



Aanvulling op winningsplan 2018

Verbijzondering en onzekerheidsanalyse bodemdalingsprognose
Het risico van caverneverbindingen
Vergelijking bodemdalingsprognoses met praktijkmetingen

Nedmag B.V.
Billitonweg 1
9641 KZ Veendam
www.nedmag.nl
omgeving@nedmag.nl

16 september 2019

Inhoudsopgave		
	Samenvatting	2
1.	Inleiding	4
2.	Gebruikte berekeningsmethoden	5
2.1	Massabalansmodel	5
2.2	Berekening vrij pekelvolume	5
2.3	Berekening bodemdaling	6
3.	Voorspelling bodemdaling	7
3.1	Vrije pekelvolume juni 2018 en bodemdaling na bleed-off	7
3.2	Vrije pekelvolume na de productie van 1.7 Mton zout en bodemdaling na bleed-off	8
3.3	Effect actieve winning uit TR-9 en VE-3 op bodemdaling	9
4.	Onzekerheden	10
4.1	Integrale onzekerheidsanalyse bodemdaling	10
4.2	Connectie van TR-9 of VE-3 met het cluster	11
5.	Praktijkervaring sinds juni 2018 (startpunt bodemdalingsprognose winningsplan)	14
5.1	Bodemdaling volgens InSAR	14
5.2	Vergelijking in het winningsplan voorspelde met gemeten bodemdaling	15
5.3	Bepaling vrij 1b pekelvolume in cluster aan de hand van aflat gegevens	15
6.	Conclusies	18
7.	Referenties	20
8.	Bijlagen	21
	Bijlage 1: Tweede opinie NGConsulting en keuze oplosmechanisme	

SAMENVATTING

Op 28 november 2018 heeft Nedmag haar winningsplan 2018 ingediend bij het ministerie van EZK. Het ministerie heeft SodM gevraagd haar te adviseren ten aanzien van het winningsplan. Dit heeft SodM gedaan, samen met TNO, op 27 juni 2019. Het advies bevatte onder andere de volgende belangrijke opmerkingen:

1. De door Nedmag aangehouden veiligheidsmarge van 7 cm op de geprognostiseerde einddaling van 88 cm is niet onderbouwd middels een onzekerheidsanalyse en is te klein.
2. De in het winningsplan beschreven actieve winning uit TR-9 en VE-3 kan op het diepste punt van de bodemdaling tot 10 cm per caverne additionele daling leiden en is derhalve ongewenst.
3. De beschreven actieve winning uit TR-9 en VE-3 leidt tot een kans op het verbonden raken van TR-9 en/of VE-3 met het TR-cluster, wat tot onacceptabele drukstoten in het cluster kan leiden. Deze actieve winning is derhalve ongewenst.

De voorliggende aanvulling op het winningsplan 2018 bevat de volgende informatie:

1. Een opdeling van de bodemdaling in bijdragen van de diverse cavernes. Hieruit blijkt dat actieve winning uit TR-9 en VE-3 tijdens periode 1 uit het winningsplan per caverne tot 2 cm additionele daling op het diepste punt van de kom leidt. Dit is beduidend minder dan de 10 cm die in het SodM advies genoemd wordt.
2. Een integrale onzekerheidsanalyse ten aanzien van de in het winningsplan opgenomen bodemdaling. Hieruit blijkt dat aan de prognose van 88 cm een nauwkeurigheid van -9/+7 cm toegekend dient te worden.
3. Een vergelijking van gemeten bodemdaling met de prognose in het winningsplan. De bodemdalingsprognoses in het winningsplan hebben als startpunt juni 2018. Sinds juni 2018 produceert Nedmag pekels door het aflaten van het cluster, van VE-3 en van TR-9. Daarbij is circa 5 cm bodemdaling opgetreden, gemeten met GPS en met satellietmetingen (InSAR). Deze gemeten daling is in zeer goede overeenstemming met de prognose in het winningsplan.
4. Een bepaling van de hoeveelheid vrije pekels in het cluster in de 1b laag in juni 2018, gebaseerd op ervaring met het aflaten van het TR-cluster over de periode juli 2018 t/m juli 2019. Deze bepaling komt uit op 2.05 Mm^3 , ongeveer 10% lager dan de via massa- en volumebalansen berekende 2.3 Mm^3 die als uitgangspunt genomen is bij het opstellen van de bodemdalingsprognoses in het winningsplan. Het op basis van praktijkgegevens bepaalde volume valt ruim binnen de volume-range van de integrale onzekerheidsanalyse. Tevens lijkt het bij de bodemdalingsprognoses gehanteerde volume aan de conservatieve kant.
5. Een nadere uitwerking van de kans op en de mogelijke gevolgen van het ontstaan van een verbinding tussen TR-9 en/of VE-3 enerzijds en het TR-cluster anderzijds, tijdens de in het winningsplan beschreven actieve winning uit deze twee cavernes. Voor VE-3 is het ontstaan van een verbinding denkbaar, voor TR-9 is de kans zeer klein. Onacceptabele gevolgen van een eventuele verbinding zijn echter zeer onwaarschijnlijk, mede door het nemen van mitigerende maatregelen.

Geconcludeerd wordt dat de bodemdalingsprognoses in het winningsplan voldoende nauwkeurig zijn en dat de gehanteerde veiligheidsmarge volstaat. Tevens wordt geconcludeerd dat additionele daling door actieve winning uit TR-9 en VE-3 beperkt van omvang is, en dat eventuele verbindingen van deze cavernes met het TR-cluster door deze winning geen onacceptabele risico's voor mens of milieu opleveren.

Naast de voorliggende aanvulling is als onderdeel van het winningsplan in opdracht van Nedmag een vervolgstudie uitgevoerd naar de benodigde maatregelen op het gebied van de waterhuishouding. Deze studie is aan het ministerie van EZK verstrekt. Dit onderwerp wordt in de voorliggende aanvulling daarom niet behandeld.

1. INLEIDING

Op 19 juli 2019 heeft Nedmag inzage gekregen in het advies van SodM d.d. 27 juni 2019 over het Nedmag winningsplan 2018. In het advies wordt onder andere ingegaan op onzekerheden ten aanzien van de voorspelde bodemdaling van 88 cm na aflaten van alle vrije pekel na de actieve winningsperiode 1. Daarbij geeft SodM aan dat gezien deze onzekerheden, additionele winning uit cavernes TR-9 en VE-3 een te groot effect heeft op bodemdaling op het huidige diepste punt. Het waterschap Hunze en Aa's heeft in dit verband aangegeven bij 80 cm de limiet te hebben bereikt qua wat zij redelijkerwijs kan doen om nadelige effecten van bodemdaling te beperken. Inmiddels heeft Nedmag een vervolgstudie uitgevoerd waarin de waterhuishoudkundige maatregelen om bodemdaling te compenseren zijn uitgewerkt ¹⁾. Dit rapport is op 29 juli 2019 ingediend bij het Ministerie van EZK en maakt onderdeel uit van het winningsplan maar wordt in deze memo niet verder besproken.

SodM heeft TNO-AGE gevraagd de bodemdaling als gevolg van het aflaten van pekel uit het cluster te scheiden van de bijdrage als gevolg van voortzetting van de actieve winning uit TR-9 en VE-3 en die van de ontwikkeling van de nieuwe cavernes VE-5 t/m VE-8. Daarnaast wordt een toelichting gevraagd op de keuze uit de zeven varianten van de zout-chemische oplosprocessen uit de second opinion van NGConsulting op de Nedmag massabalans ⁴⁾. In de voorliggende aanvulling worden de verschillende bijdragen aan bodemdaling toegelicht en wordt ingegaan op de keuze voor de zout-chemische processen waarop het Nedmag massabalans model is gebaseerd.

De gevolgen van de herontwikkeling van TR-9 en VE-3 op bodemdaling, evenals de risico's van een connectie met het cluster en het beperken van mogelijke gevolgen hiervan worden toegelicht.

Inmiddels heeft Nedmag meer dan een jaar ervaring met het aflaten van het cluster en met het gemeten effect hiervan op bodemdaling. Gegevens hierover waren ten tijde van het indienen van het winningsplan 2018 nog niet beschikbaar. De voorliggende aanvulling op het winningsplan bevat een analyse van het aflaatgedrag van het cluster en de betekenis hiervan voor bodemdaling en onzekerheden.

2. GEBRUIKTE BEREKENINGSMETHODEN

2.1 Massabalans model

Het winningsplan 2013 is in 2014 goedgekeurd door het ministerie van EZ onder voorwaarde dat Nedmag onderzoek zou doen naar het lagere volume van de geïnverteerde bodemdalingstroom ten opzichte van het squeezevolume berekend met het BDS massabalans model. In dit onderzoek heeft Nedmag de massabalans aangescherpt, incorrecte injectie diepten en loofasen gecorrigeerd en is ook het effect van hydraulische verbindingen tussen cavernes meegenomen. Uiteindelijk gaf dit voor de winningsperiode 1972 – juni 2015 een meest waarschijnlijk squeezevolume van 6.2 Mm³, een waarde die 21 % hoger is dan het verwachte volume van 5.1 Mm³ ²⁾. Dit verwachte komvolume is berekend als 85 % van het BDS squeezevolume zoals volgde uit een inversie studie uitgevoerd door TNO in 2011 ³⁾. NGConsulting heeft op verzoek van Nedmag een tweede opinie gegeven op de Nedmag massabalans versie 1. De resultaten hiervan ⁴⁾ worden in meer detail besproken in bijlage 1. In deze bijlage worden de 7 uiteenlopende oplos-scenario's van NGConsulting na correctie voor fysische onmogelijkheden getoetst aan praktijkgegevens van TR-9. De conclusie hieruit is dat door de effectieve menging van injectiewater met aanwezige cavernepelk er geen belangrijke verticale concentratie gradiënten aanwezig zijn in de Nedmag cavernes. Bij de injectie van water in een 1b caveerne lost selectief bischofiet op, een oplosproces dat kan worden beschreven als directe vorming van bischofietische pekkel in één stap. Volgens NGConsulting is alleen bij een fysiek van de productie uit een onderliggende verbonden bischofietische 1b caveerne gescheiden waterinjectie in een carnallitische 2b/3b caveerne, sprake van bischofietische pekkelvorming in twee stappen (via de tussenstap carnallitische pekkel). In alle andere situaties moet worden uitgegaan van directe vorming van bischofietische pekkel, die meer volumetrische expansie geeft. Daarnaast werd aanbevolen cavernepelk dichtheden te hanteren bij in-situ temperaturen. Door beide effecten (implementatie van nieuwe inzichten ten aanzien van zoutchemie plus gebruik dichtheden bij in situ temperaturen) neemt de berekende pekkelproductie zonder squeeze toe en is de productie uit squeeze (caverneconvergentie) lager.

Nedmag heeft gedetailleerde berekeningen uitgevoerd volgens de aanbevelingen van NGConsulting, in de vorm van massabalans versie 2 ⁵⁾. Dit gaf voor de periode 1972 - juni 2015 een squeezevolume van 5.2 Mm³ bij een totaal ondergronds pekkelvolume in juni 2015 van 8.0 Mm³. Het nieuwe squeezevolume komt goed overeen met het verwachte volume van 5.1 Mm³ ⁵⁾.

2.2 Berekening vrij pekkelvolume

Cavernepekkel is aanwezig als gebonden pekkel, opgesloten in de poriën van gebulkte precipitaten en residuen, en vrije pekkel. Bij caverneconvergentie wordt alleen vrije pekkel geproduceerd. Aan de hand van laboratorium oplostesten met TR-9 zoutkernen heeft NGConsulting ⁶⁾ de mate van bulking van residuen en precipitaten bepaald. Zoals NGConsulting aangaf kunnen bulking effecten worden gekwantificeerd door de simulatie van selectief oplossen van hetzij carnalliet, hetzij bischofiet uit een verticale zoutkolom van een gedetailleerd bekende samenstelling. De oplossingsimulatie is door Nedmag uitgevoerd over 10 cm intervallen waarin wordt aangenomen dat boven een kritische grenswaarde van de ontstane porositeit

(ϵ_{\max}) het residu instabiel wordt en bulkt met een bepaalde bulkingfactor (BF). Resulteert een porositeit kleiner dan ϵ_{\max} , dan blijft het residu stabiel en is de hoeveelheid gebonden pekels gelijk aan de porositeit in de matrix. De sommatie over de totale hoogte van de zoutkolom geeft de totale bulking en de verdeling van aanwezige pekels in gebonden en vrije pekels. Voor de bestaande Nedmag cavernes zijn de afzonderlijke bulking effecten berekend voor de gehele productiehistorie van 1972 tot juni 2018. Voor de nog onbekende zoutaanstelling van VE-5 t/m VE-8 is de gemiddelde samenstelling van de 1b sectie van de bestaande TR en VE cavernes aangenomen.

Voor de berekening van vrije pekelsvolumes bij uitvoering van het winningsplan 2018 is op basis van het onderzoek aan de TR-9 zoutkernen ⁶⁾ uitgegaan van default parameters van 40 % voor ϵ_{\max} en een BF van 1.4. Aan eventueel gevormde precipitaten is een zelfde BF toegekend.

2.3 Berekening bodemdaling

Het model waarmee bodemdalingsprognoses worden opgesteld is gebaseerd op een Geertsma-Van Opstal routine met variabel rigide fundament. Invoer data voor het model zijn de locaties en diepten van de bestaande cavernes en squeezevolumes zoals bepaald met de massabalans versie 2 ⁵⁾. Voor afzonderlijke cavernes wordt het eigen squeezevolume ingevoerd, in geval van verbonden cavernes werd het totaal squeezevolume hierover verdeeld. De gemeten bodemdaling over 1993 – 2016, gecorrigeerd voor andere invloeden dan zoutwinning, werd gebruikt om het model te kalibreren ⁷⁾. De bodemdaling van voor 1993 (ca. 4 cm) is door een te beperkt meetnetwerk niet geschikt voor kalibratie van het model. De in de loop van de jaren gemeten verbreding van de bodemdalingssom werd verdisconteerd middels een in de tijd toenemende diepte van het rigide fundament.

Uit de history match over de periode 1993 – 2016 volgde een goede overeenkomst tussen gemeten en berekende bodemdaling met een nauwkeurigheid van 0.7 cm. Hierbij kon bodemdaling van na maart 2012 worden toegeschreven aan squeeze uit TR-1, waar ook het huidige diepste punt ligt.

In de bodemdalingsprognoses ten behoeve van het winningsplan 2018 ⁸⁾ wordt additionele squeeze als gevolg van bleed-off uit het cluster toegewezen aan TR-1. Voor afzonderlijke bestaande en nieuwe cavernes wordt het eigen squeezevolume toegekend en de bijbehorende bijdrage aan bodemdaling separaat berekend.

3. VOORSPELLING BODEMDALING

3.1 Vrije pekelvolume juni 2018 en bodemdaling na bleed-off

Voor de berekening van pekelvolumes in het winningsplan 2018 is gebruik gemaakt van de massabalans versie 2 en default bulking parameters (ϵ_{\max} 40 %, BF 1.4) ⁶⁾. Dit geeft per eind juni 2018 een totaal vrije pekelvolume van 4.5 Mm³, waarvan 3.1 Mm³ aanwezig in snel squeezezende bischofitische 1b secties en 1.4 Mm³ in langzaam squeezezende carnallitische 2b/3b secties. De volledige bleed-off van vooral de 1.4 Mm³ vrije 2b/3b pekel zal enige decennia duren, naar verwachting tot circa 2045. In de bodemdalingsprognose is echter uitgegaan van rigide fundamente diepten zoals die bereikt worden in juni 2025.

Bijdrage uit	Vrije pekel juni 2018, Mm ³			Squeeze, Mm ³		Daling na bleed-off, m
	1b	2b/3b	totaal	vanaf 1972	na bleed-off	2025 kom param.
Cluster	2.28	1.23	3.51	5.65	9.17	0.75
TR-9	0.25	0.00	0.25	0.08	0.33	0.02
VE-3	0.39	0.07	0.46	0.05	0.51	0.02
VE-1	0.00	0.05	0.05	0.02	0.07	0.00
VE-2	0.15	0.04	0.20	0.10	0.29	0.01
VE-5 + 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VE-7 + 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Totaal	3.08	1.40	4.48	5.90	10.38	0.80

Tabel I: Vrije pekelvolumes en bijdrage aan bodemdaling op diepste punt na bleed-off van alle vrije pekel zoals aanwezig in juni 2018.

Volledige aflat van de vrije pekel aanwezig in juni 2018 geeft een totale bodemdaling van 80 cm op het huidige diepste punt. Hiervan is 75 cm deel afkomstig van pekelaflat uit het cluster en 2 cm uit zowel TR-9 als VE-3. Overigens is de aflat van vrije pekel uit VE-2 niet meer mogelijk omdat deze winningsput in 1998 is gesuspendeerd.

De gevoeligheid voor tijdsafhankelijke diepte van het rigide fundament is bepaald door de totale bodemdaling ook te berekenen met rigide fundamente diepten zoals die volgens het SGS model worden bereikt in 2018, 2032 en 2050.

Jaar	Fundament diepten			Daling
	Maximaal	Minimaal	Gemiddeld	
	m	m	m	m
2018	4,277	2,912	3,739	0.81
2025	4,762	3,336	4,170	0.80
2032	5,241	3,781	4,598	0.79
2050	6,391	4,741	5,635	0.79

Tabel II: Maximale daling bij verschillende rigide fundamente diepten.

Verdieping van het rigide fundament in de tijd zoals opgenomen in het SGS model en de resulterende komverbreiding heeft een zeer beperkt effect op de maximale daling. Dit omdat

de kom bij een rigide fundament diepte van 3,700 m al behoorlijk ‘Geertsma-achtig’ is met een afnemende Van Opstal correctie bij toenemende diepte. De keuze voor de rigide fundament diepten van juni 2025 is, gezien de verwachte totale duur van volledige bleed-off die enige decennia zal vergen, een conservatieve keuze.

3.2 Vrije pekervolume na de productie van 1.7 Mton zout en bodemdaling na bleed-off

In het winningsplan 2018 is voorzien dat als onderdeel van de productie van 1.7 Mton zout tijdens periode 1 de snel squeezeende vrije 1b pekels uit het cluster volledig wordt gewonnen. Ter compensatie van de teruglopende cluster squeeze wordt de productie in stand gehouden met actieve winning uit cavernes TR-9 en VE-3. Nadat alle vrije 1b pekels uit het cluster zijn gewonnen zijn de nieuwe cavernes VE-5 t/m -8 noodzakelijk om voldoende pekervolume in stand te houden. De ontwikkeling van het vrije pekervolume en squeeze vanaf juni 2018 tot een cumulatieve zoutproductie van 1.7 Mton, die bij 315 ktpa $MgCl_2$ productie in juni 2025 wordt bereikt, is in onderstaande tabel weergegeven.

Bijdrage uit	Vrije pekels juni 2025, Mm^3			Squeeze, Mm^3		Daling na bleed-off, m
	1b	2b/3b	totaal	vanaf 1977	na bleed-off	2025 kom param.
Cluster	0.00	1.00	1.00	8.17	9.17	0.75
TR-9	0.44	0.00	0.44	0.26	0.70	0.04
VE-3	0.76	0.07	0.83	0.10	0.93	0.04
VE-1	0.00	0.05	0.05	0.02	0.07	0.00
VE-2	0.15	0.04	0.20	0.10	0.29	0.01
VE-5 + 6	0.95	0.00	0.95	0.28	1.23	0.01
VE-7 + 8	0.78	0.00	0.78	0.16	0.94	0.02
Totaal	3.08	1.17	4.24	9.09	13.33	0.87

Tabel III: Vrije pekervolumes en bijdrage aan bodemdaling op het diepste punt na bleed-off van alle vrije pekels, aanwezig medio 2025 na een zoutproductie van 1.7 Mton.

Na bleed-off van alle 4.2 Mm^3 vrije pekels wordt op het huidige diepste punt een bodemdaling verwacht van 87 cm. Hiervan is nog steeds 75 cm afkomstig uit cluster-squeeze, 4 cm uit zowel TR-9 als VE-3 en een beperkte daling van 1 tot 2 cm uit de andere cavernes. In combinatie met 1 cm extra daling als gevolg van de na-verzadiging van off-spec pekels afkomstig uit de ontwikkeling van de nieuwe VE-5 t/m VE-8 cavernes resulteert de in het winningsplan gepronotiseerde bodemdaling van 88 cm.

3.3 Effect actieve winning uit TR-9 en VE-3 op bodemdaling

In onderstaande tabel worden de afzonderlijke bijdragen aan bodemdaling van cluster en cavernes weergegeven na het aflaten van alle vrije pekels volgens het winningsplan en vergeleken met de bijdragen bij het aflaten van alle vrije pekels, aanwezig in juni 2018.

Bijdrage uit	Daling bij bleed-off juni 2018 volumes	Daling bij bleed-off juni 2025 volumes	Toename
	m	m	m
Cluster	0.75	0.75	0.00
TR-9	0.018	0.038	0.020
VE-3	0.021	0.038	0.017
VE-1	0.004	0.004	0.000
VE-2	0.008	0.008	0.000
VE-5 + 6	0.000	0.014	0.014
VE-7 + 8	0.000	0.015	0.015
Totaal	0.80	0.87	0.067

Tabel IV: Opsplitsing bijdragen aan bodemdaling na bleed-off bij volumes aanwezig in juni 2018 en na de productie van 1.7 Mton zout (medio 2025).

Van de extra daling van 7 cm wordt 3 cm veroorzaakt door de nieuwe cavernes VE-5 t/m VE-8 en is 2 cm afkomstig uit de actieve winning uit zowel TR-9 als VE-3. De bijdrage van 2 cm door TR-9 is beduidend lager dan de 10 cm berekend door SodM in haar advies d.d. 27 juni 2019.

4. ONZEKERHEDEN

4.1 Integrale onzekerheidsanalyse bodemdaling

Onzekerheden die van invloed zijn op de bodemdalingsvoorspellingen zijn het totale pekelvolume, het vrije pekelvolume en de vorm van de berekende bodemdalingskom.

De nauwkeurigheid van de berekening van het totaal ondergronds pekelvolume wordt bepaald door het geldende oplosmechanisme en de samenstelling van de ondergronds aanwezige pekels. In bijlage 1 wordt aangetoond en in paragraaf 2.1 is beschreven dat het geldende oplosmechanisme afhankelijk is van de injectie en productie dieptes. Aangezien de diepten zeker zijn is ook het geldende oplosmechanisme zeker. Tevens mag op basis van praktijkervaring met de ontwikkeling van TR-9 worden geconcludeerd dat er in cavernes van Nedmag hoegenaamd geen verticale concentratie-gradiënten aanwezig zijn. Onzekerheid is dan alleen het gevolg van onnauwkeurigheden in pekelanalyses en debietmetingen, die op 6 % zijn bepaald ⁹⁾. Bij massabalans berekeningen resulteren deze in een onzekerheid in vrij pekelvolume van 3 % van het totale pekelvolume.

Gezien het relatief geringe effect van de diepte van het rigide fundament volgens hoofdstuk 3.1 en aangezien in het winningsplan 2018 hiervoor al conservatieve waarden worden aangehouden, is dit effect hier niet meer meegenomen.

Het aandeel vrije pekels in een caverne wordt in overheersende mate bepaald door de effecten van bulking. Volgens een literatuuronderzoek, dat onderdeel was van een abandonneringsstudie ¹⁰⁾, zijn bulkingfactoren van 1.4 – 1.5 reële waarden voor fijnkorrelig residu en precipitaten in een zoutcaverne. In geval van de bewezen aanwezigheid van grofkorrelig materiaal zou een bulkingfactor (BF) van 1.3 van toepassing kunnen zijn.

Voor de berekening van het vrije pekelvolume voor het winningsplan 2018 zijn als default de parameters: ϵ_{\max} 40 % en BF 1.4 ⁶⁾ gebruikt. Voor bepaling van het effect van variatie in bulking zijn vrije pekelvolumes berekend bij maximale bulking met ϵ_{\max} 50 % en BF 1.5 en minimale bulking bij ϵ_{\max} 30 % en BF 1.35. De justificatie voor het gebruik van BF 1.35 is dat er naast grof korrelig materiaal altijd fijnkorrelig precipitaat aanwezig is in de Nedmag cavernes.

	Onzekerheid bulking		Onzekerheid totaal pekelvolume			
	Vrije pekels	Daling	Hoog		Laag	
			Vrije pekels	Daling	Vrije pekels	Daling
	Mm ³	m	Mm ³	m	Mm ³	m
Lage bulking	5.05	0.85	5.32	0.87	4.77	0.82
Default bulking	4.48	0.80	4.75	0.82	4.20	0.78
Hoge bulking	3.62	0.73	3.89	0.75	3.34	0.71

Tabel V: Effect van onzekerheden in bulking parameters en totaal aanwezig pekelvolume op het vrije pekelvolume aanwezig in juni 2018 en bijbehorende bodemdaling bij volledige bleed-off.

Bij de volledige aflaat van alle in juni 2018 aanwezige vrije pekel, wordt een bodemdaling voorzien van 80 cm. De bodemdaling als gevolg van variatie in bulking varieert van minimaal 73 cm tot maximaal 85 cm. Zoals beschreven resulteert de onzekerheid in het totaal in juni 2018 aanwezig pekervolume van 9.2 Mm³ in een onzekerheid van 3 % hiervan, oftewel 0.28 Mm³ in het volume vrije pekel. Het meenemen hiervan resulteert in een bodemdaling van minimaal 71 cm tot maximaal 87 cm.

	Onzekerheid bulking		Onzekerheid totaal pekervolume			
	Vrije pekel	Daling	Hoog		Laag	
			Vrije pekel	Daling	Vrije pekel	Daling
Mm ³	m	Mm ³	m	Mm ³	m	
Lage bulking	4.97	0.92	5.27	0.94	4.66	0.90
Winningsplan	4.24	0.87	4.55	0.89	3.94	0.85
Hoge bulking	3.19	0.80	3.49	0.81	2.89	0.78

Tabel VI: Effect van onzekerheden in bulking parameters en totaal aanwezig pekervolume op het vrije pekervolume aanwezig medio 2025 en bodemdaling bij volledige bleed-off.

In het winningsplan 2018 wordt bij volledige aflaat van alle vrije pekel na de actieve productie van 1.7 Mton MgCl₂ een bodemdaling van 87 cm verwacht. Afhankelijk van de mate van bulking varieert de verwachte daling van minimaal 80 tot maximaal 92 cm. Wanneer de onzekerheid in het totaal aanwezig pekervolume van 10.1 Mm³ wordt meegenomen, leidend tot een onzekerheid van 0.3 Mm³ in het volume vrije pekel, varieert de bodemdaling van minimaal 78 cm tot maximaal 94 cm.

De maximaal voorziene bodemdaling na de productie van 1.7 Mton zout en volledige aflaat van vrije pekel komt uit op 94 cm. Wanneer rekening wordt gehouden met een beperkte toename van 1 cm als gevolg van na-verzadiging van off-spec pekel, komende uit de initiële ontwikkeling van VE-5 t/m VE-8, komt de totaal voorziene maximale bodemdaling uit op 95 cm.

4.2 Connectie van TR-9 of VE-3 met het cluster

Naast het optreden van additionele bodemdaling op het diepste punt van de bodemdalingssom van Nedmag, is voor SodM de kans op het ontstaan van een verbinding van TR-9 en/of VE-3 met het cluster een bijkomend argument om actieve winning uit deze winningsputten af te raden. Als er een verbinding van TR-9 of VE-3 met het cluster zou ontstaan, vereffenen de drukken zich. Als dat een snel proces zou zijn, zou er een drukstoot in het TR-cluster kunnen optreden, waardoor de gesloten opening in het zoutdak van het cluster weer open zou kunnen gaan of een nieuwe opening zou kunnen ontstaan. De vraag is daarom hoe groot de kans is dat TR-9 of VE-3 verbinding maken met het cluster, wat de gevolgen zouden zijn en hoe eventuele ongewenste gevolgen voorkomen kunnen worden.

In referentie 10 bij het winningsplan is het mechanisme van het ontstaan van caverneverbindingen beschreven: een verbinding tussen twee cavernes ontstaat tijdens actieve winning, door oplossing van continue bischofietlagen die zich tussen cavernes in de Zechstein III

1b laag bevinden. Dit is geconcludeerd op basis van een gedegen analyse van de acht verbindingen die in het verleden zijn ontstaan.

Gegeven de posities van TR-9, VE-3 en het cluster, bepaalt de duur van actieve winning van bischofiet uit TR-9 en VE-3 of er wel of geen verbinding met het TR-cluster ontstaat. Voor TR-9 vergt het ontstaan van een verbinding met het cluster 17 tot 29 jaar actieve winning uit TR-9, zie referentie 10 bij het winningsplan. De actieve winning uit TR-9 is in 2012 gestart. Een verbinding van TR-9 met het cluster wordt daarom op z'n aller vroegst in 2029 verwacht, waarbij niet meegenomen is dat er van 2016 tot 2019 geen actieve winning uit TR-9 heeft plaatsgevonden. Een verbinding van VE-3 met het cluster vergt 17 tot 28 jaar actieve winning uit VE-3. Met deze winning is in 1992 gestart. Er is op dit moment, na 27 jaar, nog geen verbinding met het cluster ontstaan, maar er is een kans dat dit niet zo lang meer duurt. In het winningsplan 2018 is actieve winning uit VE-3 en TR-9 voorzien tot 2025. Resumerend kan daarom worden gesteld dat de kans dat TR-9 in die periode verbinding maakt met het cluster zeer gering is, en dat voor VE-3 de kans groter is.

Uitgaande van een hogere druk in VE-3 of TR-9 dan in het cluster, stroomt er na het eventuele ontstaan van een verbinding pekels van TR-9 of VE-3 naar het cluster, totdat (met inachtneming van het hoogteverschil tussen de cavernes) de drukken gelijk zijn. Het uitgewisselde pekervolume en de drukveranderingen in de cavernes worden bepaald door de aanvangsdruk in en de compressibiliteit van zowel het cluster als de cavernes die er verbinding mee maakt.

De drukveranderingen bij een eventuele verbinding tussen TR-9 of VE-3 met het cluster zijn het grootst bij een groot volume en hoge druk in TR-9 of VE-3, en een klein volume en lage druk in het cluster. Qua volumes doet die situatie zich voor aan het eind van periode 1 in het winningsplan 2018, wanneer alle vrije 1b pekels en een deel van de vrije 2b/3b pekels uit het cluster zijn gewonnen, en de cavernes TR-9 en VE-3 door actieve winning een totaal pekervolume hebben bereikt van respectievelijk 0.7 en 1.4 Mm³. De minimale druk in het cluster is 53 bar, gemeten op TR-7 met water gevulde casing. Dit is de laagste druk waarbij nog pekels uit het cluster kan worden gewonnen. Bij deze lage clusterdruk is er geen kans dat de druk oploopt tot de op 100 bar geschatte druk waarbij de bestaande gesloten opening in het cavernedak weer open gaat. Zoals beschreven in het winningsplan 2018 moet echter ook een drukstijging groter dan 15 bar ten opzichte van het laagste jaargemiddelde worden voorkomen. Dit betekent dat in deze worst case de druk in TR-9 lager dan 127 bar moet blijven en de druk in VE-3 lager dan 79 bar, zie tabel VII.

Verbinding	Annulus druk voor verbinding					Pekel uitwisseling m ³	Annulus druk na verbinding			ΔP TR-7 bar
	TR-9		VE-3		TR-7 bar		TR-9 bar	VE-3 bar	TR-7 bar	
	bar	% lithost.	bar	% lithost.						
Clust. met TR-9	127	94			53	24,756	25		68	15
Clust. met TR-9	98	86			94	9,902	57		100	6
Clust. met VE-3			79	81	53	24,756		28	68	15
Clust. met VE-3			81	82	94	9,902		61	100	6

Tabel VII: Pekeluitwisseling en drukeffecten bij een verbinding tussen TR-9 of VE-3 en het cluster bij worst case cavernevolumes.

Bij een hogere druk in het cluster dan 53 bar, is de drukstijging bij een eventuele verbinding kleiner. De marge ten opzichte van de druk waarbij de gesloten opening in het cavernedak weer open gaat, is echter eveneens kleiner. De combinatie klein clustervolume/hoge clusterdruk is zeer onwaarschijnlijk. Desondanks is ook deze situatie doorgerekend. De resultaten zijn eveneens opgenomen in tabel VII. De conclusie is dat in dit geval de druk in TR-9 onder de 98 bar moet blijven en de druk in VE-3 onder de 81 bar.

Uit voorzorg is Nedmag in december 2018 al begonnen met het verlagen van de drukken in TR-9 en VE-3 tot 90 respectievelijk 75 bar.

In theorie zou een deel van het cluster hydraulisch geïsoleerd kunnen raken van de rest van het cluster. TR-9 of VE-3 zou in plaats van met het cluster, verbinding kunnen maken met zo'n geïsoleerd deel ervan. De maximale omvang van VE-3 is zoals vermeld 1.4 Mm³ pekel, waarvan ongeveer 0.8 Mm³ vrije pekel betreft. Een reële aanname voor de minimale omvang van een van het cluster geïsoleerd geraakt deel, is ca. 0.55 Mm³ pekel, waarvan ca. 0.3 Mm³ vrije pekel. Bij het ontstaan van een verbinding wordt het gezamenlijke volume vrije pekel 1.1 Mm³. Dat is beduidend minder dan de veilige grenswaarde van 1.5 Mm³ zoals benoemd op pagina 35 van het winningsplan.

De totstandkoming van de bestaande acht verbindingen is altijd geleidelijk gegaan. Plotse drukstoten en schades zijn daarbij niet opgetreden. Verbindingen zijn geconstateerd door een geleidelijk veranderend gedrag van cavernedrukken, met synchroon bewegende drukken in verbonden cavernes als eindresultaat. Dit soort geleidelijk veranderend drukgedrag wordt binnen enkele dagen onderkend. Zelfs op het moment dat TR-9 of VE-3 al verbinding zouden beginnen te maken met het cluster, kunnen nog mitigerende maatregelen worden getroffen door de cavernedruk te verlagen. Dit kan met 2 tot 5 bar per dag, door een caverne maximaal te laten produceren met 50 m³/h.

Resumerend:

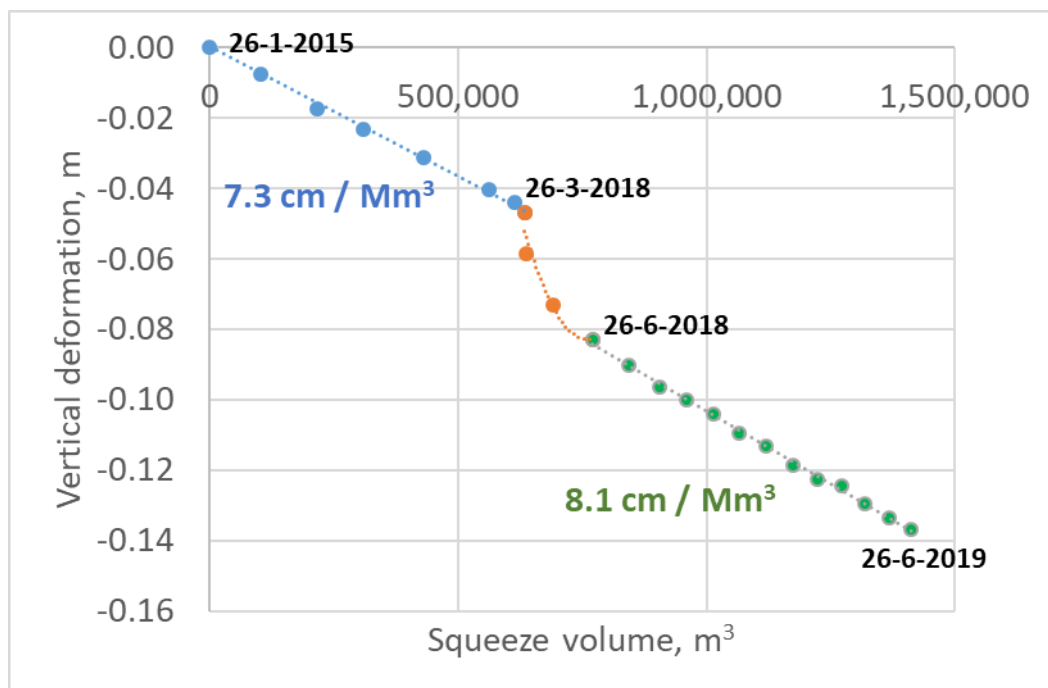
- Tijdens periode 1 in het Nedmag winningsplan 2018 (de periode met actieve winning uit TR-9 en VE-3) is de kans aanwezig dat VE-3 verbinding maakt met het cluster. De kans dat TR-9 in deze periode verbinding maakt met het cluster is echter zeer klein.
- Doordat Nedmag preventief de druk in VE-3 en TR-9 verlaagt, kan er bij het ontstaan van een eventuele verbinding met het cluster op dat moment geen te grote drukstoot in het cluster optreden.
- Bij een verbinding van TR-9 of VE-3 met een geïsoleerd deel van het cluster blijven de betrokken pekervolumes onder de veilige grens zoals benoemd in het winningsplan.
- Caverneverbindingen ontstaan dusdanig langzaam dat ook tijdens dit proces er nog voor gezorgd kan worden dat een ongewenste drukverhoging in het cluster wordt voorkomen.

Het actief winnen uit VE-3 en TR-9 tijdens periode 1 in het Nedmag winningsplan 2018 levert dan ook geen onacceptabele risico's op voor mens en milieu.

5. PRAKTIJKERVARING SINDE JUNI 2018 (startpunt bodemdaling-prognose winningsplan 2018)

5.1 Bodemdaling volgens InSAR

Met terugwerkende kracht tot 26 januari 2015 wordt de maandelijkse ontwikkeling van de bodemdaling van het gebied met een straal van 7 km rond de Nedmag zoutwinningslocatie WHC-2 door SkyGeo bepaald aan de hand van satelliet data. De InSAR gemeten daling op het diepste punt is niet gecorrigeerd voor aardgaswinning en autonome daling en is daarmee een worst case daling.

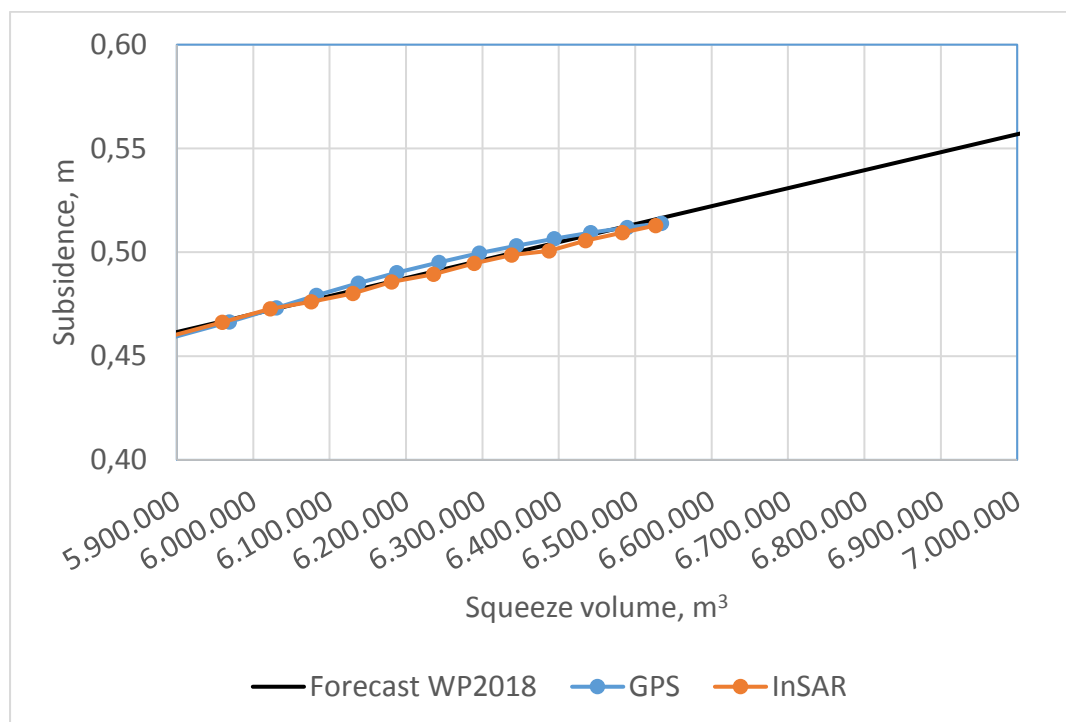


Figuur 1: Verloop daling op diepste punt volgens InSAR als functie van squeezevolume over de periode 26 januari 2015 tot 26 juni 2019.

In Figuur 1 is de daling op het diepste punt uitgezet tegen het massabalans berekend squeezevolume. Tot aan 20 april 2018 daalde het diepste punt met 7.3 cm/Mm³ squeeze bij een gemiddelde squeeze snelheid van 23 m³/h. Na het incident van 20 april 2018 was er een overgangssituatie met een tijdelijk toegenomen daling als gevolg van het ondergronds wegstromen van pek en versnelde cluster aflat om de clusterdruk te verlagen. Vanaf juni 2018 zijn zowel de clusterdruk als de daalsnelheid gestabiliseerd. Vanaf juli 2018 is de squeeze snelheid van het cluster lineair in de tijd afgenomen van 80 tot 55 m³/h. Gegeven de constante daling van 8.1 cm/Mm³ squeeze is er een indicatie dat hierbij de komvorm slechts in beperkte mate is veranderd.

5.2 Vergelijking in het winningsplan voorspelde met gemeten bodemdaling

Op 1 mei 2018 heeft Antea een GPS station geïnstalleerd op de zoutwinningslocatie WHC-2. De resultaten van deze continue meting worden maandelijks gerapporteerd aan Nedmag. In onderstaande figuur zijn zowel de voorspelde als de InSAR/GPS gemeten bodemdaling weergegeven als functie van squeezevolume.

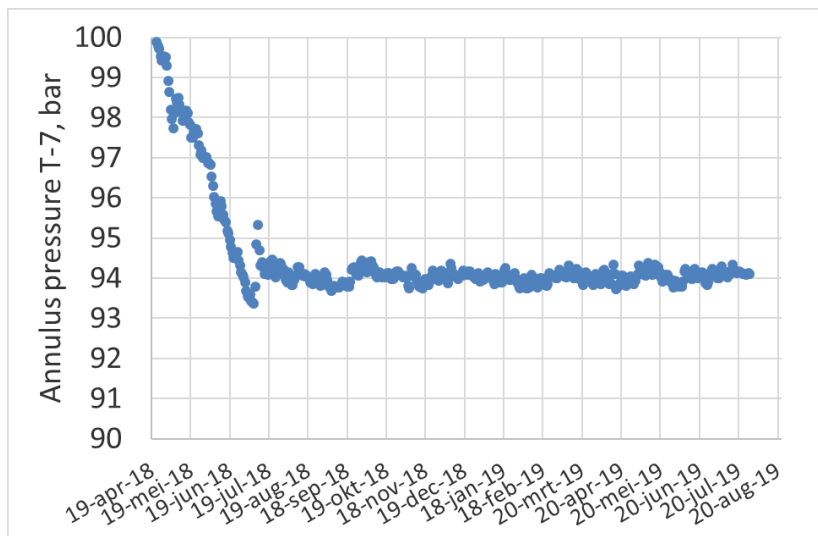


Figuur 2: Verloop daling op diepste punt volgens InSAR en GPS als functie van squeezevolume van 13 juni 2018 tot 26 juni 2019.

De gemeten InSAR en GPS daling is weergegeven als extra daling ten opzichte van de 46,5 cm zoals gemeten met waterpassing in juni 2018. De overeenkomst van de gemeten daling van 5 cm en de voorspelling ⁸⁾ bij een additioneel squeezevolume van 0,62 Mm³ is goed. De voorspellingen met het SGS model dat is gekalibreerd over de periode 1993 – 2016 waarin actief werd gewonnen, zijn dan ook voldoende nauwkeurig voor de huidige aflat van het cluster.

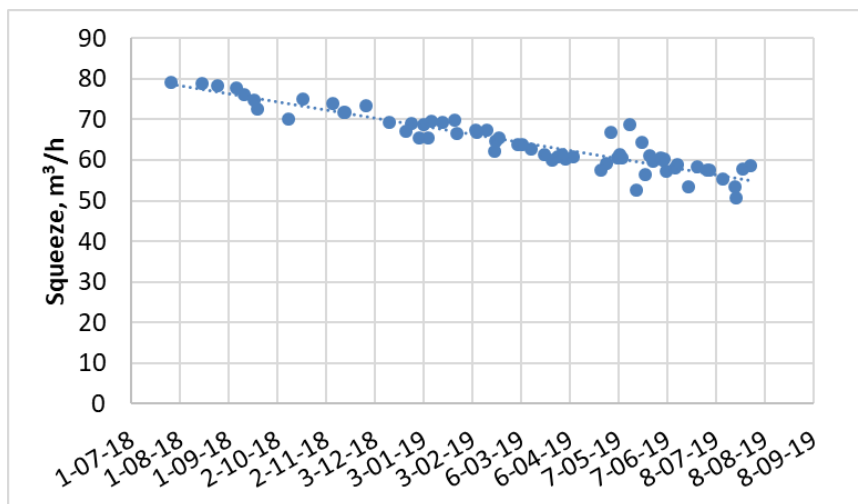
5.3 Bepaling vrij 1b pekervolume in cluster aan de hand van aflat gegevens

In juli 2018 is de druk in het cavernecoluster, na de tijdelijk verhoogde pekelaflat door het incident van april 2018, gestabiliseerd op 94 bar. Sindsdien is door het handhaven van een constante velddruk, gemeten op TR-7, de snelheid van pekelaflat gelijk gehouden aan de squeeze-snelheid. Dit maakt het mogelijk het squeezevolume, dat normaliter met massabalans wordt berekend, daadwerkelijk te meten.



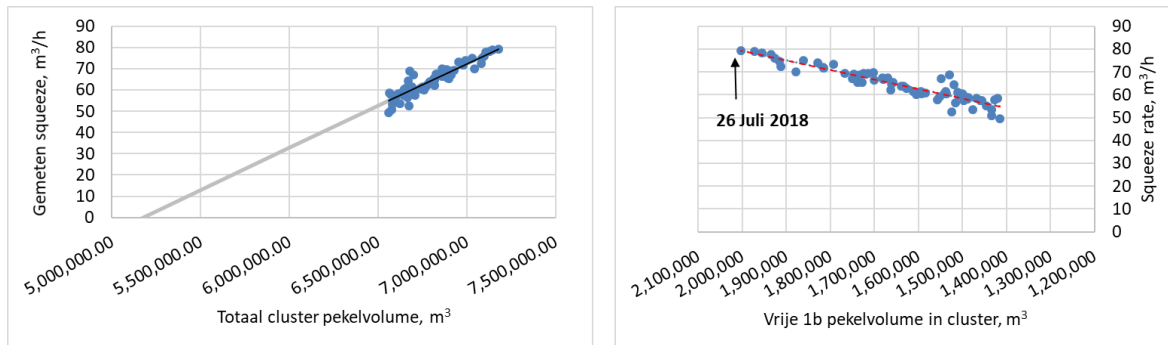
Figuur 3: Verloop clusterdruk vanaf 19 april 2018 tot 31 juli 2019.

De gemeten squeeze snelheid was 80 m³/h op 26 juli 2018 en is lineair afgenomen tot circa 55 m³/h eind juli 2019.



Figuur 4: Verloop squeeze snelheid uit cluster van 26 juli 2018 tot 31 juli 2019.

Volgens het massabalans model versie 2 was net vóór het incident van 20 april 2018 in totaal 7.5 Mm³ pekels aanwezig in het cluster. Dit volume is tot aan 26 juli 2018 verminderd tot 7.2 Mm³ als gevolg van 0.1 Mm³ ondergrondse aflek en 0.2 Mm³ productie.



Figuur 5: Verloop squeezesnelheid (links) en geschat vrije 1b pekelvolume (rechts) voor het cluster van 26 juli 2018 tot 31 juli 2019.

De plot van squeezesnelheid tegen het totaal aanwezig pekelvolume is lineair. De afsnede, met nul squeeze, is bij 5.2 Mm^3 . Dit volume kan worden opgevat als het volume niet squeezenzende pekel, in dit geval de som van het gebonden pekelvolume + het (relatief) langzaam squeezenzende vrije 2b/3b pekelvolume. Dit geeft een vrij 1b pekelvolume van $7.2 \text{ min } 5.2 = 2.0 \text{ Mm}^3$ in het cluster op 26 juli 2018. Een correctie van 0.05 Mm^3 squeeze voor de periode 1 - 26 juli 2018 geeft uiteindelijk een vrije 1b pekelvolume in het cluster van 2.05 Mm^3 eind juni 2018. Deze proefondervindelijke waarde is 10 % lager dan de 2.3 Mm^3 van het winningsplan 2018 (Tabel 1) en bevestigt de nauwkeurigheid waarmee het vrije pekelvolume wordt berekend.

6. CONCLUSIES

Eliminatie van fysische onjuistheden in de oplos-scenario's van NGConsulting en toetsing van de scenario's aan TR-9 procesdata, tonen aan dat scenario 7, waarin geen concentratie gradiënt aanwezig is in de cavernes, het oplosmechanisme is dat optreedt in de cavernes van Nedmag. De consequentie hiervan is dat geïnjecteerd water in één stap direct bischofitische pekel vormt en niet via een intermediaire carnallitische pekel. De enige uitzondering hierop is indirecte vorming van bischofitische pekel in twee stappen bij injectie van water in 2b/3b carnalliet cavernes en productie uit de onderliggende 1b bischofiet cavernes, een situatie die zich in het verleden heeft voorgedaan en die geen onderdeel is van het winningsplan 2018.

De implementatie van het scenario 7 oplosmechanisme in massabalans versie 2, in combinatie met dichtheidscorrectie voor in-situ pekeltemperatuur, gaf voor de periode 1972 – juni 2015 een berekend squeezevolume dat in goede overeenstemming was met het verwachte bodemdalingskomvolume.

De voorziene bodemdaling na de winning van 1.7 Mton $MgCl_2$ en volledige bleed-off van alle vrije pekel na periode 1 van het winningsplan 2018 komt uit op 87 cm. In combinatie met 1 cm extra daling als gevolg van na-verzadiging van off-spec pekel uit nieuwe cavernes VE-5 t/m VE-8 komt de verwachte daling uit op 88 cm.

Hiervan is 75 cm afkomstig uit de cluster aflat en 4 cm uit zowel TR-9 als VE-3. De berekende toename van de bijdrages van cavernes TR-9 en VE-3 ten opzichte van juni 2018, als gevolg van de actieve logging in TR-9 en VE-3 in periode 1 van het winningsplan 2018, is niet meer dan 2 cm per caveerne.

Wanneer de onzekerheden in het vrije pekelvolume ten gevolge van onzekerheden in bulking en berekende caveerne volumes worden meegenomen, resulteert een maximale bodemdaling van 94 cm. In combinatie met 1 cm extra daling als gevolg van na-verzadiging van off-spec pekel uit nieuwe cavernes VE-5 t/m VE-8 komt de maximaal verwachte daling uit op 95 cm.

Tijdens periode 1 uit het winningsplan 2018 is de kans aanwezig dat VE-3 verbinding maakt met het cluster. De kans dat TR-9 verbinding maakt met het cluster is echter zeer klein. Een drukstoot in het cluster als gevolg van een eventuele verbinding is/wordt verkleind door preventief de drukken van cavernes VE-3 en TR-9 te verlagen. Het actief winnen uit cavernes VE-3 en TR-9 tijdens periode 1 van het winningsplan 2018 levert geen onacceptabele risico's op voor mens en milieu.

De voornaamste berekende daling is afkomstig uit de bleed-off van 2.3 Mm^3 vrije 1b pekel en 1.2 Mm^3 vrije 2b/3b pekel zoals aanwezig in het cluster in juni 2018. Analyse van de gegevens van het verloop van de clusterafflat over de periode juli 2018 – juli 2019 geeft een geschat initieel vrije 1b pekelvolume van 2.05 Mm^3 . Deze praktijkwaarde is slechts 10 % lager dan de berekende waarde die is opgenomen in het winningsplan 2018. Dit bevestigt de

nauwkeurigheid waarmee het vrije pekelvolume in het winningsplan 2018 wordt berekend en maakt een maximale daling van 88 cm het meest waarschijnlijk.

Het SGS model dat is gebruikt voor het opstellen van bodemdalingsprognoses voor het winningsplan 2018, is gekalibreerd met data uit de actieve winningsperiode van 1993 – 2016. De vergelijking van de berekende daling met de InSAR/GPS gemeten daling van 5 cm na 0.6 Mm³ aflat uit het cluster, bevestigt de geldigheid van het SGS model voor een bleed-off fase.

7. Referenties

1. Gevolgen van de bodemdaling door zoutwinning voor de waterhuishouding, Royal Has-koning DHV, 16 juli 2019.
2. Mass balance study of the Nedmag caverns, version 1, J. Visser, 30 oktober 2015.
3. Nedmag Veendam studie. Inversie van bodemdalingsmetingen. Rapport TNO-060-UT-2011-00687. P.A. Fokker, 8 april 2011.
4. Second opinion for Nedmag cavern mass balance. NGConsulting, 15 februari 2017.
5. Mass balance study of the Nedmag caverns, version 2, J. Visser, 24 februari 2017.
6. Dissolution tests on Nedmag Carnallite and Bischofite samples, NGConsulting and CT IT Consulting. Sondershausen (Germany), 12 juli 2016.
7. Modelling of subsidence induced by salt squeeze mining from the Veendam concession.: History match 1993 – 2016 and forecast including two new wells. SGS, april 2018.
8. Prognose bodemdaling winningsplan 2018. J. Visser, 7 november 2018.
9. Beantwoording vragen SodM over massabalans studie Nedmag. J. Visser en F.Goorman, 5 april 2018.
10. Abandonment study Nedmag caverns. Cavern squeeze modeling and geophysical analy-sis of brine permeation and containment. Well Engineering Partners, 30 maart 2015.

8. Bijlagen

Bijlage 1: Tweede opinie NGConsulting en keuze oplosmechanisme

Op verzoek van Nedmag heeft NGConsulting een tweede opinie geven op de Nedmag mas-sabalans studie versie 1²⁾. De praktische uitwerking met eigen onderzoek en interactie met Nedmag was veel meer dan alleen een tweede opinie.

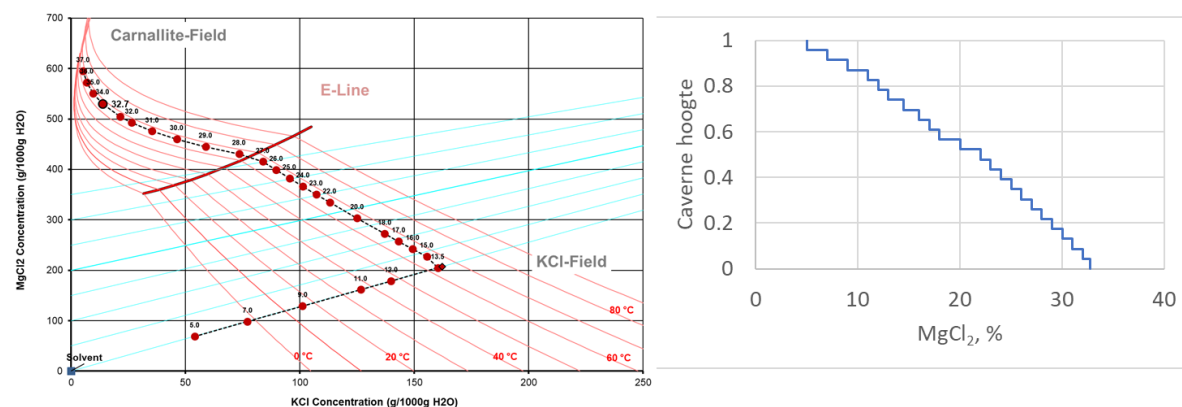
Volgens NGConsulting was het onzeker of de gemeten concentratie van pekkel gewonnen op een diep punt in de caverne representatief is voor de totale pekelinhoud. Hierop heeft NGConsulting onderzoek gedaan naar een mogelijk effect van een aangenomen verticaal concentratieprofiel met 7 uiteenlopende oplos-scenario's⁴⁾.

Hierbij is uitgegaan van een totaal waterinjectie volume van 9.1 Mm³ voor de periode 1972 – juni 2015 bij een gemeten pekkelproductie volume van 15.3 Mm³ met gemiddelde MgCl₂ concentratie van 32.7 %.

Scen.	Beschrijving	Aantal stappen	Hold-up	Gevormde cavernepekkel	Opgelost zout	Productie zonder squeeze	Ratio prod./inj.	Squeeze bijdrage	Caverne volume
				m ³	m ³	m ³		m ³	m ³
1	Sequentieel	23	Nee	25,217,408	15,322,811	9,894,598	1.09	5,407,678	9,908,213
2	Sequentieel	23	Ja	9,669,814	9,375,706	294,108	0.03	15,008,168	-5,632,462
3	Sequentieel, constante doorloop	23	Nee	9,404,514	9,379,414	25,100	0.00	15,277,176	-5,897,762
4	Sequentieel, hold-up allen in carnalliet	23	Deels	11,216,843	9,502,899	1,713,944	0.19	13,588,332	-4,085,433
5	Sequentieel met verticale solvent distributie	23	Nee	25,223,370	14,831,951	10,391,419	1.14	4,910,857	9,921,094
6	Sequentieel	4	Nee	25,853,862	15,438,723	10,415,139	1.14	4,887,137	10,551,586
7	Directe vorming	1	Ja	26,162,118	15,749,574	10,412,544	1.14	4,889,732	10,859,842

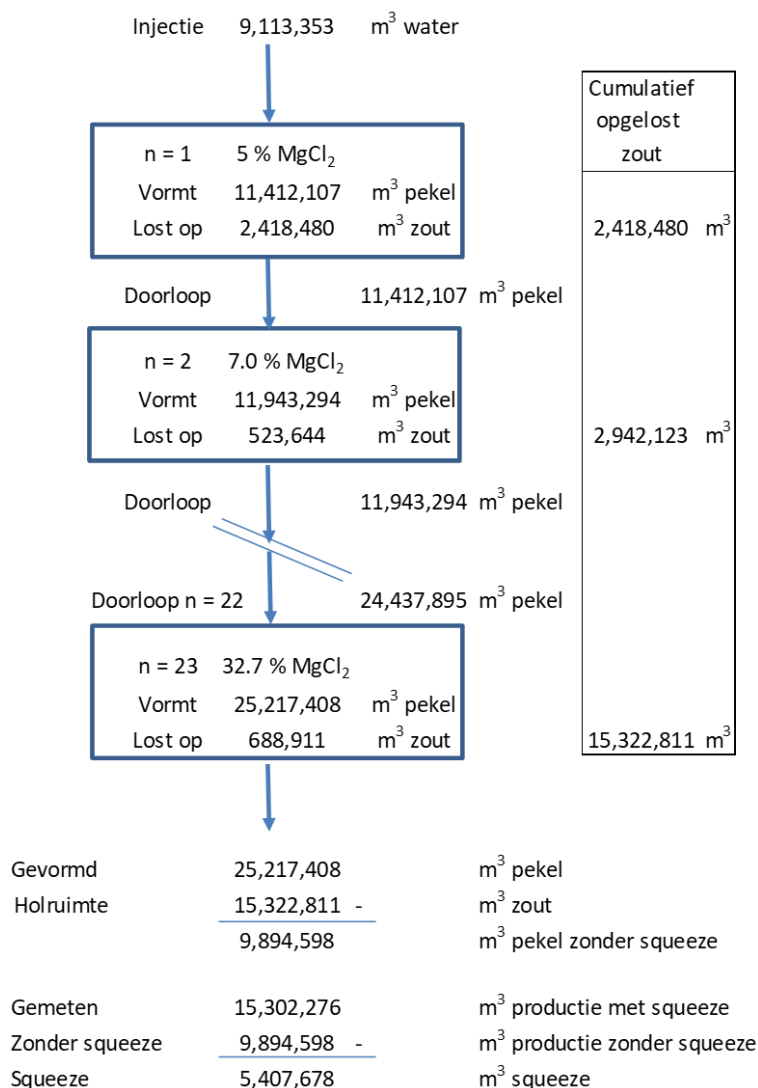
Tabel I-1: Berekend squeeze- en cavernevolume voor scenario's 1 t/m 7 volgens NGConsulting.

In scenario 1 is aangenomen dat injectiewater, dat aan de top wordt ingevoerd, eerst carnalliet oplost tot 26 % MgCl₂ en daarna bischofiet tot aan 32.7 % MgCl₂ in totaal 23 stappen. Het aangenomen concentratieprofiel is sterk hypothetisch, een werkelijk profiel wordt bepaald door zoutsamenstelling en oploskinetiek, maar is wel geschikt om mogelijke effecten hiervan op een berekend squeezevolume vast te stellen.



Figuur I-1. Oplosroute bij sequentieel oplossen van carnalliet en bischofiet volgens scenario 1 in het MgCl₂-KCl fasediagram bij 67°C in 23 stappen (links) en het aangenomen verticaal concentratieprofiel (rechts).

Met massabalans wordt bij gegeven injectievolume uitgerekend wat het pekkel productie-volume zou zijn zonder caverneconvergentie. Het verschil met het gemeten volume wordt toegewezen aan squeeze als gevolg van caverneconvergentie. In onderstaande figuur is de detail uitwerking weergegeven van scenario 1.



Figuur I-2. Detail uitwerking van sequentieel oplossen van carnalliet en bischofiet volgens scenario 1 in 23 stappen volgens NGConsulting.

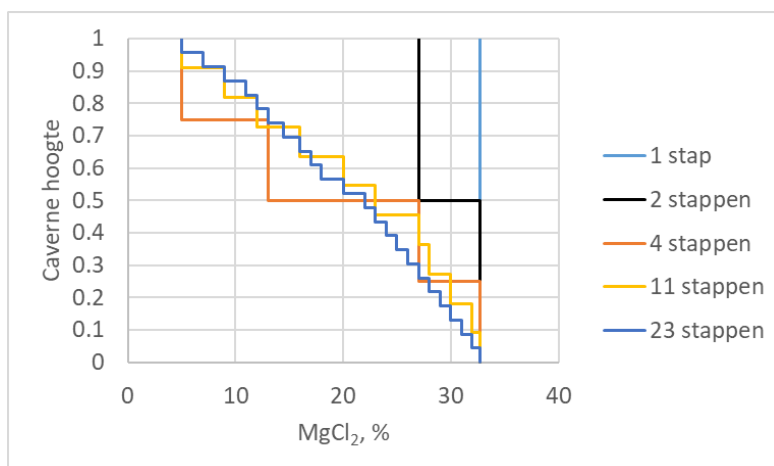
In scenario 1 is aangenomen dat in de eerste van de 23 stappen het injectiewater zout oplost tot 5 % MgCl₂ waarna alle gevormde pekkel zou doorlopen naar de volgende stap van aanrijking tot 7 % MgCl₂ weer gevolgd door volledige doorloop naar de volgende stap. Fysisch gezien is volledige doorloop van gevormde pekkel niet mogelijk, een significant volume zal als hold-up achterblijven in de gevormde, niet convergerende, holruimte. Het uitsluiten van hold-up effecten is geen correcte benadering voor het bepalen van het theoretische productievolume zonder squeeze en levert uiteindelijk geen zinvol squeezevolume op. Dit maakt de uitkomsten van berekeningen zonder hold-up zoals aangenomen in scenario's 1, 3, 4, 5 en 6 weinig zeggend.

In scenario 2 is hold-up wel meegenomen, de doorloop naar de onderliggende secties is echter zo laag dat na de laatste stap 23 slechts 0.29 Mm³ pekkel zou worden geproduceerd zonder squeeze. Een bovengrondse pekkelproductie van 0.03 m³ pekkel per m³ injectiewater staat echter in schril contrast met de 1.15 m³ pekkel/m³ injectiewater zoals gemeten bij de ontwikkeling van TR-9 bij hoge cavernedruk met een minimale squeezebijdrage. Het lage productievolume voor scenario 2 geeft een irreëel squeezevolume van 15 Mm³ en een negatief cavernevolumen (opgelost volume minus squeezevolume) van 5.6 Mm³. Nadere beschouwing van de scenario 2 resultaten laat zien dat hierin de 9.38 Mm³ pekkel die aanwezig is in de gevormde holruimte abusievelijk niet is meegenomen. Wanneer hiervoor gecorrigeerd wordt, is het gevormde pekkelvolume: 9.67 + 9.38 = 19.05 Mm³. Bij een pekkelproductie van 9.67 Mm³ zonder squeeze geeft dit een squeezevolume van 5.63 Mm³.

Alle voornoemde onjuistheden zijn niet aanwezig in scenario 7 waarbij injectiewater in één stap pekkel vormt met 32.7 % MgCl₂ door het selectief oplossen van bischofiet en een kleine hoeveelheid carnalliet. Dit geeft een squeezevolume van 4.89 Mm³.

Teneinde beter inzicht te krijgen in het mogelijk effect van een concentratieprofiel op squeezevolume, heeft Nedmag bovenstaande berekeningen systematisch herhaald voor vijf scenario's met nu een correcte verwerking van hold-up effecten.

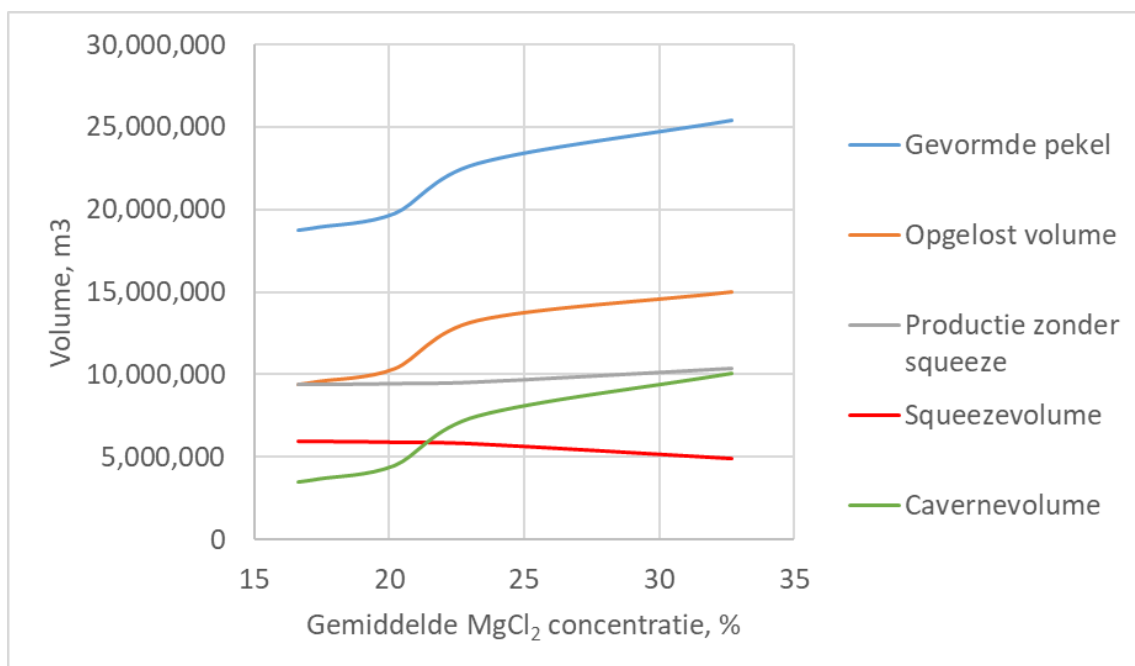
Het eerste scenario is die van directe pekkelvorming tot de eindconcentratie in één stap. De vorming in twee stappen is representatief voor de praktische situatie van waterinjectie in een carnallitische 2b/3b bovcaverne en na doorloop pekkelproductie uit een onderliggende bischofietische 1b caverne en is in feite een serieschakeling van twee één-staps mechanismen. Voor simulatie van concentratie-gradiënten zijn berekeningen uitgevoerd voor 4, 11 en 23 stappen.



Figuur I-3. Aangenomen verticale concentratieprofielen voor berekening squeezevolumes.

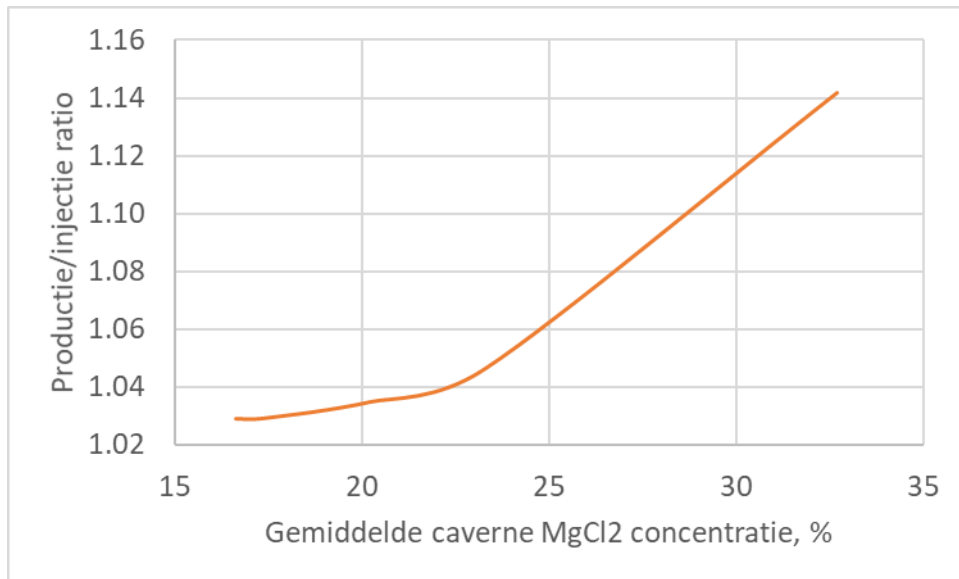
Aantal stappen	Gemiddelde MgCl ₂ in cav.	Gevormde cavernepel	Opgelost volume	Productie zonder squeeze	Ratio prod./inj.	Squeeze volume	Caverne volume
	%	m ³	m ³	m ³		m ³	m ³
1	32.7	25,378,484	14,974,508	10,403,976	1.142	4,898,300	10,076,208
2	23.3	22,795,914	13,260,424	9,535,490	1.046	5,766,786	7,493,638
4	20.2	19,781,949	10,351,201	9,430,747	1.035	5,871,529	4,479,673
11	17.4	18,964,075	9,584,188	9,379,887	1.029	5,922,389	3,661,799
23	16.6	18,780,470	9,402,148	9,378,322	1.029	5,923,954	3,478,194

Tabel I-II: Gemiddelde caverne MgCl₂ concentratie, volumes en productie/injectie verhouding (zonder squeeze) bij aangenomen MgCl₂ concentratieprofielen.



Figuur I-4. Effect van gemiddelde MgCl₂ concentratie op volumes.

Bij toenemende gemiddelde MgCl₂ concentratie lost meer zout op en omdat dit gepaard gaat met het vrijkomen van kristalwater, de oplossende Mg-zouten zijn aanwezig als 6-hydraten, wordt er ook meer pek gevormd. Als netto effect neemt de pekproductie zonder squeeze beperkt toe met 1 Mm³ waardoor het berekende squeezevolume afneemt van 5.9 tot 4.9 Mm³. In tegenstelling tot de NGConsulting bevindingen ontstaan hierbij geen negatieve cavernevolumes.



Figuur I-5. Effect van gemiddelde MgCl₂ cave concentratie op productie/injectie ratio zonder squeeze.

Welke van de vijf scenario's het meest waarschijnlijk is, kan worden afgeleid uit de berekende productie/injectie ratio. Alleen bij oplossen in één stap benadert de berekende waarde van 1.14 m³/m³ de praktische waarde van 1.15 m³/m³ zoals gevonden met TR-9. Caverne TR-9 is de meest recente caverne waarvan de ontwikkeling vanaf 2012 met grote nauwkeurigheid is gevolgd.

De implicatie van bovenstaande analyse is dat er in ontwikkelde cavernes gevuld met praktisch verzadigde pekkel geen sterke concentratie-gradiënten aanwezig zijn en het oplosmechanisme kan worden beschreven met één stap. De fysische verklaring hiervoor is dat injectiewater, als gevolg van dichtheidsverschil gedreven turbulente pluimmenging, effectief mengt met de cavernepekkel. Door de relatief geringe injectiesnelheid van maximaal 50 m³/h ten opzichte een caverne van enkele honderdduizenden m³ geeft dit zeer beperkte verdunning.

In termen van de NGConsulting scenario's is het één-staps scenario 7 de meest realistische weergave van het oplosproces in bischofitische 1b cavernes. Uitsluitend bij gescheiden water injectie in bovenliggende 2b/3b carnallitische cavernes en productie uit een verbonden onderliggende 1b bischofitische caverne is een twee-staps proces van toepassing.