

Massabalans studie van de Nedmag cavernes

Modellering van het oplossen van magnesium zout en berekende squeezevolumes



Auteur : J. Visser
Versie : 2
Datum : 24-2-2017

Dit is een Nederlandstalige publieksversie van het rapport: Mass Balance study of the Nedmag caverns version 2, dd. 24-2-2017. Deze Engelstalige versie is leidend.

Op verzoek van Nedmag is door NGConsulting een tweede opinie gegeven over het rapport van de massabalansstudie, revisie 1, van de Nedmag cavernes. De belangrijkste conclusie van NGConsulting was dat de toegepaste massabalansvergelijkingen correct werden toegepast maar dat de directe vorming van bischofitische pekkel een veel dominanter oplosmechanisme is dan Nedmag heeft aangenomen. Daarnaast werd geadviseerd om een temperatuurcorrectie toe te passen op de gebruikte pekeldichtheden.

De massaberekeningen zijn herhaald volgens de aanbevelingen van NGConsulting. Hiermee wordt aangetoond dat als gevolg van volumetrische expansie bij het direct oplossen van bischofiet en thermische uitzetting van de ondergrondse magnesiumchloride pekkel, het nieuw berekende squeezevolume uitkomt op 5.201.954 m³. Dit is 87% van het BDS-berekende volume van 5.994.612 m³ (status 30-6-2015). Het squeezevolume van 5.201.954 m³ is binnen een nauwkeurigheid 5 % in goede overeenstemming met het volume van 5.095.420 m³, zoals verwacht op basis van de TNO inversie studie van de Nedmag bodemdalingssom met een geschatte nauwkeurigheid van 6 %.

Het met de massabalans berekend ondergrondse pekkelvolume van 7.998.694 m³ is 37 % hoger dan het berekende BDS-volume van 5.821.174 m³. Mogelijke consequenties van dit hogere volume voor de conclusies van de Abandonnering studie van de Nedmag-cavernes zullen separaat worden onderzocht.

Het nieuw ontwikkelde massabalansmodel voor de berekening van het squeezevolume en het resulterende ondergrondse pekkelvolume zal door Nedmag worden geïmplementeerd in haar caveerne managementsysteem.

1. INLEIDING

Op 26 maart 2013 heeft NEDMAG Industries Mining & Manufacturing B.V. in Veendam (Nedmag) de minister van Economische Zaken om goedkeuring gevraagd voor een aangepast Winningsplan voor kalium- en magnesiumzouten. Het plan kondigt een onderzoek aan naar beste praktijken om de cavernes te verlaten na de definitieve productiestop ¹⁾.

Op 3 oktober 2014 heeft de minister van Economische Zaken het gewijzigde plan onder bepaalde voorwaarden goedgekeurd, waaronder artikel 6, waarin Nedmag het verschil onderzoekt tussen het squeezevolume dat is berekend met de BDS-massabalans en het volume dat is afgeleid uit de inversie van de bodemdaling en de invloed daarvan op bodemdalingsvoorspellingen.

Na vooronderzoek en besprekingen met Norbert Grüşchow, een specialist op het gebied van oplosmijnbouw van magnesiumzout van NGConsulting, werd op 25 maart 2015 een onderzoeksvoorstel gepresenteerd aan Staatstoezicht op de Mijnen en TNO-Utrecht. Het voorstel was de historie van het Nedmag-pekerveld van 1972 modelmatig te beschrijven met als primaire doel de nauwkeurigheid van het berekende squeezevolume te verbeteren. De studie omvat het volgende:

- Het ontwikkelen van een massabalansmodel uitgebreid met de zoutlithologie voor toekomstige kwantificering van de hoeveelheid inert materiaal in relatie tot bulking effecten.
- Het kritisch bekijken van het bestaande BDS-model met betrekking tot de hierin gehanteerde loofasen en andere aannames.
- Het bestuderen van het effect van direct versus indirect oplossen van bischofiet.
- Het meenemen van de effecten van het verbonden raken zijn van cavernes.

Op 30 oktober 2015 werd een rapport over de massabalansstudie van de Nedmag cavernes uitgebracht ²⁾ dat 2 november 2015 naar SodM is gestuurd. Op 26 november 2015 heeft Nedmag NGConsulting verzocht om een tweede opinie te geven over het massabalansrapport. Na talrijke diepgaande discussies werd door NGConsulting op 15 februari 2017 een tweede opinie memo uitgebracht ³⁾.

Tweede opinie NGConsulting

De belangrijkste conclusies van NGConsulting waren:

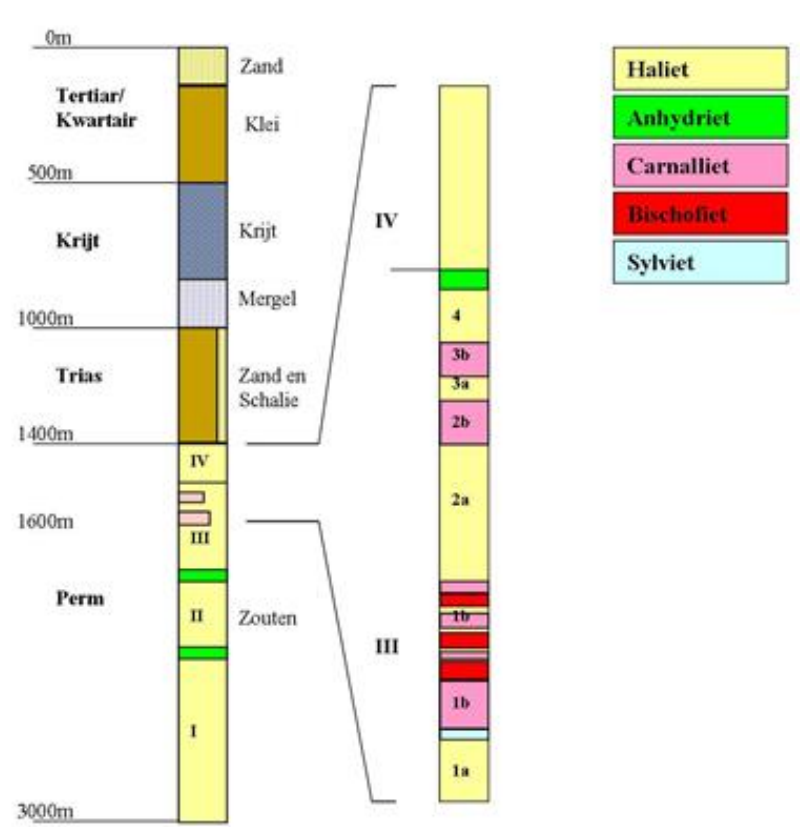
- Het direct oplossen van bischofiet zout is ook het belangrijkste oplosmechanisme bij verbonden Nedmag-cavernes, wat een impact heeft op de volumetrische berekeningen voor het cluster, en
- er moet een temperatuurcorrectie worden toegepast op de in het laboratorium gemeten pekeldichtheden.

Dit rapport is een update van het rapport van 30 oktober 2015 waarin de bovengenoemde conclusies van NGConsulting zijn verwerkt, gevolgd door conclusies met betrekking tot de nauwkeurigheid van berekende squeezevolumes in relatie tot gemeten bodemdaling.

2. HET NEDMAG OPLOSMIJNBOUW PROCES AND DE MODELLERING DAARVAN

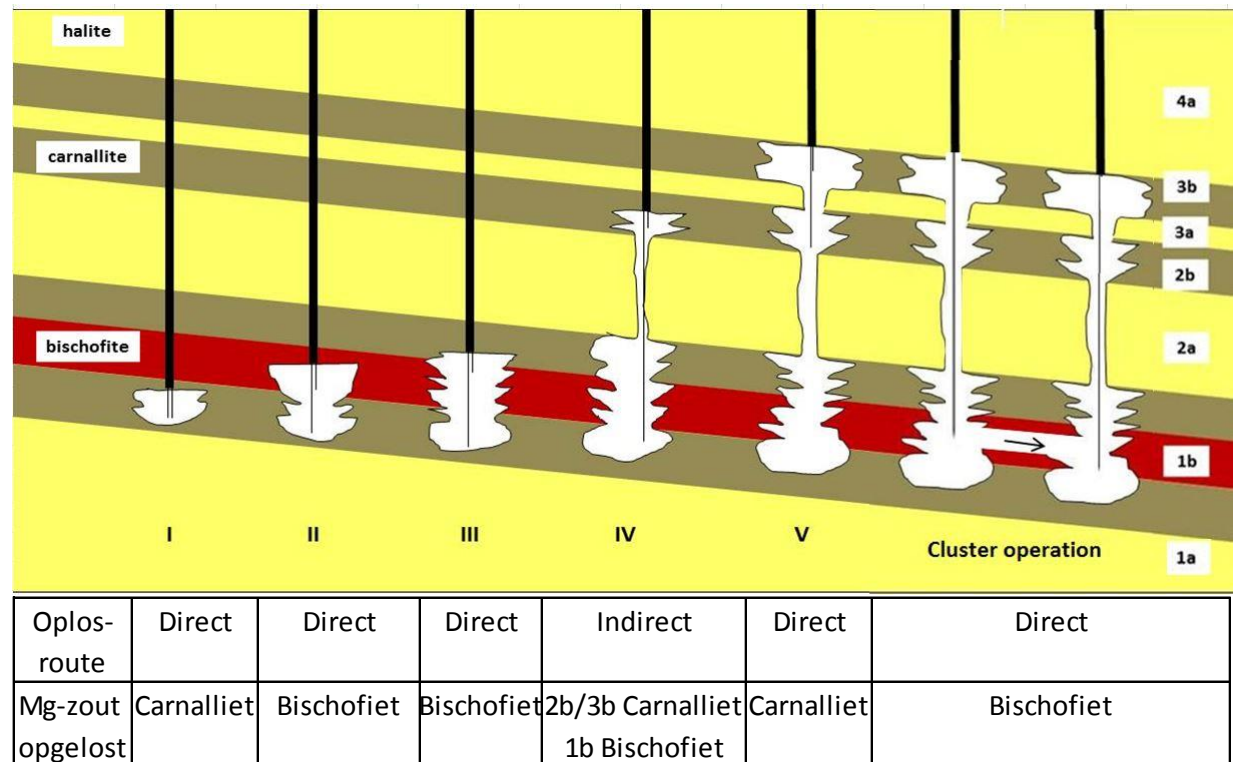
2.1 Het Nedmag oplosmijnbouw proces

Nedmag produceert magnesiumchloride door het oplossen van magnesiumzouten uit de Zechstein III-formatie op een diepte van 1300 tot 1800 m. De eerste vier cavernes VE-1 tot 4 zijn ontwikkeld vanuit het eerste Well Head Centre 1 (WHC-1), de cavernes TR-1 tot 9 zijn ontwikkeld vanuit WHC-2. Hierbij wordt proceswater of verdunde zoutoplossing geïnjecteerd als oplosmiddel in de bischofiet/carnalliet houdende ZE-III 1b-laag. In de beginjaren werd ook zout geproduceerd uit carnalliet houdende ZE-III 2b/3b lagen.



Figuur 1: Typische zout lithologie van een Nedmag boorgat

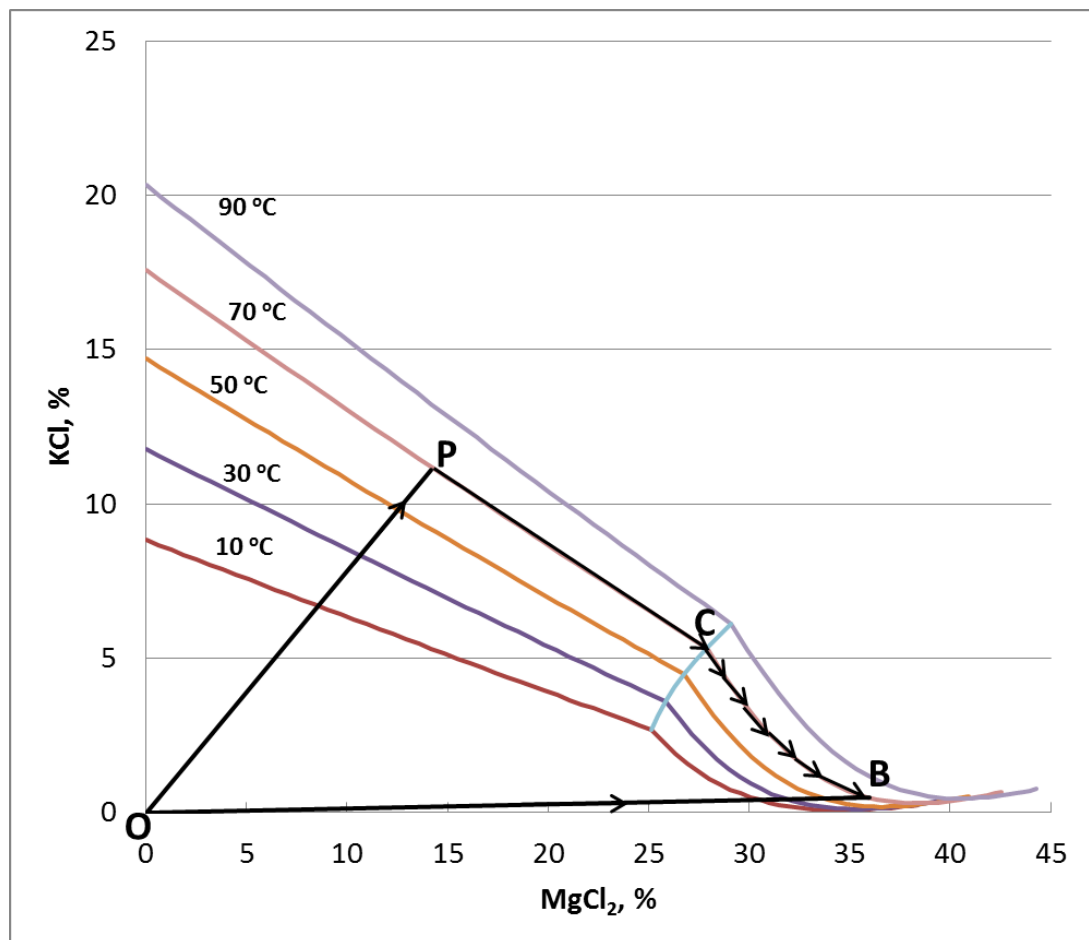
Bij de ontwikkeling van een caverne kunnen de volgende 6 loofasen worden onderscheiden:



Figuur 2: De zes loofasen van Nedmag cavernes

In loofase 1 wordt water of verdunde pekkel rechtstreeks in de ZE-III 1b-carnallietlaag onder het bischofietzout geïnjecteerd. In deze fase wordt een zogenaamde sump (ondersnede) gevormd waarbij een carnallitische (KCl-rijke) pekkel wordt geproduceerd terwijl sylviet precipiteert. Ongecontroleerde opwaartse uitloging van het bovenliggende bischofiet wordt voorkomen met een oliedeken.

Het loogtraject wordt in Figuur 3 weergegeven door lijn OPC in het geldende thermodynamische fasediagram. Van O tot P lost carnalliet congruent op tot de maximale KCl-oplosbaarheid is bereikt bij punt P, daarna lost van punt P naar C meer carnalliet op terwijl sylviet precipiteert. Bij een temperatuur van 70 °C wordt een verzadigde carnallitische pekkel verkregen met 28 % $MgCl_2$ en 5 % KCl.



Figuur 3: Het MgCl₂/KCl fase diagram

Nadat het gewenste sumpvolume is bereikt, worden de oliedeken en/of het injectieniveau opgetrokken tot in het bischofiet bevattende ZE-III 1b-gedeelte waarna selectief bischofiet oplost in loofase 2 volgens het loogtraject OB (directe oplossing) in Figuur 3. In punt B wordt een verzadigde bischofitische pekkel verkregen met 36 % MgCl₂ en 0.5 % KCl. Om aan de KCl-verzadiging te voldoen, lost een kleine hoeveelheid carnalliet of sylviet op. Bovendien zullen kleine hoeveelheden haliet en kieseriet parallel aan het bischofiet oplossen.

Na verdere opwaartse verplaatsing van de oliedeken en/of injectiepunt in de loofase 3 wordt het oplosmiddel geïnjecteerd in de bovenkant van de ZE-III 1b sectie.

In het oorspronkelijke loofase 3 oplosconcept ²⁾ komt het oplosmiddel eerst in contact met carnalliet en vormt een carnallitische pekkel volgens loogtraject OPC. Het carnallitische pekkelvolume dat niet in de gevormde holruimte past, loopt intern over naar het onderste bischofiet houdende deel. Het overloopvolume wordt verminderd door eventuele val van gedestabiliseerd inert materiaal en precipitaten. Het

resulterende overloopvolume lost bischofiet op en vormt bischofitische pekels volgens de loogtraject CB, waarbij KCl neerslaat in de vorm van secundair carnalliet.

Volgens de huidige inzichten van NGConsulting³⁾ en Nedmag ondersteund door vloeistofdynamica-simulaties⁴⁾, worden als gevolg van de sterke lokale turbulentie, het oplosmiddel en verzadigde bischofitische cavernepels in de ZE-III 1b cavernes zodanig goed gemengd dat de cavernes MgCl₂-concentratie niet lager wordt dan 28 %. Dientengevolge treedt het selectief oplossen van bischofiet op en wordt het directe loogtraject OB gevolgd. Een gevolg is dat het vallen van onoplosbaar inert materiaal of precipitaten niet meer relevant is voor de volumetrische balans van de cavernes. Dit nieuwe concept van ook direct oplossen van bischofiet in loofase 3, in dit rapport loofase 3DL genoemd, bij hoge injectie in laag ZE-III 1b resulteert in de directe vorming van bischofitische pekels identiek aan zoals in loofase 2.

In loofase 4 zijn het injectiepunt en de oliedeken verhoogd naar het onderste carnalliet houdende ZE-III 2b sectie, waar geen bischofiet aanwezig is. Het productiepunt blijft in de onderliggende ZE-III 1b sectie. Oplosmiddel dat wordt geïnjecteerd in ZE-III 2b vormt een carnallitische pekels die door het boorgat overloopt naar ZE-III 1b sectie waar na contact met bischofiet een bischofitische pekels wordt gevormd. Deze situatie met fysiek gescheiden injectie in ZE-III 2b en productie uit ZE-III 1b is de enige waarin het indirecte loogtraject OPCB wordt gevolgd.

In loofase 5 zijn het injectiepunt en de oliedeken verhoogd naar de meest ondiepe carnalliet houdende ZE-III 3b laag, tevens is het productiepunt verhoogd naar de onderste ZE-III 2b carnalliet laag. In deze fase wordt carnallitische pekels geproduceerd volgens loogtraject OPC identiek aan die van loofase 1.

Tot het jaar 1993 werden de cavernes geëxploiteerd met een "room and pillar" techniek bij licht sub-lithostatische druk. Na succesvolle demonstratie van het squeezeconcept tussen 1993 en 1995 produceren de TR-putten, met uitzondering van cavernes TR-9, bij een sub-lithostatische druk van 60 tot 80 bar.

Vrij snel na het opstarten in oktober 1982 werd een drukverbinding gevonden tussen TR-1 en TR-2. In de periode vanaf november 1996 werden geleidelijk meer TR cavernes hydraulisch met elkaar verbonden tot één grote cluster. Vanaf september 2009 is cavernes VE-4 ook verbonden met het TR-cluster. Tijdens de laatste work-over van cavernes VE-3 in november 2006 werd een verbinding met cavernes VE-2 opgemerkt.

Momenteel bestaat de Nedmag caveerne operatie uit twee clusters en twee afzonderlijke cavernes:

- Het TR-cluster bestaande uit verbonden cavernes TR-1/2/3/4/5/6/7/8 & VE-4.
- Het VE-cluster bestaande uit cavernes VE-2 en VE-3.
- Caveerne VE-1 is alleen ontwikkeld in de ZE-III 2b/3b-sectie.
- Caveerne TR-9 wordt vanaf mei 2012 ontwikkeld in de ZE-III 1b sectie.

In de cluster looffase die momenteel van toepassing is op het TR-cluster, wordt oplosmiddel gewoonlijk geïnjecteerd in de ondiepere gedeelten van ZE-III 1b. Vanwege de turbulente vermenging van oplosmiddel en caveernepekkel, is selectieve directe bischofiet oplossing via loogtraject OB ook toepasbaar op ZE-III 1b injectiecavernes. Dit in tegenstelling tot versie 1 van het rapport over de massabalansstudie van de Nedmag cavernes waarin werd uitgegaan van indirecte vorming van bischofitische pekkel ²⁾.

2.2 Nedmag massa balans modellen

2.2.1 Het BDS-model

Het Brine Data System (BDS) model is ontwikkeld in 1995 en is in gebruik om de volumetrische caveerne ontwikkeling van de Nedmag mijn vanaf 1972 te volgen. Dit model is in principe gebaseerd op een massabalans met als input: gemeten injectie- en productiepekelvolumes en concentraties per caveerne. Per looffase worden in BDS de hoeveelheden opgelost zout, neerslagen, evenals het squeezevolume en het totaal ondergrondse pekkelvolume berekend. Het squeezevolume is gedefinieerd als het excès aan productiepekel volume ten opzichte van het volume wat mag worden verwacht op basis van het injectie volume zonder convergentie van de caveerne.

Een kenmerk van BDS is dat ervan wordt uitgegaan dat een pekelsamenstelling kan worden weergegeven als een mengsel van de drie componenten: verzadigde bischofitische pekkel, verzadigde carnallitische pekkel en water. Daarnaast wordt aangenomen dat pekkel in de caveerne aanwezig is als een twee fasen systeem waarbij lichtere verzadigde carnallitische pekkel drijft op een laag verzadigde bischofitische pekkel. De concentraties aan opgeloste zouten zijn onafhankelijk verondersteld van diepte en positie. In het geval van de productie van onverzadigde pekkel wordt aangenomen dat een deel van de injectiewater als een kortsluitstroom rechtstreeks aan de pekkelproductie stroom rapporteert.

De BDS-berekeningen zijn opgesteld voor een enkelvoudige cavernes. Hierbij introduceert onderlinge verbinding tussen cavernes een discrepantie tussen injectievloeistof en pekkelproductie per caveerne. Daarom kunnen voor verbonden cavernes alleen zinvolle squeeze- en ondergrondse pekkelvolumes worden berekend door de volumes van afzonderlijke berekende cavernes te sommeren.

De nauwkeurigheid van de BDS-modelberekeningen voor het totale ondergrondse pekervolume is geschat door Renier ⁵⁾. Zijn belangrijkste bevindingen waren dat de gehanteerde loofasen niet altijd correct zijn en dat de keuze voor indirecte of directe vorming van bischofitische pekkel een significant effect heeft op berekende volumes. Renier adviseerde om het volgende te bestuderen:

- Het effect van diepte (temperatuur) op verzadigde zoutsamenstellingen en dichtheden. Een variatieanalyse voor het totale hoogteverschil tussen de cavernes toonde aan dat dit een onnauwkeurigheid van 4% van het berekende squeezevolume introduceert. Dit resultaat is door Nedmag in 2012 gerapporteerd ⁶⁾.
- Het effect van druk, diepte en vorm op cavernconvergentie. Dit is onderdeel van de Nedmag Abandonneringsstudie ⁷⁾.
- Het effect van pekelluitwisseling tussen onderling verbonden cavernes, wat deel uitmaakt van deze studie.

2.2.2 Het nieuwe massa balans model

Aangezien het BDS-model is gebaseerd op de fysisch onjuiste aanname dat gemeten pekelsamenstellingen kunnen worden gesplitst in: verzadigde carnallitische en bischofitische pekkel en water, is een exact en daarmee nauwkeuriger massabalansmodel opgesteld. In dit model wordt aangenomen dat de gemeten samenstelling van de cavernepekkel representatief is voor de totale cavernehouding. Dit vermijdt het gebruik van een standaard bischofitische pekelsamenstelling. Het gebruik van standaard verzadigde carnallitische pekkel blijft echter noodzakelijk in het geval van indirecte vorming van bischofitische pekkel zoals in loofase 4. De gebruikte vergelijkingen zijn eerder beschreven ⁸⁾ en na een kleine tekstuele correctie door NGConsulting ³⁾, weergegeven in Appendix I.

3. MODEL BEREKENINGEN

3.1 Algemeen

Op basis van de operationele gegevens over de periode van 1972 tot juni 2015 zijn berekeningen uitgevoerd met het nieuwe massabalansmodel. Voor elke afzonderlijke cavernehouding is hierbij een maandelijkse massabalans opgesteld. Door de volume-effecten over alle cavernes te sommeren worden het resulterende squeezevolume en ondergrondse pekervolume voor het gehele Nedmag caverneveld verkregen.

Paragraaf 3.2 beschrijft de massabalansberekeningen met de oorspronkelijke loofasen en op basis van injectie-diepte herziene loofasen. De laatste met en zonder dichtheidscorrectie voor cavernetemperatuur. In deze berekeningen werden de oorspronkelijke aannames van indirecte vorming van bischofitische pekkel in loofase 3 gehandhaafd.

Paragraaf 3.3 beschrijft de massabalansberekeningen met de nieuwe directe vorming van bischofitische pekels volgens loof fase 3DL, met en zonder dichtheidscorrectie voor de caverne temperatuur.

In paragraaf 3.4 wordt een analyse gemaakt van hoe het oplosproces gemodelleerd kan worden van cavernes die onderling verbonden zijn via de ZE-III 1b laag.

3.2 Massabalans model berekeningen: oorspronkelijk gehanteerde loof fasen, herziene loof fasen en temperatuur correctie

In de casus MB origineel, zijn dezelfde loof fasen 1 tot 5 en pekeldichtheden gebruikt zoals die werden gebruikt in de BDS berekeningen.

De loof fase toekenning in de BDS-berekeningen is gecontroleerd aan de hand van gerapporteerde injectiediepten en zoutlithologie per caverne. Er werd gevonden dat er een aantal maanden was waarin in het ZE-III 1b bischofiet (loof fase 2) werd geïnjecteerd in plaats van het bovenliggende ZE-III 1b carnalliet (loof fase 3). Correctie hiervoor zal meer directe vorming geven van bischofitische pekels dan in de oorspronkelijke BDS-berekeningen is aangenomen.

In de casus MB gereviseerde LF's, zijn de gecorrigeerde loof fasen 1 tot 5 toegepast, maar bij handhaving van de oorspronkelijke aannames over loof fasen en pekeldichtheden.

De casus herziene LF's met T-correctie is een herhaling van de herziene LF's berekening, maar nu met pekeldichtheden van de geproduceerde pekels evenals de cavernepekels gecorrigeerd voor een cavernetemperatuur van 67 °C voor ZE-III 1b cavernes en 63 °C voor ZE -III 2b/3b cavernes. De aannames van het oorspronkelijke loof fasen werden gehandhaafd.

Casus	Squeezevolume		Ondergronds pekelsvolume	
	m ³	% van BDS	m ³	% van BDS
BDS	5,994,612	100	5,821,784	100
MB origineel	6,983,311	116	5,280,514	91
MB herziene LF'n	6,208,914	104	6,484,981	111
MB herziene LF'n met T-correctie	5,692,016	95	7,151,617	123

De nieuwe massabalansberekeningen met originele invoerparameters geven 16 % meer squeezevolume en 9 % minder totaal ondergrondse pekelsvolume dan BDS. Dit verschil is voornamelijk te wijten aan de onvolkomenheden in het BDS-model.

Met de herziene loof fasen, die een grotere bijdrage van de meer expansieve directe vorming van bischofiet-pekels geven, neemt het squeezevolume aanzienlijk af, maar is

4 % hoger dan de oorspronkelijke BDS-waarde bij een totaal ondergronds pekervolume dat 11 % hoger is.

De verlaging in pekeldichtheid als gevolg van een temperatuuroename van 20 tot 67 °C van 2 - 3% is relatief gering maar leidt tot een 9 % lager squeezevolume. Dit effect komt in grote lijnen overeen met de bevindingen van NGConsulting en is te wijten aan het feit dat de totale volumetrische pekeluitzetting geconcentreerd is in een kleiner deelvolume ³⁾.

Voorbeeld TR-9

Het sterke effect van een relatieve kleine dichtheidscorrectie wordt het best gedemonstreerd aan de hand van een voorbeeldberekening op basis van de operationele gegevens van caveerne TR-9 over de maand september 2014. In deze periode werd 7,664 m³ verdunde pekkel (@ 64.5 °C) geproduceerd bij de injectie van 3,937 m³ water in loofase 2. Na correctie voor de toegepaste verdunning van 954 m³ bedroeg de caveernepekkel productie 6,710 m³ (@ 67 °C). In steady state vormt het injectiewater afhankelijk van de gehanteerde verdunde pekeldichtheid 14,707 of 14,797 ton onverdunde caveernepekkel. Hierbij lost dan 6,708 of 6,764 m³ zout op.

Bij een caveernepekkel dichtheid van 1.307 t/m³ wordt ongeveer 327 m³ meer pekkel gevormd in een 56 m³ groter opgelost volume. Dit levert 271 m³ meer caveernepekkel zonder squeeze.

Pekkel productie				Onverdunde pekkel van oplosmiddel		Opgelost volume	Onverd. pekkel productie zonder squeeze	Gemeten onverd. productie	Squeeze volume
Verdund		Onverdund		t	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
Temp, °C	t/m ³	Temp, °C	t/m ³						
20.0	1.296	20.0	1.338	14,707	10,992	6,708	4,284	6,710	2,426
64.5	1.270	67.0	1.307	14,797	11,319	6,764	4,555	6,710	2,155
Verschil				90	327	56	271		-271
Ratio	0.980		0.977	1.006	1.030	1.008	1.063		0.888

Het squeezevolume gedefinieerd als caveerne-productie (6.710 m³) minus productie zonder squeeze (4.555 m³) wordt hierdoor met 271 m³ verminderd van 2,426 m³ tot 2,155 m³, ofwel een relatieve vermindering van 11 % bij een relatief gering dichtheidscorrectie van 2.3 %.

3.3 Massabalans model berekeningen: effect van direct bischofiet oplossen en temperatuur

Volgens huidige inzichten van NGConsulting ³⁾ en Nedmag is indirecte vorming van bischofietische pekkel een mechanisme dat alleen geldig is voor loof fase 4. De MB herziene berekeningen zijn herhaald voor de volgende situaties:

- Casus MB herzien LF 3 -> 3 DL, met directe uitloging van bischofiet in loof fase 3, maar nog steeds met de 20°C pekeldichtheid.
- Case MB herzien LF 3 -> 3 DL met T-correctie, uitgaande van directe loging van bischofiet in loof fase 3 inclusief pekeldichtheden gecorrigeerd naar cavernetemperatuur van 67°C voor ZE-III 1b of 63 °C voor de ZE-III 2b/3b cavernes voor alle loof fasen.

De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande tabel, waarin om redenen van vergelijking ook de oorspronkelijke BDS-volumes zijn weergegeven.

Casus	Squeezevolume		Ondergronds pekkelvolume	
	m ³	% van BDS	m ³	% van BDS
BDS	5,994,612	100	5,821,784	100
MB origineel	6,208,914	104	6,484,981	111
MB herziene LF'n	5,735,795	96	7,316,829	126
MB herziene LF'n met T-correctie	5,201,954	87	7,998,694	137

Er wordt duidelijk aangetoond dat het squeezevolume met 473,119 m³ vermindert door het volumetrische expansie-effect van directe vorming van bischofietische pekkel en met een extra 533,841 m³ door thermische uitzettingseffecten. Door de gecombineerde expansie-effecten resulteert een uiteindelijk squeezevolume van 5.201.954 m³, dat is 87 % van de oorspronkelijke BDS-waarde. Als bijkomend effect neemt het totale volume aan ondergrondse pekkel met 37 % toe tot 7.998.694 m³.

3.4 Massabalans model en clustering

In de eerste versie van het massabalans rapport ²⁾ is beschreven dat bij de historische ontwikkeling van het Nedmag-pekkelveld steeds meer cavernes met elkaar verbonden werden via de ZE-III 1b-laag.

Well	VE-1	VE-2	VE-3	VE-4	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	TR-7	TR-8	TR-9
okt-82					Cluster 1								
nov-96					Cluster 2				Cluster 2				
jan-98					Cluster 2			Cluster 3	Cluster 2	Cluster 3			
jul-99					Cluster 4			Cluster 3	Cluster 4	Cluster 3	Cluster 4		
nov-99					Cluster 5			Cluster 3	Cluster 5	Cluster 3	Cluster 5		
mrt-01					Cluster 6			Cluster 3	Cluster 6	Cluster 3	Cluster 6		
okt-02								Cluster 7					
nov-06		Cluster 8						Cluster 7					
sep-09		Cluster 8						Cluster 9					

Figuur 4: Tijdsverloop van verbindingen tussen de Nedmag cavernes

Het verbonden zijn van cavernes wordt actief gebruikt door in één caveerne te injecteren en uit andere cavernes pekkel te produceren. Het belangrijkste oplosmechanisme voor een clusteroperatie dat werd toegepast in versie 1 van het Nedmag massabalansrapport was indirecte vorming van bischofiet-pekkel²⁾.

Volgens de huidige inzichten^{3,4)} daalt de $MgCl_2$ -concentratie in een ZE-III 1b caveerne niet beneden 28 % vanwege de aanwezigheid van verzadigde bischofietische caveernepekkel en effectieve menging van het oplosmiddel met de caveernepekkel. Dit betekent dat er geen drijvende kracht voor het oplossen van carnalliet. Om deze reden is directe vorming van bischofietische pekkel ook het overheersende mechanisme in een injectiecaveerne.

In de oorspronkelijke clusterbehandeling²⁾ werden verbonden cavernes behandeld als één systeem met gecombineerde injectie / productiestromen en gemengde pekkelconcentraties. Bij deze benadering gaat echter alle onderscheid verloren tussen de ZE-III 2b/3b bovencavernes in en ZE-III 1b ondercavernes. Het werd duidelijk dat de clusterbenadering in meer detail moest worden uitgewerkt door hierin de volgende perioden te onderscheiden:

- Injectie en productie van verbonden ZE-III 1b-secties met direct oplossen van bischofiet.
- Injectie in ZE-III 2b/3b bovencavernes en productie uit de verbonden ZE-III 1b secties met indirect oplossen van bischofiet.
- Injectie en productie van ZE-III 2b/3b cavernes met gedeeltelijke overloop van carnallitische pekkel naar de ZE-III 1b sectie.
- Productie van ZE-III pekkel door een ZE-III 2b/3b caveerne zoals ervaren tijdens de pilot squeeze test met TR-4 en TR-6 in de periode 1993 tot 1995.

Gezien de complexe volumetrische interacties en het feit dat de grootte van de afzonderlijke 2b/3b bovencavernes van belang is voor toekomstige abandonnering is het uitvoeren van massabalansberekeningen voor enkele cavernes zoals in de casus: LF 3 -> 3DL met temperatuurcorrectie de te prefereren benadering.

Het effect van clustering van de ZE-III 1b-sectie kan dan worden opgenomen door optelling van de afzonderlijke volumes van de verbonden 1b-cavernes.

In de onderstaande tabel worden de volumes na clustering gegeven voor de status juni 2015.

Caverne/cluster	Squeezevolume, m ³ Total	Totaal ondergronds pekervolume, m ³		
		ZE-III 1b	ZE-III 2b/3b	Total
VE-1	21,489	0	175,824	175,824
TR-9	21,657	346,481	0	346,481
VE 2/3	145,201	675,441	412,704	1,088,145
TR 1-8/VE-4	5,013,607	4,692,290	1,695,956	6,388,246
Totaal	5,201,954	5,714,211	2,284,483	7,998,695

Van het totaal ondergronds pekervolume van 7.988,95 m³ is ongeveer 5.714.211 m³ aanwezig in de ZE-III 1b ondercavernes en 2.284.483 m³ in ZE-III 2b/3b bovcavernes. Voor een combinatie van een verbonden ZE-III 2b/3b bovcaverne en een verbonden ZE-III 1b caverne kan het totale squeezevolume worden berekend, maar niet de verdeling hierover. In dergelijke situaties wordt uitgegaan van een aangenomen default verdeling van 5 % uit de bovcaverne en 95 % uit de ondercaverne, een verhouding die is gebaseerd op laboratorium kruiptesten met carnalliet en bischofiet.

4. DISCUSSIE

In 2011 is door TNO een inversiestudie uitgevoerd ⁹⁾ op basis van bodemdalingsmetingen van de periode 1993 tot 2010. In deze studie werd een mismatch van ongeveer 15% geconstateerd tussen het BDS berekende squeezevolume en het squeezevolume uit inversie van de bodemdalingskom. Volgens TNO kan dit verschil te wijten zijn aan een afwijking van het gebruikte geomechanisch model of een positieve structurele fout bij de bepaling van het totale squeezevolume uit productiegegevens.

Bij aanname van een structurele mismatch van 0.85 voor de productieperiode 1972 tot juni 2015 wordt een inversievolume van 5.095.420 m³ verwacht bij een BDS berekend squeezevolume van 5.994.612 m³.

Casus	Squeezevolume		Totaal ondergronds pekelvolume
	m ³	% van inv. volume	m ³
Inversie volume, 85 % of BDS	5,095,420	100	7,998,694
MB met LF 3 --> 3DL en temp. correctie	5,201,954	102	

De gedetailleerde studies van Nedmag en NGConsulting laten zien dat het squeezevolume berekend met direct bischofiet oplossen en temperatuur-gecorrigeerde dichtheden slechts 2% hoger is dan het verwachte inversievolume met zijn eigen onnauwkeurigheid.

De overeenkomst in squeezevolume is zeer goed gegeven een gecombineerde onnauwkeurigheid van 5 % voor de volumemetingen en chemische analyse van oplosmiddel en productie-pekelen en een geschatte 6 % onnauwkeurigheid voor het inversievolume (1 σ bij 3.5 mm).

5. CONCLUSIES

Nieuwe massabalansberekeningen uitgevoerd door Nedmag en NGConsulting waarin de expansie-effecten van directe bischofiet oplossen in ZE-III1b-secties en een temperatuur-gecorrigeerde pekeldichtheid worden meegenomen geven een squeezevolume van 5,201,954 m³ voor de Nedmag pekelenwinning over de periode van 1972 tot juni 2015.

Dit squeezevolume is 87% van het BDS-berekende volume.

Het nieuwe squeezevolume van 5,201,954 m³ komt goed overeen met het verwachte inversievolume van 5.095.420 m³ op basis van de inversiestudie uitgevoerd door TNO in 2011. Het relatieve verschil van 2 % kan volledig worden verklaard door een onnauwkeurigheid van 5 % voor de berekende squeeze volume en een verwachte onnauwkeurigheid van 6 % voor het inversievolume.

Aangezien de bodemdalingsvoorspellingen in het Winningsplan 2013 gebaseerd zijn op 85 % van de voorspelde BDS squeezevolumes, is het niet nodig om de bodemdalingsvoorspellingen hiervan aan te passen. Het effect van een 37 % hoger totaal ondergronds pekelenvolume op toekomstige abandonnering moet worden onderzocht.

Het nieuw ontwikkelde massabalansmodel voor de berekening van het squeezevolume en het resulterende ondergrondse pekelenvolume zal door Nedmag worden geïmplementeerd in haar caverne managementsysteem.

REFERENTIES

1. Winningsplan kalium- en magnesiumzoutwinning 2013, Nedmag Industries Mining & Manufacturing B.V., Winningsvergunning Veendam, 26 maart 2013.
2. Mass balance study of the Nedmag caverns, J. Visser, Veendam 30 October 2015.
3. Second opinion for Nedmag Cavern Mass balance. NGConsulting, Sondershausen, 15 February 2017.
4. W.R Velema, H. Bruining, J. Bullen en 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. Gedrag van Magnesiumzouten tijdens de Winning in de Concessie van Nedmag te Veendam en een daaruit volgende volumebepaling van het Complex van Cavernes van WHC-2. W. Renier, MSc Thesis TU Delft, 1 september 2006.
6. Het ondergronds pekervolume en onzekerheidsanalyse hiervan bij de Nedmag zoutwinning. Interne Nedmag notitie, J. Visser, Veendam, 25 april 2012.
7. Abandonment study Nedmag caverns. Cavern squeeze modelling and geophysical analysis of brine permeation and containment. Well Engineering Partners B.V., dr.ir. A.J.H.M. Duquesnoy, Hoogeveen 31-3-2015.
8. Nauwkeurighedsanalyse BDS modelberekeningen. Interne Nedmag Notitie, J. Visser, Veendam, januari 2013.
9. Nedmag Veendam inversie bodemdaling TNO-rapport (060-UT-2011-00687). P.A Fokker, Utrecht, 8 april 2011.

APPENDIX I

Loofase 1

De ontwikkeling van een caveerne begint met het creëren van een ondersnede (sump) in het onderste deel van het 1b carnalliet zout. Het oplossen van het bovenliggende bischofietzout wordt hierbij voorkomen met een oliedeken. In loofase 1 wordt een hoeveelheid water of verdunde pekkel (M1) geïnjecteerd, de zouten: carnalliet (C), haliet (H), kieseriet (K) gaan in oplossing en vormen cavernepkkel (M). Vanwege het incongruente oplosgedrag van carnalliet precipiteert het sylviet ($S\downarrow$) tegelijkertijd. Typisch wordt bij verzadiging een carnallitische pekkel gevormd met: 28 % $MgCl_2$, 5.2 % KCl, 2 % NaCl en 1.3 % $MgSO_4$ en een dichtheid van 1.33 t/m^3 bij 20°C (ρ_{CB}).

Voor loofase 1 gelden de volgende massabalans vergelijkingen:

Totale massabalans	$M_1 + C + H + K = M + S\downarrow$	(1)
Magnesiumchloride balans	$m_1M_1 + m_cC = mM$	(2)
Kaliumchloride balans	$s_1M_1 + s_cC = sM + S\downarrow$	(3)
Natriumchloride balans	$h_1M_1 + H = hM$	(4)
Kieseriet balans	$k_1M_1 + k_kK = kM$	(5)

De symbolen: m, s, h en k zijn de opgeloste massa concentraties van $MgCl_2$, KCl, NaCl en $MgSO_4$ in de injectie vloeistof (subscript 1) of de gevormde pekkel. De symbolen m_c , s_c en k_k representeren respectievelijk het $MgCl_2$ gehalte van carnalliet, het KCl gehalte van carnalliet en het $MgSO_4$ gehalte in kieseriet.

Combinatie van vgl'n (2), (3), (4) en (5) gevolgd door substitutie in vgl. (1) geeft:

$$M = M_1 (1 - m_1/m_c (1 - s_c) - h_1 - k_1/k_k - s_1) / (1 - m/m_c (1 - s_c) - h - k/k_k - s) \quad (6)$$

Het invoeren van de bekende massa geïnjecteerd water of pekkel en gemeten concentraties van injectie en product-pekkel geeft de massa gevormde pekkel (M). Het invoeren van M in vergelijkingen (2) tot en met (5) geeft de massa van de opgeloste zouten: C, H, K en die van precipitaat $S\downarrow$.

Het netto volume van de gevormde carnalliet holruimte bij lithostatische drukcondities, dus zonder caveerne convergentie, wordt berekend met behulp van de respectievelijke zoutdichtheden met:

$$\Delta V_{c,cav} = C/\rho_C + H/\rho_H + K/\rho_K - S\downarrow/\rho_{Sy} \quad (7)$$

Uiteindelijk kan dan het volume aan pekkel dat zou worden geproduceerd bij lithostatische condities worden berekend via:

$$\Delta V_{\text{prod}} = M / \rho_{\text{CB}} - \Delta V_{\text{C,cav}} \quad (8)$$

	Carnallite	Bischofite	Kieserite	Halite	Sylvite
ρ , t/m ³	1.60	1.60	2.57	2.14	1.99
MgCl ₂ , %	34.28	46.86			
KCl, %	26.84				
NaCl, %					
MgSO ₄ , %			86.98		

Looffase 2 met directe vorming van bischofitische pekel

Nadat de ondersnede is ontwikkeld, wordt de oliedeken tijdelijk teruggenomen en maakt het geïnjecteerde water of pekel contact met bischofietzout. Als resultaat lost bischofiet (B) op uit de 1b-sectie en wordt bij verzadiging een bischofitische pekel gevormd met een typische samenstelling van: 36 % MgCl₂, 0.5 % KCl, 0.5 % NaCl en 0.45 % MgSO₄ en een dichtheid van 1,38 t/m³ @ 20 ° C (ρ_{BB}).

Voor deze fase gelden de volgende massabalansvergelijkingen:

$$\text{Totale massabalans} \quad M_1 + C + B + H + K = M \quad (9)$$

$$\text{Magnesiumchloride balans} \quad m_1 M_1 + m_c C + m_B B = m M \quad (10)$$

$$\text{Kaliumchloride balans} \quad s_1 M_1 + s_c C = s M \quad (11)$$

$$\text{Natriumchloride balans} \quad h_1 M_1 + H = h M \quad (12)$$

$$\text{Kieseriet balans} \quad k_1 M_1 + k_K K = k M \quad (13)$$

De symbolen: m, s, h and k representeren the massa concentrations van MgCl₂, KCl, NaCl en MgSO₄ in de injectie vloeistof (subscript 1) of van de gevormde pekel. Het symbool m_B staat voor het MgCl₂ gehalte van bischofiet zout.

Combinatie van vgl'n (10), (11), (12) en (13) en substitutie in vgl. (9) geeft:

$$M = M_1 (1 - s_1/s_c * (1 - m_c/m_B) - m_1/m_B - h_1 - k_1/k_k) / (1 - s/s_c * (1 - m_c/m_B) - m/m_B - h - k/k_k) \quad (14)$$

Het invoeren van de bekende massa injectiewater of injectiepekel en de gemeten cocentraties van de opgeloste zouten maakt het mogelijk de massa van de gevormde pekel (M) te berekenen. Het invoeren van M in vgl'n (10) t/m (13) geeft de massa aan opgeloste zouten: B, C, H, en K.

Het netto volume van de gevormde holte bij lithostatische drukomstandigheden zonder convergentie, wordt berekend met behulp van de respectieve zoutdichtheden door middel van:

$$\Delta V_{\text{B,cav}} = C/\rho_C + B/\rho_B + H/\rho_H + K/\rho_K \quad (15)$$

Uiteindelijk wordt het pekervolume dat zou worden geproduceerd bij lithostatische omstandigheden berekend met:

$$\Delta V_{\text{prod}} = M/\rho_{\text{BB}} - \Delta V_{\text{B,cav}} \quad (16)$$

Looffasen 3 en 4 met indirecte vorming van bischofietische pek

Nadat de bischofietische caveerne zijn optimale diameter had bereikt, wordt het injectiepunt ofwel naar de 1b-carnallietlaag boven het bischofietzout (fase 3) of de 2b/3b carnallietlaag (fase 4) verplaatst. Dientengevolge vormt het geïnjecteerde water of pekels initieel een carnallitische pek in een carnalliet holte. Het carnalliet oplosproces is identiek aan zoals beschreven voor loof fase 1 met vgl'n (1) tot en met (7). Het deel van de gevormde carnallitische pek dat niet in de carnallitische holte past, stroomt over naar de onderliggende 1b holruimte, volgens:

$$\Delta V_{\text{overloop}} = M / \rho_{\text{CB}} - \Delta V_{\text{C,cav}} \quad (17)$$

In de bischofiet holruimte lost de carnallitische pek ($M_1 = \Delta V_{\text{overloop}} * \rho_{\text{CB}}$) bischofiet zout op en vormt een bischofietische pek. Als resultaat van de toegenomen MgCl_2 concentratie precipiteert een deel van het opgeloste carnalliet ($\text{C}\downarrow$), kieseriet ($\text{K}\downarrow$) en haliet ($\text{H}\downarrow$). De effecten van deze pek omzetting kunnen worden beschreven met:

$$\text{Totale massabalans:} \quad M_1 + B = M + \text{C}\downarrow + \text{K}\downarrow + \text{H}\downarrow \quad (18)$$

$$\text{Magnesiumchloride balans:} \quad m_1 M_1 + m_B B = m M + m_C \text{C}\downarrow \quad (19)$$

$$\text{Kaliumchloride balans} \quad s_1 M_1 = s M + s_C \text{C}\downarrow \quad (20)$$

$$\text{Natriumchloride balans} \quad h_1 M_1 = h M + \text{H}\downarrow \quad (21)$$

$$\text{Kieseriet balans} \quad k_1 M_1 = k M + k_K \text{K}\downarrow \quad (22)$$

Het omwerken van vgl'n (19), (20), (21) and (22) gevolgd door substitutie in vgl. (18) geeft:

$$M = M_1 (1 - s_1/s_C * (1 - m_C/m_B) - m_1/m_B - h_1 - k_1/k_K) / (1 - s/s_C * (1 - m_C/m_B) - m/m_B - h - k/k_K) \quad (23)$$

Deze vergelijking is identiek aan vergelijking (14).

Het invoeren van de bekende massa injectiewater of injectiepek en de concentraties van de hierin opgeloste zouten maakt het mogelijk de hoeveelheid gevormde pek (M) vanuit de overloop $\Delta V_{\text{overloop}}$ te berekenen. De onderliggende aanname is dat de overloop een verzadigde carnallitische pek is. Met vgl'n (19) t/m (22) worden de massa van het opgelost B en het geprecipiteerde: $\text{C}\downarrow$, $\text{H}\downarrow$, $\text{K}\downarrow$ berekend.

De netto holruimte verkregen bij lithostatische druk omstandigheden voor de 1b sectie kan worden berekend met behulp van de respectievelijke zout dichtheden met:

$$\Delta V_{\text{B, cav}} = B/\rho_B - \text{C}\downarrow/\rho_C - \text{H}\downarrow/\rho_H - \text{K}\downarrow/\rho_K$$

Het pekervolume geproduceerd onder lithostatische omstandigheden wordt berekend met:

$$\Delta V_{\text{prod}} = M / \rho_{\text{BB}} - \Delta V_{\text{B,cav}}$$

Loofase 5

De volume effecten afkomstig van de productie van carnallitische pekels verkregen door injectie en productie uit de 2b/3b lagen kunnen worden beschreven met de vgl'n afgeleid voor loofase 1.

Berekening squeezevolume

Het squeezevolume is gedefinieerd als het extra gemeten pekels productievolume aan het maaiveld ten opzichte van het berekend lithostatisch productievolume:

$$\Delta V_{\text{squeeze}} = \Delta V_{\text{surface}} - \Delta V_{\text{prod}}$$

In geval van een cluster bestaande uit N cavernes worden de volumetrische effecten van de verbonden individuele cavernes gesommeerd volgens:

$$\Delta V_{\text{cluster}} = \sum_{1}^N \Delta V_{\text{caverne}}$$