikkeling gaan deze vanaf 2020 bijdragen aan pekelpductie, eerst onder bijna-lithostatische druk condities. Na 2 - 3 jaar bijna-lithostatische omstandigheden zal hun druk worden verminderd om squeezeproductie te starten.

In 2020 zullen VE-7 en VE-8 worden geboord die, na de initiële cavernewikkeling de pekelpductie bij bijna-lithostatische drukcondities, in 2021 gaan ondersteunen. Na ongeveer 2 - 3 jaar opereren bij bijna-lithostatische drukcondities zal de squeezeproductie worden gestart vanuit deze cavernes.

Dit scenario wordt getoond in Figuur 7, of dit kan worden gerealiseerd hangt af van vele factoren die slechts gedeeltelijk door Nedmag kunnen worden beïnvloed.



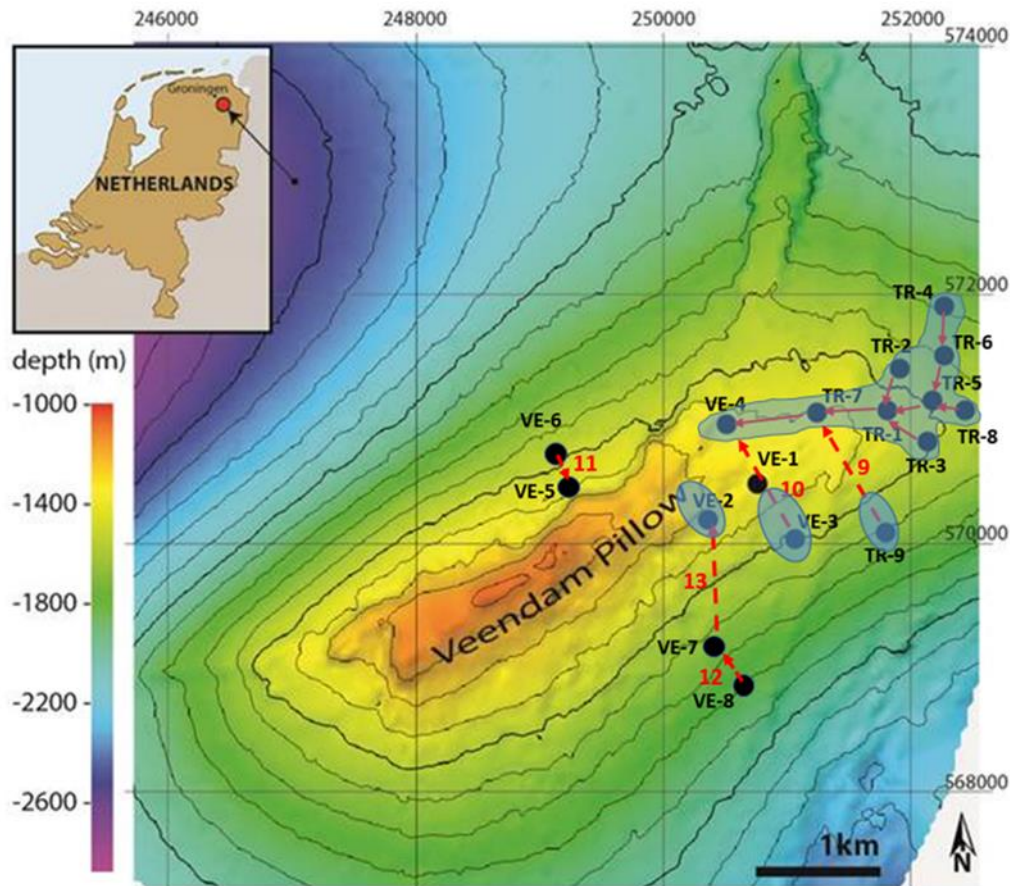
Figuur 7: Productieschema bij 315 kt/jaar MgCl₂ productie volgens het 2018 Winningsplan

Cavernes/cluster	Gemiddelde pekel productie
	m ³ /h
Cluster TR-1..8/VE-4	105 --> 10
TR-9 + VE-3	23
VE-5 + VE-6	28 - 56
VE-7 + VE-8	28 - 56

Tabel III: Verwachtte caveerne productie stromen bij 315 kt/jaar MgCl₂ productie volgens het 2018 Winningsplan

3.2 Positie van bestaande en nieuwe cavernes en onderlinge afstanden hiervan

De positie van de nieuwe cavernes VE-5 ... 8 is gebaseerd op seismische interpretatie met de 1b laagdikte en lage akoestische impedantie als een proxy voor de aanwezigheid van gebieden met dikke Bischofiet-laag.



Figuur 8: Hoogte-contouren van top zout, omtrekcontouren van huidige cavernes en cluster in ZE-III 1b, positie van bestaande en nieuwe cavernes, richtingen van bestaande (vaste pijlen) en potentieel nieuwe (gestippelde pijlen) hydraulische verbindingen

In Figuur 8 is ook de richting van up-dip oplospaden in het Bischofiet (9 tot 13) die kunnen leiden tot hydraulische verbindingen tussen bestaande en nieuwe cavernes weergegeven.

Omdat hiervoor een fysisch onrealistische down-dip oplosrichting nodig is worden er geen verbinding verwacht tussen caveerne VE-5 en naburige cavernes.

Een potentiële verbinding (10) tussen cavernes VE-3 en VE-4 zal niet resulteren in contact met VE-1 omdat de laatste uitsluitend in het ondiepere ZE-III 2b / 3b Carnalliet is ontwikkeld.

3.3 Geschatte duur van Bischofiet oplossen voor nieuwe verbindingen

De gevonden gemiddelde en maximale verbindingssnelheden van 38 en 65 m/ jaar maken het mogelijk een ruwe schatting te maken van de gemiddelde en minimale tijd nodig om een hydraulische verbinding te maken vanaf start Bischofiet oplossen.

Potentiële verbinding	Verbonden cavernes	Afstand m	Globale 1b inclinatie graden	Tijd nodig voor verbinding	
				@ 38 m/jaar jaar	@ 65 m/jaar jaar
9	TR-9 -> 7	1,094	13	29	17
10	VE-3 -> 4	1,093	6	28	17
11	VE-6 -> 5	382	23	10	6
12	VE-8 -> 7	359	22	9	6
13	VE-7 -> 2	1,076	19	28	17

Tabel IV: Geschatte duur vanaf start Bischofiet oplossen voor het maken van een hydraulische verbinding

De tijd die nodig is voor de hydraulische verbinding (9) tussen de bestaande cavernes TR-9 en TR-7 wordt geschat op 17 tot 29 jaar. Gegeven de start van Bischofiet oplossen van caverne TR-9 in 2012 zal de verbinding op zijn vroegst in 2029 plaatsvinden.

De tijd die nodig is voor de hydraulische verbinding (10) tussen de bestaande cavernes VE-3 en VE-4 wordt geschat op 17 tot 28 jaar. Gegeven de start van Bischofiet oplossen van caverne VE-3 in 1992 zou deze al in 2009 via caverne VE-4 verbonden moeten zijn met het grote cluster, dit is tot op heden niet waargenomen.

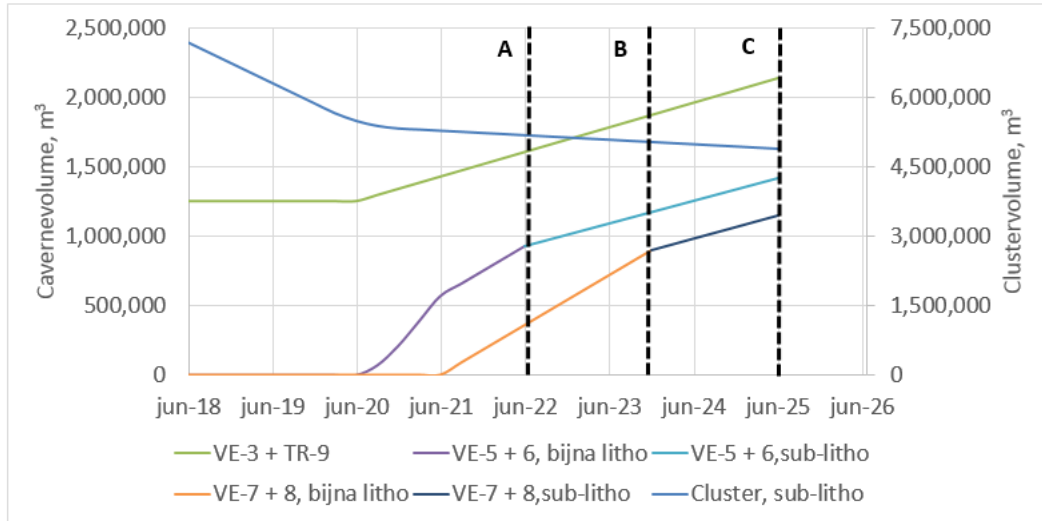
De tijd die nodig is voor paarsgewijze hydraulische verbindingen (11 en 12) tussen de nieuwe cavernes VE-5 & VE-6 en VE-7 & VE-8 wordt geschat op 6 tot 10 jaar. In tegenstelling tot hetgeen in de inleiding is vermeld, is het onwaarschijnlijk dat de nieuwe VE-cavernes tijdens Periode 1 van 2018 Winningsplan met elkaar zullen verbinden.

De geschatte tijd voor het verbinden van VE-7 met VE-2 is 17 tot 28 jaar, waardoor het uiterst onwaarschijnlijk is dat deze verbindingen gaan ontstaan gedurende Periode 1 van het 2018 Winningsplan.

4. OPERATIONELE EFFECTEN VAN CAVERNE VERBINDINGEN

4.1 Cavernevolumen ontwikkeling gedurende Periode 1 van het 2018 Winningsplan

De verwachte ontwikkeling van het totaal pekelvolume gedurende Periode 1 van het 2018 Winningsplan is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9: Pekelvolumen ontwikkeling van het cluster en cavernes gedurende Periode 1 van het 2018 Winningsplan

4.2 Effect van caverne verbindingen tijdens Periode 1 van het 2018 Winningsplan

Omdat de gedetailleerde structuur van Bischofiet tussen bestaande boorgaten niet bekend, cavernes VE-5..8 zijn nog niet geboord, is de nauwkeurigheid van de voorspelling van nieuwe caverne verbindingen beperkt. Om deze redenen is een analyse gemaakt van de mogelijke operationele effecten van nieuwe caverne verbindingen op momenten zoals aangegeven in bovenstaande Figuur 9 met:

- Einde bijna-lithostatische productieperiode van VE-5 en VE-6
- Einde bijna-lithostatische productieperiode van VE-7 en VE-8
- Einde van Periode 1 na de productie van 1.7 miljoen ton $MgCl_2$, voorlopig aangenomen in 2025 maar dit moment is afhankelijk van de actuele productie en andere factoren.

De volumetrische uitwisseling tussen cavernes bij verbinden is berekend op basis van drukvereffening via een verbindingspunt gevormd op de diepte van Bischofiet lagen zoals afgeleid van uit boorkernen en boorlogs. Voor de nieuwe VE-putten is het verbindingspunt aangenomen op de gemiddelde diepte van de 1b laag, zoals afgeleid uit de seismische data. De effecten op cavernedrukken zijn geëvalueerd op basis van de

caverne compressibiliteit, uitgaande van een verhouding van 337 m³/bar per miljoen m³ cavernevolumen zoals is afgeleid uit historische gegevens van het grote cluster ⁵⁾.

Mogelijke hydraulische verbinding (9) tussen TR-9 en het grote cluster via TR-7

Caverne TR-9 zal naar verwachting opereren op een sub-lithostatische druk van ongeveer 75 bar ten opzichte van de diepte van de laatst gecementeerde casingschoen (LCC). Terwijl het grote cluster leegloopt door aflat van vrij pekervolume, zal de clusterdruk gemeten aan de TR-7 annulus in de tijd afnemen. Door de hogere TR-9-druk stroomt er bij hydraulisch contact tot maximaal 13,000 m³ pekkel naar het cluster.

Moment	Drukken voor verbinding			Pekel uitwisseling	Drukken na verbinding		
	TR-9, 1b	Clust. TR-7	TR-7, ann.		TR-9, 1b	Clust. TR-7	TR-7, ann.
	bar	bar	bar	m ³	bar	bar	bar
A	305	222	63	8,886	246	228	68
B	305	218	58	10,980	242	224	65
C	305	212	53	13,399	239	220	61

Tabel V: Pekeluitwisseling en drukeffecten bij een verbinding in 1b tussen caverne TR-9 en het TR1..8/VE-4 cluster via caverne TR-7

Als gevolg hiervan neemt de clusterdruk maximaal met 8 bar toe, maar zal ver onder de druk van 96 bar blijven om de tijdelijke opening die zich voordeed op 20 april 2018 te heropenen. De caverne druk van TR-9 zal maximaal 56 bar afnemen en moet op dit niveau worden gehandhaafd om verdere pekkelstroom naar het grote cluster te voorkomen. Dit zal leiden tot een hogere squeeze snelheid van caverne TR-9, maar zal worden gecompenseerd door de verminderde squeeze snelheid uit het cluster.

In het geval van een verbinding direct bij herstart van de injectie in caverne TR-9 bij een verwachte clusterdruk van 67 bar, ligt de maximale drukverhoging tot 72 bar ruim onder de heropeningsdruk van 96 bar.

Mogelijke hydraulische verbinding (10) tussen VE-3 en het grote cluster via VE-4

Caverne VE-3 opereert op de reguliere sub-lithostatische druk van 26 bar ten opzichte van LCC diepte. Bij contact van caverne VE-3 met het grote cluster via caverne VE-4, zal afhankelijk van het moment tot maximaal 33,000 m³ pekkel van caverne VE-3 naar het grote cluster stromen vanwege het relatief hoge initiële drukverschil.

Moment	Drukken voor verbinding			Pekel uitwisseling	Drukken na verbinding		
	VE-3, 1b	Clust. VE-4	TR-7, ann.		VE-3, 1b	Clust. VE-4	TR-7, ann.
	bar	bar	bar	m ³	bar	bar	bar
A	314	224	63	23,842	250	238	76
B	314	219	58	28,408	249	236	75
C	314	214	53	33,374	247	234	73

Tabel VI: Volumetrische uitwisselings- en drukeffecten in het geval van een verbinding in 1b tussen cavernen VE-3 en het TR1..8 / VE-4-cluster via cavernen VE-4

Als gevolg hiervan neemt de clusterdruk toe met een maximum van 20 bar tot 73 bar, wat ver onder de heropeningsdruk van 96 bar ligt. De VE-3 cavernedruk zal met een maximum van 56 bar verminderen, wat theoretisch de squeezesnelheid hiervan zal verhogen. De werkelijke toename zal beperkt zijn gezien het praktisch gevonden lage squeeze-potentieel van cavernen VE-3. Een verhoogde VE-3 squeezesnelheid zal worden gecompenseerd door een reductie van squeezesnelheid uit het cluster.

In geval van een directe verbinding bij herstart van de injectie in cavernen VE-3 bij een verwachte clusterdruk van 67 bar, ligt de maximale drukstijging tot 80 bar ruim onder de 96 bar heropeningsdruk van het cluster

Mogelijke hydraulische verbinding (11) tussen VE-6 en VE-5

De nieuwe cavernen VE-6 en VE-5 opereren de eerste 2 tot 3 jaar op een licht sub-lithostatische druk van 20 bar met betrekking tot LCC diepte. In het onwaarschijnlijke geval van een voortijdige verbinding zal maximaal 800 m³ pekelsstromen van cavernen VE-6 naar cavernen VE-5. Dientengevolge zal de VE-5 cavernedruk met 6 bar toenemen ten koste van een drukverlaging van 5 bar bij cavernen VE-6. Om onder de minimumgrens van 20 bar sub-lithostatisch bij cavernen VE-5 te blijven moet de sub-clusterdruk worden vermindert met 5 bar. Dit voorkomt verdere uitwisseling en maakt het mogelijk de cavernen verder te ontwikkelen naar de gewenste grootte die nodig is voor de toekomstige sub-lithostatische squeeze-productie.

Moment	Drukken voor verbinding		Pekel uitwisseling	Drukken na verbinding	
	VE-6, 1b	VE-5, 1b		VE-6, 1b	VE-5, 1b
	bar	bar		bar	bar
A	390	357	808	385	363
B	325	292	1,023	320	298
C	325	292	1,238	320	298

Tabel VII: Volumetrische uitwisseling en drukeffecten in geval van een 1b verbinding tussen cavernes VE-6 and VE-5

In geval van een verbinding tijdens de squeezeproductie zal een vergelijkbare drukverandering van 5 bar optreden en maximaal 1,200 m³ worden uitgewisseld. vervangen. Dientengevolge vermindert de VE-6 cavernedruk met 5 bar, hetgeen de squeeze snelheid hieruit zal verhogen, wat automatisch zal worden gecompenseerd door een vermindering van de squeeze snelheid van caveerne VE-5.

Mogelijke hydraulische verbinding (12) tussen VE-8 en VE-7

De nieuwe cavernes VE-7 en VE-8 opereren de eerste 2 tot 3 jaar op een licht sub-lithostatische druk van 20 bar ten opzichte van LCC diepte. In het onwaarschijnlijke geval van een voortijdige verbinding zal tot 1,000 m³ pekkel van caveerne VE-8 naar caveerne VE-7 stromen. Dientengevolge zal de VE-7 cavernedruk met 7 bar toenemen ten koste van eenzelfde drukvermindering bij caveerne VE-8. In het geval van een verbinding moet de VE-8 cavernedruk met 7 bar worden verminderd om een minimale sub-lithostatische druk 20 bar bij caveerne VE-7 te handhaven en tevens pekkeluitwisseling tijdens de bijna lithostatische ontwikkeling te beperken.

Moment	Drukken voor verbinding		Pekel uitwisseling	Drukken na verbinding	
	VE-8, 1b	VE-7, 1b		VE-8, 1b	VE-7, 1b
	bar	bar		bar	bar
A	417	384	391	410	391
B	417	384	977	410	391
C	352	319	1,245	345	326

Tabel VIII: Volumetrische uitwisselings- en drukeffecten in het geval van een verbinding in 1b tussen cavernes VE-8 en VE-7

In het geval van een verbinding tijdens de sub-lithostatische squeezeproductie zal een identieke drukverandering van 7 bar optreden en 1,200 m³ pekkel zal uitwisselen. Als resultaat neemt de VE-8 cavernedruk af, waardoor de squeeze snelheid hierin zal

toenemen, een effect dat zal worden gecompenseerd door een afname in squeezenelheid in caveerne VE-7.

Mogelijke hydraulische verbinding (13) tussen VE-7 en VE-2

Zoals hierboven vermeld, is er geen bewijs voor een hydraulische verbinding tussen gesuspenderde caveerne VE-2 en caveerne VE-3. Helaas is de feitelijke VE-2 caverne druk onbekend omdat de casing hiervan is afgesloten met een cement prop. In deze analyse wordt lithostatische druk verondersteld in caveerne VE-2. Vanwege het grote verticale hoogteverschil van 287 m tussen de 1b Bischofiet lagen is er zeer weinig drukverschil bij verbinding gedurende de periode dat caveerne VE-7 opereert onder bijna-lithostatische druk.

Moment	Drukken voor verbinding		Pekel uitwisseling	Drukken na verbinding	
	VE-7, 1b	VE-2, 1b		VE-7, 1b	VE-2, 1b
	bar	bar	m ³	bar	bar
A	384	345	16	384	346
B	384	345	26	384	346
C	319	345	4,763	344	305

Tabel IX: Volumetrische uitwisseling en drukeffecten in het geval van een 1b-verbinding tussen cavernes VE-7 en VE-2

In het geval van een verbinding tijdens de squeezeproductie van caveerne VE-7 zal ongeveer 4,800 m³ pekkel naar binnen stromen vanuit caveerne VE-2, wat resulteert in een drukverhoging van 25 bar. Als gevolg daarvan zal caveerne VE-7 squeezenelheid afnemen wat kan worden gecorrigeerd door de productie hieruit te verhogen, met als neveneffect dat de uitstroom van hoge kwaliteit pekkel uit caveerne VE-2 wordt bevorderd.

4.3 Caverne verbindingen tijdens Periode 2 van het 2018 Winningsplan

In Periode 2 van het 2018 Winningsplan wordt afgezien van het incidenteel spoelen van de verbuizingen niet meer geïnjecteerd. Het volume aan injectiewater is daardoor verwaarloosbaar klein en daarmee ook het oplossen van extra zout, dit maakt het onwaarschijnlijk dat in deze fase additionele caverneverbindingen ontstaan.

5. CONCLUSIES

Een analyse van de historie van hydraulische verbindingen tussen cavernes toont aan dat de waargenomen verbindingssnelheden vergelijkbaar zijn met de oplosnelheid van Bischofiet waarbij het massatransport wordt beperkt door diffusie door een grenslaag aan de oplossende Bischofiet wand.

Caverne verbindingen ontstaan door het up-dip selectief oplossen van Bischofiet, aanwezig is in continue lagen met een dikte tot 1 m, in licht verdunde caverne-pekkel. Hierbij wordt uiteindelijk een kronkelig netwerk van kanalen gevormd.

Gegeven een gemiddelde oplosnelheid van 38 m/jaar met een maximum van 65 m/jaar is het onwaarschijnlijk dat caverne TR-9 verbinding zal maken met het TR-1..8/VE-4 cluster gedurende Periode 1 van het 2018 Winningsplan. Een verbinding tussen caverne VE-3 en het TR-1..8 / VE-4-cluster kan echter niet volledig worden uitgesloten. Mocht een dergelijke verbinding optreden na herstart van de injectie in caverne VE-3 dan zal daarbij de clusterdruk ver onder de heropeningsdruk van 96 bar blijven.

Het is onwaarschijnlijk dat de nieuwe cavernes VE-5 & 6 en VE-7 & 8 op hun geplande posities in de loop van Periode 1 paarsgewijs verbinden. Mochten ze mogelijk verbinding maken, dan zullen hun drukken met 5 bar moeten worden verminderd.

Een verbinding tussen caverne VE-5 en de TR-1..8 / VE-4 cluster is niet mogelijk, omdat hiervoor het fysisch onrealistische down-dip oplossen nodig is.

Gezien de grote afstand tussen cavernes VE-7 en VE-2 is het onwaarschijnlijk dat ze zich verbinden tijdens Periode 1. Een mogelijke verbinding zal de VE-7 caverne druk met zo'n 25 bar verhogen, wat kan worden gecorrigeerd door de aanpassing van de injectie / productie balans van deze caverne.

Gezien de verwaarloosbare waterinjectie tijdens bleed-off van het cluster en cavernes in Periode 2 is het risico voor het maken van extra caverne-verbindingen in deze fase minimaal.

-----REFERENTIES-----

1. Nedmag, Winningsplan 2018
2. J. Visser. Mass balance study of the Nedmag caverns. Modelling of magnesium salt dissolution and calculated squeeze volume, version 2, 24 February 2017
3. R.W. Durie and F.W. Jessen. Mechanism of the dissolution of salt in the formation of underground salt cavities. Society of Petroleum engineers Journal, June 1964, p. 183 – 190.
4. W.R Velema, H. Bruining, J. Bullen and J. Visser. Natural Convection Effects on Magnesium Solution Mining. 12th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Oxford UK, 6-9 September 2010.
5. P. Fokker. Evaluatie oorzaak pekellekkage in Nedmag pekelcluster 20 april 2018, update juli. Well Engineering Partners, 18 Juli 2018, p. 5.