

Evaluatie oorzaak pekellekkage in Nedmag pekelcluster 20 april 2018 – update juli.

Vorbereiding: Well Engineering Partners B.V., Hoogeveen

Auteur:

Versie: tweede versie

Publicatiedatum: 18 juli 2018

Goedkeuring:

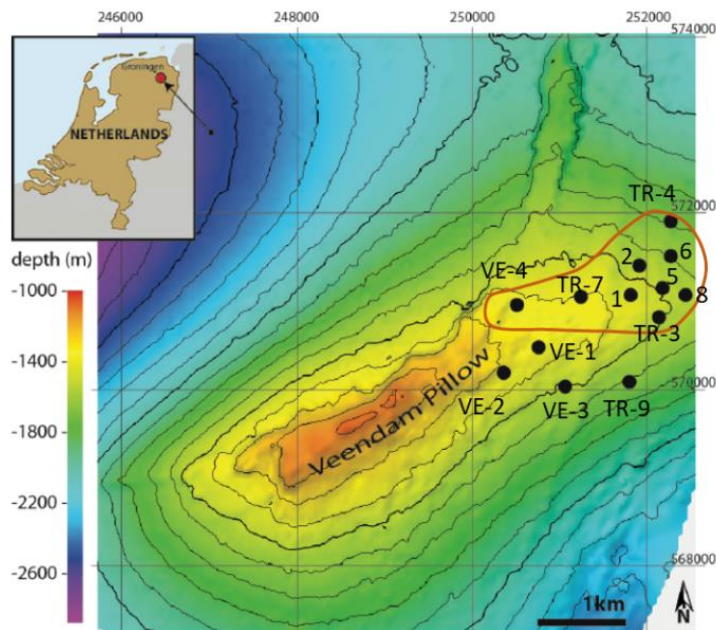


1 Inleiding-achtergrond

Nedmag opereert een zoutwinningsoperatie aan de westzijde van Veendam, waar zij magnesiumchloridepekkel wint. Door waterinjectie worden de magnesiumhoudende zouten (bischofiet, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, carnalliet ($\text{MgKCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) en kieseriet ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)) opgelost, waarbij pekkel ontstaat met een hoog MgCl_2 gehalte en laag gehalte aan andere zouten. Steenzout (haliet, NaCl) en anhydriet (CaSO_4) zijn zo goed als onoplosbaar bij hoge MgCl_2 concentratie en blijven ofwel onaantast zitten ofwel vallen in de caverne die gevormd wordt door de oplossing van Mg-zouten. Dit laatste vormt de sump, een laag met hoge porositeit, die een deel van de pekkel bevat (gebonden pekkel).

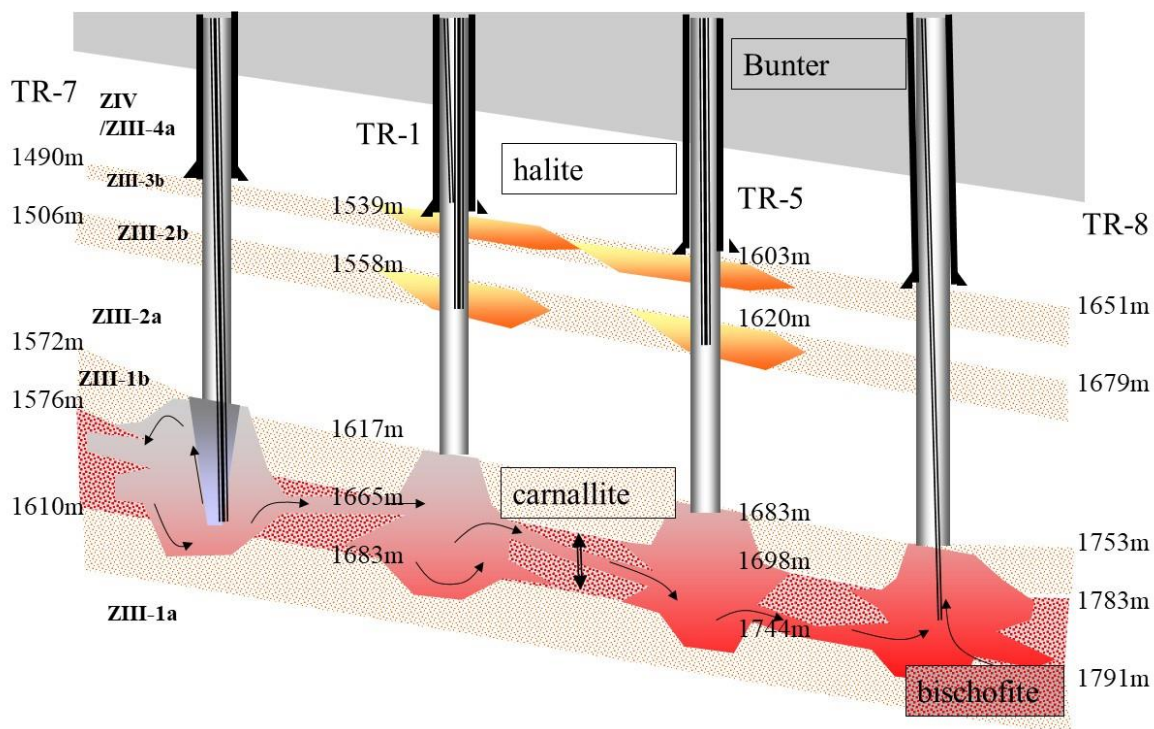
De oplosmijnbouw gebeurde oorspronkelijk (1972-1993) onder hoge (bijna lithostatische) druk en met gebruik van een oliedak, dat zorgt voor horizontale ontwikkeling van de caverne i.p.v. in de hoogte. Doordat de bischofiet, carnalliet en halietlagen niet zeer uniform gelaagd zijn, was het echter moeilijk te voorkomen dat er zich lokale holtes vormden, waar olie niet meer uit kon ontsnappen. Gedurende meer dan 20 jaar is circa 40 000 m^3 olie opgesloten geraakt in een groot aantal kleine holtes, verdeeld over de cavernes.

Vanaf 1993 (als proef met 2 cavernes) en 1995 (voor alle cavernes) is overgestapt op een andere manier van mijnbouw, waarbij de drukken in de cavernes verlaagd werden en (afgezien van de ontwikkeling van nieuwe cavernes) het gebruik van een oliedak is beëindigd. Door de drukdaling stroomden de zoutlagen (en dan met name de zuiverste magnesiumchloridelag bischofiet) richting de cavernes, waardoor deze in volume afnamen. Dit wordt ook wel caverneconvergentie of squeeze genoemd. Dit vertaalde zich in veel hogere productievolumes pekkel ten opzichte van de geïnjecteerde volumes water (van oorspronkelijk bijna 1:1 naar circa 2:1). Van 1995 tot 2018 is er met een wisselend bestand aan putten geïnjecteerd en geproduceerd, waarbij de cavernes op een gegeven moment verbinding met elkaar gingen maken, doordat een deel van de bischofiet tussen de cavernes was opgelost. Het met elkaar in verbinding staande stelsel cavernes (TR-1 t/m TR-8 en VE-4) bevatte begin 2018 circa 7,5 miljoen m^3 pekkel op basis van een massabalans. Circa de helft hiervan zal zich tussen onopgeloste blokken zout en neergeslagen zoutkristallen (precipitaat) bevinden (de zogenaamde gebonden pekkel) de rest zal zich in min of meer open ruimtes bevinden (de zogenaamde vrije pekkel).



Figuur 1: Positie van cavernes (casing schoen) geprojecteerd op een dieptekaart top Zechstein. Gebied binnen de getrokken lijn is een indicatie van het gebied waar het cavernecluster zich bevindt

De druk in de cavernes was in 1995-2007 gedaald met circa 70 bar tot 80 bar sublithostatisch (gebaseerd op put TR-7), zie appendix 3. In de periode 2009-2018 is de druk in het veld weer iets opgelopen naar 50 bar sublithostatisch. Naast het grote cluster bestaat het caverneveld ook nog uit een recentere put (TR-9) en drie oude putten (VE-1/2/3), die op dit moment geen hydraulische verbinding hebben met het grote cluster.



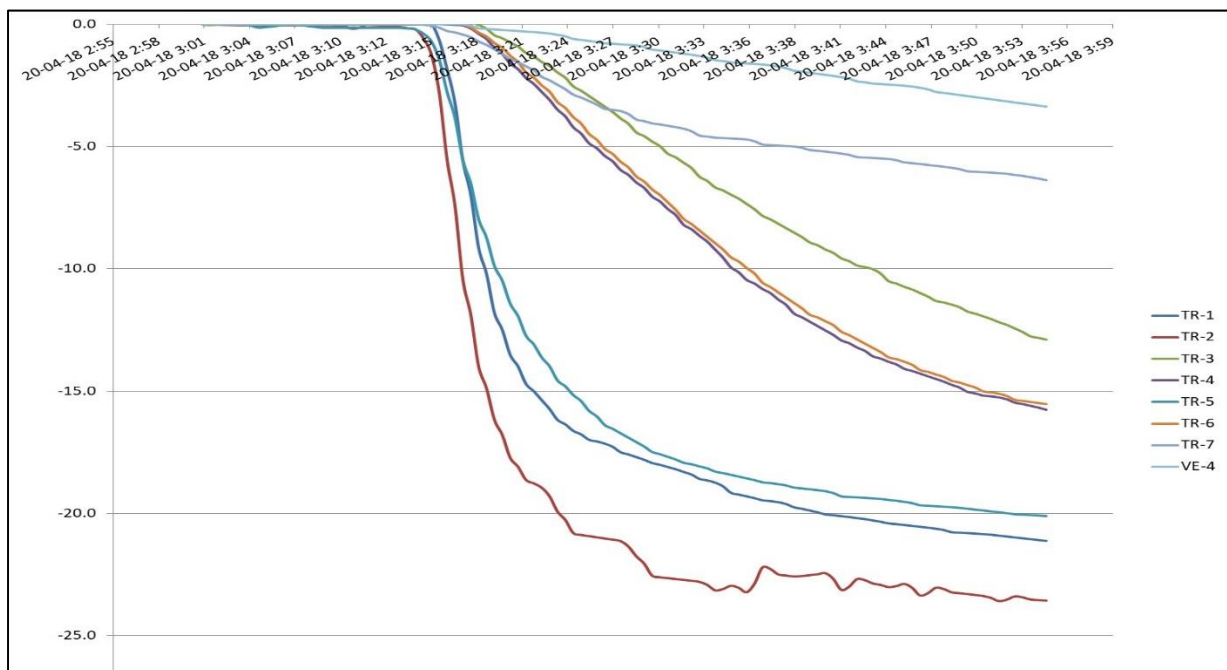
Figuur 2: Cartoon dwarsdoorsnede cavernes.

2 Incident

Op vrijdag 20 april 2018 om 03:12 in de nacht is er een snelle drukdaling gezien in het caverneveld van Nedmag in Veendam. Een cluster cavernes (TR-1 t/m TR-8 en VE-4), waarvan bekend is dat ze ondergronds (hydraulische) verbinding hebben, daalde snel in druk. De eerste 3 cavernes (TR-1-2-5) daalden 10 bar in druk binnen 3 minuten. De andere cavernes daalden ook in druk, maar langzamer, circa 10 bar in 30 minuten. Daarna daalde het hele cluster langzaam in druk met nog eens 20 bar tot een totale drukdaling van circa 30 bar in 2 dagen. In de periode van 22 april tot 25 mei is de druk in het caverneveld vrijwel constant, waarbij de druk weer met de productievolumes lijkt samen te hangen.

Er is geen andere verklaring gevonden voor de drukdaling dan een lekkage van pekkel uit het cluster. Het zout zelf heeft geen bergingsvolume (geen porositeit) en beneden de cavernes bevinden zich nog honderden meters zout (ZE-III-1a en de hele ZE-II formatie). De uitgestroomde pekkel is dus met een aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid via een lek gestroomd naar de formaties boven het zout. De vraag is hoe dat kon, hoeveel pekkel dat betrof en waar deze pekkel zich nu of in de toekomst zal bevinden. Een afgeleide vraag is of deze pekkel (en eventueel meegestroomde dakolie) een zoetwaterlaag kan bereiken, die gebruikt wordt (of kan worden) voor de winning van irrigatie- of drinkwater, of op natuurlijke wijze in de sloten kan terechtkomen. Deze memo richt zich op de eerste vraag: wat is de oorzaak van het incident.

In de onderstaande figuur worden de drukdalingen weergegeven in verloop van tijd, met intervallen van 3 minuten.



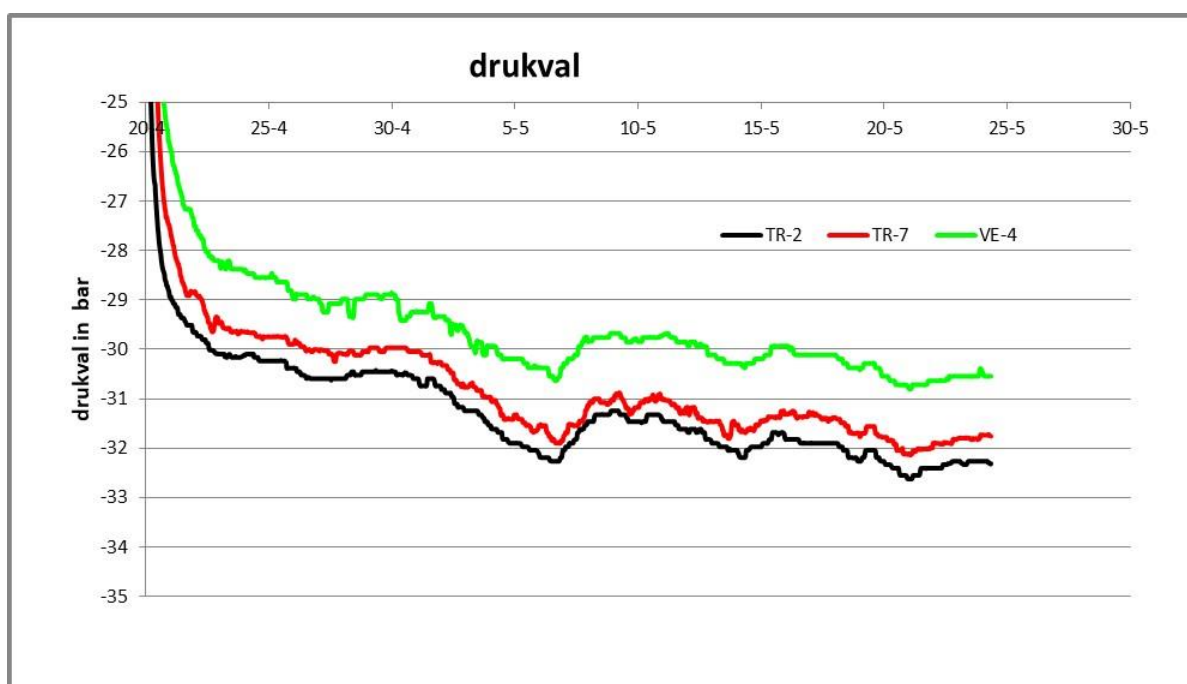
Figuur 3: Druk dalingen in bar op een 3 minutenschaal tot circa 45 minuten na de eerste druk dalingen. TR-2 daalt het snelst, op de voet gevolgd door TR-1 en TR-5. De verst gelegen putten TR-7 en VE-4 reageren het traagst op de druk daling.

De verschillen in initiële (30 minuten) drukdaling tussen de cavernes worden toegeschreven aan de hydraulische eigenschappen van de verbinding tussen de pekkelvolumes in de bischofietlagen (ZE-III-1b) onderling en de verbinding met pekkelvolumes in de carnallietlagen daarboven (de ZE-III-2b/3b). De verbinding tussen de meeste cavernes lijkt in de bischofietlaag (1b) te liggen, waar er slechts verbinding is met de 2b/3b lagen via de oorspronkelijke boorgaten in een tussenbank haliet (2a). Cavernes TR1-2-5 lijken ook in de 2b/3b verbinding te hebben, gezien de vrijwel

gelijktijdige drukdaling, danwel heeft een op het moment van het incident ontstane scheur in het zoutdak deze verbinding tot stand gebracht. De drukdaling begon vrijwel gelijktijdig in putten TR-1-2-5, waarbij er slechts een kleine vertraging van minder dan een minuut lijkt te zijn van putten TR-1-5 op TR-2. Het ligt dus voor de hand dat het incident gestart is in of rond het zoutdak van put TR-2. Het gezamenlijke pekervolume van de 2b/3b secties van putten TR-1-2-5 is circa 400.000 m³. De rest van het pekervolume van alle verbonden cavernes is circa 7.100.000 m³. Zie appendix 1 voor pekelen en olievolume.

Na de eerste uren van lekkage is de stromingsweerstand in het cavernesysteem dermate klein dat de drukafname in de cavernes vrijwel gelijk wordt. Na de eerste paar dagen is druk ongeveer constant (met een marge van 1 bar), waar productie- en injectie-hoeveelheden weinig verschil uitmaken. Daarna (vanaf begin mei) treedt er weer een duidelijke afhankelijkheid op van druk met de productievolumes.

In de weken na het incident is de druk initieel stabiel en daalt daarna langzaam, toe te schrijven aan de verhoogde afvoer van pekelen en de zeer sterk verminderde injectie van water. De periodes van lichte drukstijgingen zijn te verklaren door tijdelijk verminderde pekelpductie, met name door een verminderde vraag. Vanaf midden mei wordt een deel van de pekelen afgevoerd naar de Eems, via de Veenkoloniale Afvalwaterleiding, die ook gebruikt wordt voor de afvoer van restpekelen (met name CaCl₂) uit de productieprocessen van Nedmag aan de Billitonweg te Veendam.



Figuur 4: drukval t.o.v. 19-april in putten TR-2, TR-7 en VE-4 in de tijd. Beperkte drukschommelingen na 30-4 zijn grotendeels te correleren aan productieschommelingen en de stop van regen- en spoelwaterinjectie.

3 Uitgestroomde Pekelhoeveelheden

In de eerste 2 dagen van 30 bar drukdaling is er een hoeveelheid pekkel vrijgekomen die overeenkomt met de expansie van pekkel en met het inkomen van de zoutmassieven (caverneconvergentie). Gezien de korte tijd zal dit hoofdzakelijk elastische vervorming zijn. Deze waarden zijn gekalibreerd aan historische drukschommelingen (door bijvoorbeeld onderhoudstops of juist hoge pekkelverkoop).

In de jaren 2012 en 2017 zijn er meerdere grotere drukschommelingen opgetreden, geel gemarkeerd in de tabellen van appendix 2.

Deze drukschommelingen worden gecorreleerd aan de elastische stijfheid van het complex (pekkel en zout samen). Drukverhogingen en drukdalingen lijken niet anders te verhouden tot verminderde of verhoogde productie, anders dan via invoering van een correctie van de zoutkruip voor de gemiddelde caverne druk. Een redelijke benadering voor 2017 lijkt te zijn dat de kruipconvergentie per maand 23000 m³ bedraagt bij 67 bar onderdruk (het gemiddelde van de putwaarden), met een toename van 1000 m³/maand/bar drukverlaging. Voor 2012 was deze relatie ook te maken. De elastische component (de stijfheid van het systeem) blijkt ergens tussen de 1500 en 3200 m³ per bar te liggen (P10-P90). De onnauwkeurigheid is het gevolg van afrondingen van putdrukken in de rapportage op hele bar waarde, afhankelijkheid van putdrukken aan het oppervlakte van temperatuurschommelingen door productie of injectie, en door afschatting van de convergentie op basis van einddruk (i.p.v. gemiddelde druk). Conservatief (P60) wordt van 2500 m³ per bar uitgegaan als huidige stijfheid van het systeem.

Uitgaande van deze waarden, is de uitstroom te berekenen. Bij een drukdaling van 30 bar zal er dus $30 \times 2500 \text{ m}^3 = 75.000 \text{ m}^3$ zijn uitgestroomd in 2 dagen. Omdat de convergentie ook toenam, die in de eerste weken slechts beperkt naar de productieleidingen kan worden geproduceerd, wordt verwacht dat een additionele 25.000 m³ is afgelekt (P50) tot een totaal van circa 100.000 m³.

Uit een volume- en systeemstijfheidsberekening, wordt (per eind juli) het steeds waarschijnlijker dat de cluster zich sinds medio mei weer lijkt te gedragen volgens de historische gegevens, waarbij het weglekken van pekkel grotendeels (of geheel) tot stilstand gekomen is. Dit wordt verklaard doordat de pekeldruk in de caverne lager is geworden dan de minimum zoutspanning, waardoor de scheur weer (geheel of grotendeels) sluit. Testen ter bevestiging van deze conclusie hebben plaatsgevonden midden juli. Bodemdalingsmetingen (GPS en INSAR) kunnen deze analyse in de komende maanden hopelijk ondersteunen.

De heropeningsdruk ligt vermoedelijk dicht boven de sluitdruk, waardoor de sluitdruk als maatgevend wordt genomen. Lekkage daarna volgt uit een separate analyse, maar de aflekvolumes na de eerste dagen zijn vermoedelijk gering en ergens tussen gemiddeld 0 en 10 m³/h over de periode mei tot midden juli, en dermate klein dat de onzekerheid in de komende maanden niet heel veel kleiner zal worden.

4 Lekpad

Er konden slechts 3 denkbare lekpaden worden geïdentificeerd, onder aanname dat zout zelf geen of nauwelijks opslagcapaciteit heeft voor pekels door de afwezigheid van porositeit en de relatief hoge stijfheid. Beneden de cavernes bevinden zich ook nog honderden meters zout (Zechstein II met name).

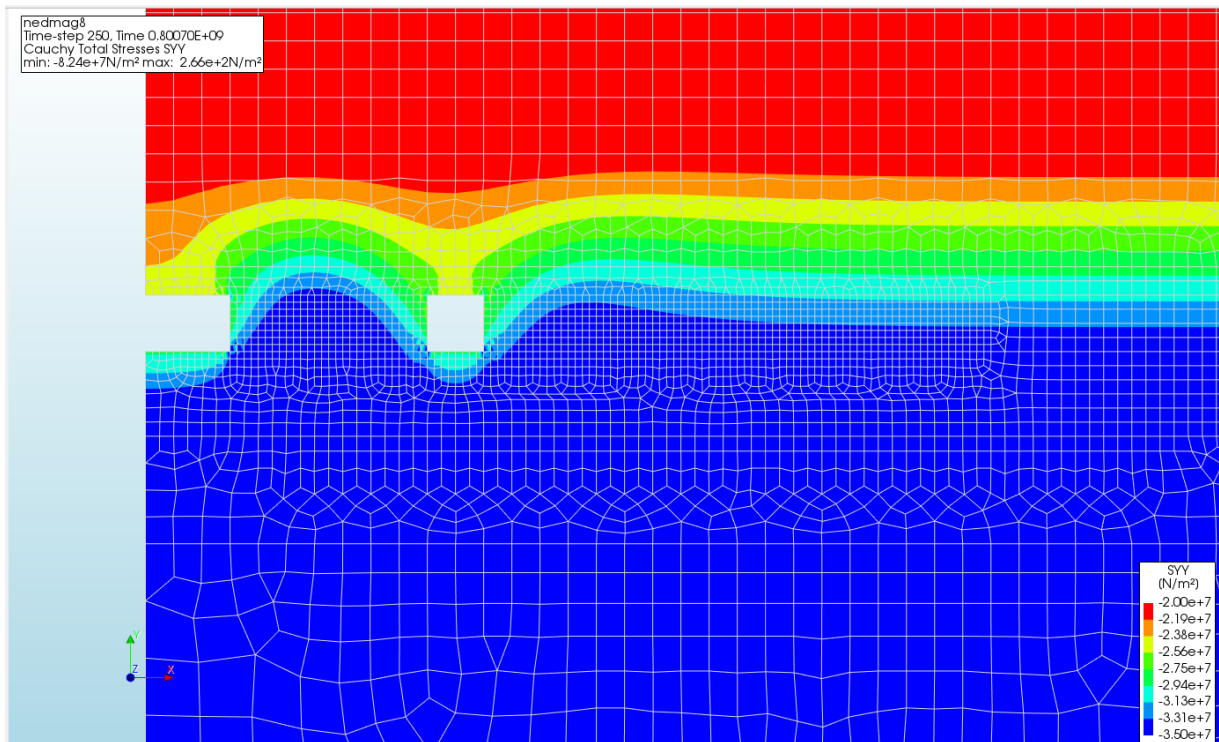
- Een afgeknapte casing van TR-1,2 of 5, die lekkage naar de formaties boven het zout mogelijk maakt
- Roof fall uit het zoutdak (boven een 2b/3b caverne van TR-1-2-5), waardoor de pekels rechtstreeks in contact komt met de bovenliggende lagen en uitstroming door permeabiliteit of een formatie-scheur plaatsvindt, te beginnen bij de ca. 340 meter dikke Bunter laag.
- Een scheur in het zoutdak, die de 2b/3b caverne van TR-1-2-5 in contact brengt met de bovenliggende lagen.

De mogelijkheid van een gebroken casing lijkt na onderzoek op TR-1-2-5 zo goed als uitgesloten als oorzaak van de drukdaling. Put TR-2 heeft geen verbuiging meer in de casing en kon met een camera geïnspecteerd, in samenhang met cement bond logs en wanddiktemeting. Putten TR-1 en 5 zijn met GR-CCL-temperature logs gerund via de tubing. Ze tonen geen gebreken aan of indicaties van pekelsstroming. Het initiële aflekvolume van pekels kan ook niet door een 10 3/4" casing stromen, aannemende dat op zijn minst 50 meter overbrugd moet worden en de drukval niet hoger is dan 100 bar. De eerste 30 minuten is er met 10 bar drukdaling op het cluster 10 maal $2500 \text{ m}^3 = 25000 \text{ m}^3$ weggestroomd, overeenkomend met een gemiddeld debiet van $50000 \text{ m}^3/\text{uur}$. Een 10 3/4" casing sectie van 50 m met 100 bar drukval kan niet meer dan $10000 \text{ m}^3/\text{uur}$ verwerken, waardoor uitstroming door een gebroken TR-2 casing uitgesloten lijkt. Bij TR-1 en TR-5 zitten er bovendien nog tubings in de casing die stroming hinderen, dus zelfs alle drie casings samen zouden niet het debiet kunnen verklaren.

De mogelijkheid van roof fall uit het zoutdak is niet uit te sluiten, maar de verwachting is dat in dat geval casings beschadigd of verbogen zouden zijn. Ook zou het dan in de verwachting gelegen hebben dat dit al eerder gebeurd zou zijn, toen de cavernedruk lager was dan nu, gezien er in de laatste decennia niet meer actief geloofd is in de 2b/3b sectie. Wel is het zoutdak rond TR-2 en wellicht ook TR-5 in het verleden enigszins aangetast door denkbare waterlekages in tubings boven de carnallietlagen of een beperkte dak-instabiliteit rond anhydriet of sylvietlagen, die de overgang vormen tussen de ZE-III-4a en ZE-IV. Er lijkt de laatste jaren echter (ook na de drukval) niets veranderd, zoals volgt uit putmetingen die apart zijn beschreven in een andere notitie.

Het ontstaan van een scheur in het zoutdak (en daarboven) lijkt op dit moment de meest voor de hand liggende aanname, om de drukverliezen te verklaren. Er is lang vanuit gegaan dat de spanning in het zoutdak isotroop en lithostatisch zou blijven, en het dak niet zou scheuren alvorens de lithostatische spanning werd bereikt, wat waarschijnlijk ook een redelijke aanname is voor geïsoleerde cavernes van beperkte diameter. Het door Nedmag gehanteerde maximum drukregime van 90% van de berekende lithostatische spanning is hierop gebaseerd.

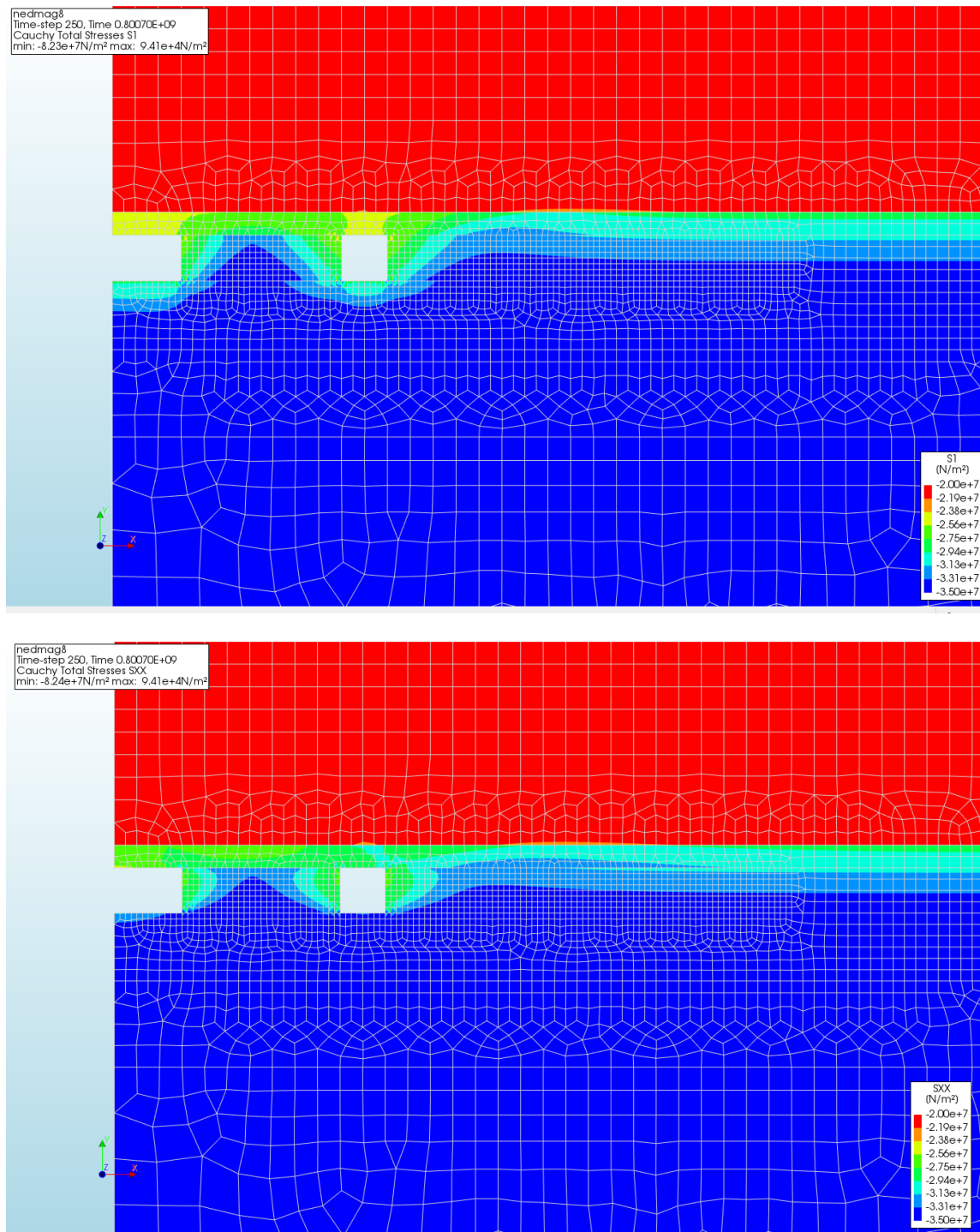
Door de langdurige onderdruk in het caverneveld treedt bodemdaling op (circa 40 cm per 2018), maar ook spanningsboogwerking (arching). De verticale spanning (en daarmee de horizontale spanning) in het zoutdak in het midden van de cluster neemt af in de tijd. Een inschatting is gemaakt met een numeriek axi-symmetrisch model. Bij circa 40 cm bodemdaling en realistische pekeldrukken en gesteentestijfheden, daalt de verticale spanning met circa 50 bar ($0.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$), zie figuur 5.



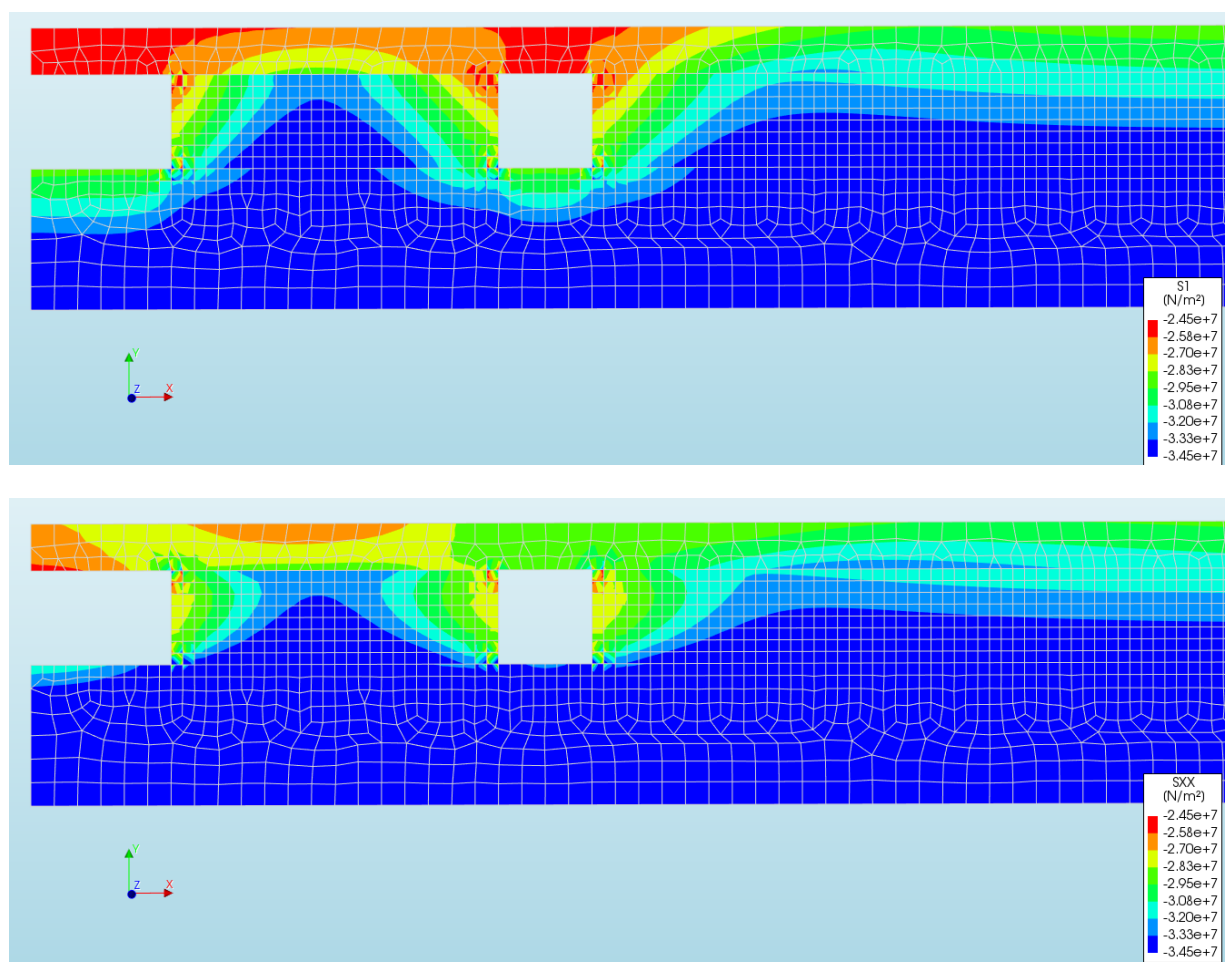
Figuur 5: verticale spanningen rond het zoutdak door 25 jaar zoutkruip en bodemdaling. De kleurenschaal loopt van 200-350 bar ($2\text{-}3.5\text{e}7 \text{ N/m}^2$). De afname rond de centrale caverne is circa 50 bar.

Ook de horizontale en minimale spanningen in het zoutdak zijn met een vergelijkbare hoeveelheid gedaald, zie figuur 6 en 7. Figuur 7 is een op het zout ingezoomde versie van figuur 6.

Naast een elastische herverdeling zal het zoutdak initieel spanningen opnemen die door het verlagen van de pekeldruk worden veroorzaakt. Deze spanningen kunnen echter door een zeer geringe hoeveelheid kruip relaxeren en overgenomen worden door de overburden (Bunter). Beide effecten zijn in de berekening meegenomen.



Figuur 6a/b: minimale (boven) en horizontale (radiale) spanningen rond het zoutdak door 25 jaar zoutkruip en bodemdaling. De kleurenschaal loopt van 200 tot 350 bar ($2\text{-}3.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$). De afname in horizontale spanning boven de centrale caveerne is circa 50 bar. De minimum spanning in het zout boven de cavernes is de verticale spanning en vrijwel gelijk aan de pekeldruk.

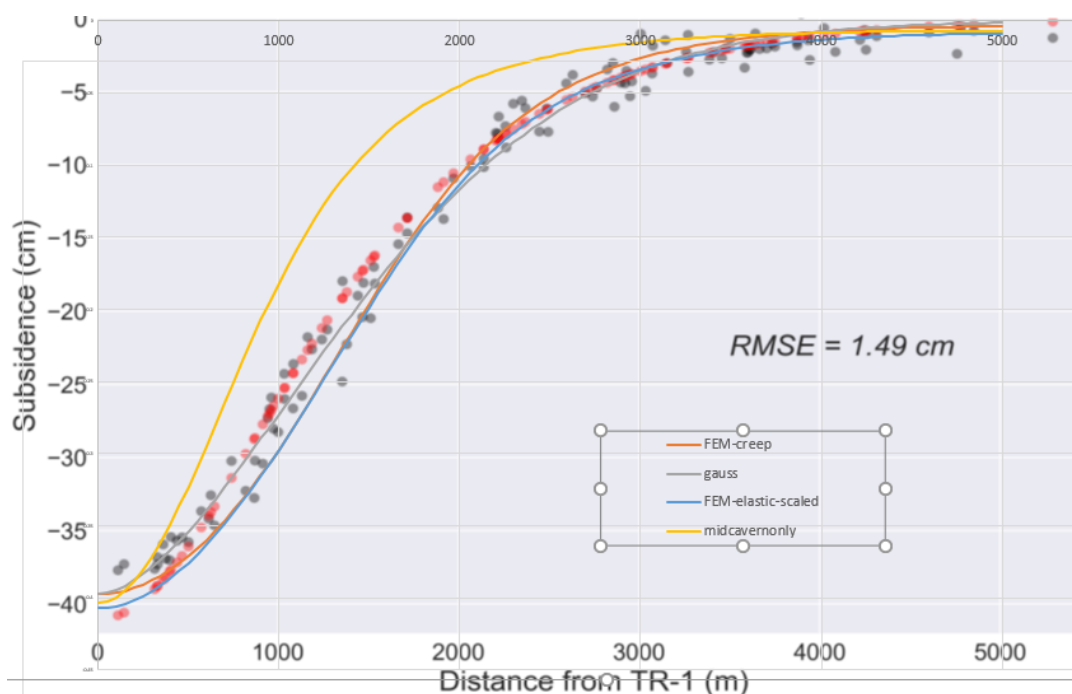


Figuur 7 a/b: minimale (boven) en horizontale (beneden) spanning in het zout door 25 jaar zoutkruip en bodemdaling. De kleurenschaal loopt van 245 tot 345 bar ($2.5\text{--}3.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$). De afname in horizontale spanningen boven de centrale caverne is circa 50 bar.

De gesteenteparameters en de grootte (wijde) van de cavernes zijn gekijkt met de bodemdalingkom. De komvorm, zoals bepaald door SGS-Horizon met een Geertsma- Van Opstal analyse, met als middelpunt cavernen TR-1, is weergegeven in Figuur 8 als rode stippen en vergeleken met de meetpunten (grijze stippen). Hierop gesuperponeerd zijn de berekende kommen volgens het eindige elementen model van de cluster (rode lijn met inbegrip van kruip; blauwe lijn voor een elastische benadering). Alle berekende kommen zijn genormaliseerd op 40 cm bodemdaling voor het beste (visuele) vergelijk. Te zien is dat naast de toegepaste Geertsma- Van Opstal (met ge-fitte parameters) ook de Eindige Elementen oplossingen of een Gaussian curve een vergelijkbaar goede fit geeft. De Gauss fit kan geschreven worden als

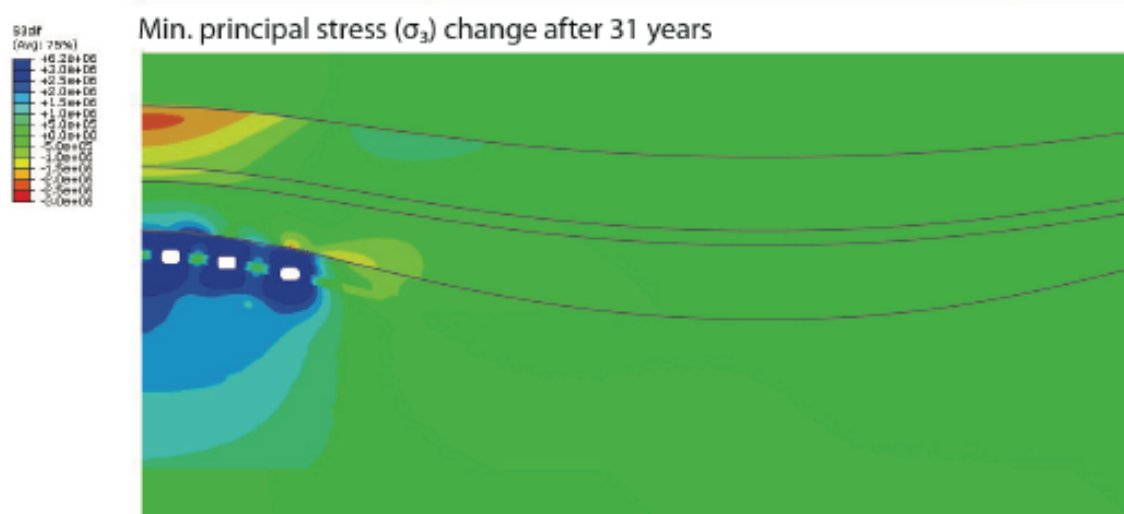
$$w_r = w_0 \exp(-\chi r^n)$$

Waar w_r de bodemdaling op radius r (beide in meters), w_0 de maximum daling op radius 0, en χ en n fitting parameters. Voor de brede kom (gecombineerd effect van alle cavernes of de gemodelleerde centrale en ringcaverne) zijn de fit parameters zijn $\chi=3\text{e-}6$ en $n=1.7$.



Figuur 8: Op een maximum van 40 cm geschaalde bodemdalingskom uit Eindige elementen (met kruip: rode lijn; zonder kruip: blauwe lijn), uit een Gaussische fit (grijze lijn), geplot op een Geertsma-Van-Opstal fit (rode bolletjes) en meetwaarden (grijze bolletjes) geplot op hun afstand (straal) r tot (ondergrondse locatie) TR-1. De gele lijn is niet gerelateerd aan deze memo

Eerdere studies, zoals recent door Raith & Urai (2016) laten eenzelfde beeld zien. In figuur 9 worden de spanningsveranderingen van de minimum principal stress getoond, maar hier voor een 2D plane strain benadering (cavernes als oneindig lange tunnels). De verlagingen van de minimum spanning in het halietsdak bedragen in deze studie circa 60 bar. Deze studie was gericht op het mogelijk belasten van breuken (faults) en niet op de gevolgen van drukverhoging op scheurvorming, waardoor er geen conclusies zijn getrokken betreffende de maximum pekeldruk.



Figuur 9: Verandering in de min principal stress in Pa voor een plain strain benadering door Raith. De spanningsveranderingen in het zout bedragen tot 60 bar ($6 \cdot 10^6$ Pa). Het plusteken wordt veroorzaakt doordat in Abaqus drukspanningen negatief zijn en minder negatief worden (dus lager in absolute waarde)

Indien de druk in de caveerne langzaam oploopt (Appendix 3), zal de horizontale spanning in het zoutdak iets terugveren door een elastische respons, maar de spanning zal permanent (behalve op geologische tijdsschaal wellicht) verlaagd zijn, waardoor het mogelijk wordt om bij pekeldrukken beneden de lithostatische druk het zout te scheuren. Dit effect is in het verleden onvoldoende erkend, ook vanuit de internationale Solution Mining Community. Daar moet worden bij gezegd dat de situatie van Nedmag nogal afwijkt van de situatie van cavernes in (slechts) haliet, zoals het geval in 99% van het aantal cavernes wereldwijd.

Indien de druk in een scheur daalt onder de minimum spanning, heeft deze de neiging weer te sluiten, waardoor de doorlatendheid sterk afneemt of zelfs vrijwel verwaarloosbaar wordt. Om die reden worden in de olie en gaswereld scheuren vaak voorzien van doorlatend vulmateriaal (proppant) om sluiten tegen te gaan. De kans dat er hard materiaal in de scheur is gekomen is niet groot. Er kan wat gips zijn meegestroomd vanuit de gipsinjectie, maar dat is relatief zacht zolang gips geen anhydrietkristallen vormt. Anhydriet is dermate zwaar dat kristallen niet snel zullen opwarrelen door een pekelfstroming in een (grote) caveerne. Daarnaast kunnen nauwe scheuren met geringe pekelsnelheid mogelijk weer door kristallisatie van zout (door afkoeling of menging van carnalliet en bischofiet-pekelf) verstopt raken. Als de pekeldruk weer boven de minimum spanning in het zout komt zal ofwel de oude scheur heropenen ofwel een nieuwe scheur gecreëerd worden. Dit dient in de toekomst dan ook voorkomen te worden, in het bijzonder zolang het caveercluster nog een groot volume heeft.

Voor zowel huidige als voor toekomstige nieuwe (clusters van) cavernes, zal een nadere studie worden verricht naar de te hanteren pekeldrukken om scheurvorming te voorkomen. Ook zal gekeken worden naar de consequenties, indien desondanks pekelfstroming a.g.v. scheurvorming niet voorkomen kan worden (zoals na een veld abandonment, waarbij een zeker restant pekelf noodzakelijkerwijs moet worden ingesloten). Dit zal o.a. deel uitmaken van een nieuw winningsplan.

Referenties

Raith A., Urai, J. (dec 2016): Squeeze mining-induced stress changes in the faulted overburden of the Veendam salt pillow.

Appendix 1. Pekelvolumes in tijd en diepte

De pekelvolumes in de 1b en (gecombineerde) 2b/3b lagen zijn geschat uit de injectie en productiegegevens waar met name de convergentievolumes (als verhouding) met beperkte nauwkeurigheid bekend zijn. Aangenomen wordt dat 5% van de convergentie in de 2b/3b plaatsvindt doordat carnalliet minder makkelijk kruipt dan bischofiet. In 1982 is de productie vanuit WHC-2 (TR-putten) aangevangen. In 1993 is aangevangen met een lage-druk operatie.

	cluster	cluster	cluster	rest	rest	rest	
	1b	2b3b	total	1b	2b3b	total	total
jaar	cum	cum	cum	cum	cum	cum	cum
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2
1987	0.9	0.1	0.9	0.1	0.2	0.3	1.3
1992	1.3	0.8	2.2	0.3	0.2	0.5	2.6
1997	1.4	1.1	2.5	0.4	0.5	0.9	3.3
2002	1.6	1.7	3.3	0.2	0.5	0.7	4.0
2007	2.5	2.2	4.7	0.2	0.5	0.7	5.4
2012	3.4	2.2	5.6	0.5	0.5	1.0	6.6
2017	4.5	2.2	6.7	1.3	0.5	1.7	8.5
2018	5.3	2.2	7.5	1.3	0.5	1.8	9.2

Tabel A1: pekelvolumes in de ondergrond, uitgesplitst naar de verbonden cluster en de rest (TR-9 en VE-1-2-3) en per locatie (1b of 2b/3b) per jaar in miljoen m³.

De hoeveelheden dakolie zijn gebaseerd op de historische maandrapporten. De dakolie is toegewezen aan de formatie waar het oliedak zich bevond. Putten TR-7/8/9 zijn niet ontwikkeld in de 2b/3b sectie en VE-3 en VE-4 nauwelijks.

	1b max	2b/3b min	Totaal
	m ³	m ³	m ³
TR-1	2,519	1,360	3,879
TR-2	1,250	2,187	3,437
TR-3	1,273	2,483	3,756
TR-4	3,075	1,721	4,796
TR-5	4,500	747	5,247
TR-6	4,566	2,062	6,628
TR-7	2,400	0	2,400
TR-8	2,584	0	2,584
TR-9	1,077	0	1,077
VE-1	0	2,944	2,944
VE-2	1,851	867	2,718
VE-3	1,311	0	1,311
VE-4	282	0	282
Totaal	26,689	14,371	41,060

Well	2b+ 3b	2b	3b
	m ³	m ³	m ³
TR-1	1,360	1,205	155
TR-2	2,187	1,810	377
TR-5	747	747	0
Totaal	4,294	3,762	532

Tabel A2: Achtergebleven olievolumes en verdeling per put, zoals volgt uit de injectie en retourbalansen van 1972 tot 2018. Voor de putten TR-1, TR-2, TR5 is nog een onderverdeling gemaakt per 2b/3b formatie.

Appendix 2. Elastische respons cavernecomplex (TR-1-8 en VE-4)

Drukverhogingen en drukdalingen lijken zich niet anders te verhouden tot verminderde of verhoogde productie, anders dan via invoering van een correctie op de zoutkruip op de gemiddelde cavernedruk. Een redelijke benadering voor 2017 lijkt te zijn dat de kruipconvergentie per maand 23000 m³ bedraagt bij 67 bar onderdruk (het gemiddelde van de putwaarden), met een toename van 1000 m³/maand/bar drukverlaging. Voor 2012 was deze relatie ook te maken. Bij benadering is de convergentie is het verschil tussen productie en waterinjectie (met kleine aanpassingen voor effecten van oplossing van bischofiet). Bij gelijkblijvende drukken is dit ook de kruip-convergentie. Met een drukcorrectie wordt de kolom "kruip" berekend als zijnde de afwijking van de baseline bij 67 bar onderdruk. Het verschil is dan de elastische component die gedeeld wordt door het drukverschil met de vorige maand. Die elastische component lijkt ergens tussen de 1500 en 3200 m³ per bar te liggen. De afwijkingen zijn het gevolg van afrondingen en momentopnamen voor een situatie die niet bedoeld was cavernestijfheden te meten. Iets conservatief zal van 2500 m³ per bar worden uitgegaan.

2017	base at 67	23000	m3/mnd	1000	m3/mnd/bar	
converg.	dp	elastic	p_av	kruip	elastisch	
m3/mnd	bar	m3/bar	bar	m3/mnd	m3/mnd	maand
32752			68	24669	8083	jan
37544	-3.57	-2603.76	72	28242	9302	feb
42890	-0.99	-13757	73	29235	13655	mrt
18012	0.56	-19202.3	72	28679	-10667	apr
4176	5.68	-3314.63	67	23000	-18824	mei
20790	0.50	-3389.31	66	22496	-1707	jun
29148	-2.85	-1330.33	69	25351	3797	jul
9752	1.48	-9516.91	67	23867	-14116	aug
16768	2.05	-2466.91	65	21820	-5052	sep
16777	1.06	-3759.01	64	20760	-3983	okt
16357	1.56	-1822.78	63	19200	-2843	nov
14875	-1.69	3563.998	64	20887	-6012	dec

Tabel A3: Massabalans 2017 per maand. De kolom "converg." geeft de hoeveelheid zoutverplaatsing (elastisch en kruip), grofweg het verschil tussen productie en injectievolume. De dp is de drukstijging per maand, de p_av de gemiddelde onderdruk in het cavernecomplex. De kruip is de hoeveelheid kruip (23000 plus een drukcorrectie van 1000 m³/maand/bar) en de elastische respons is het verschil tussen de convergentie en de kruip in m³/bar. Kleine drukverschillen (<2 bar) geven grote fouten door systeemruis en afrondingen van drukken.

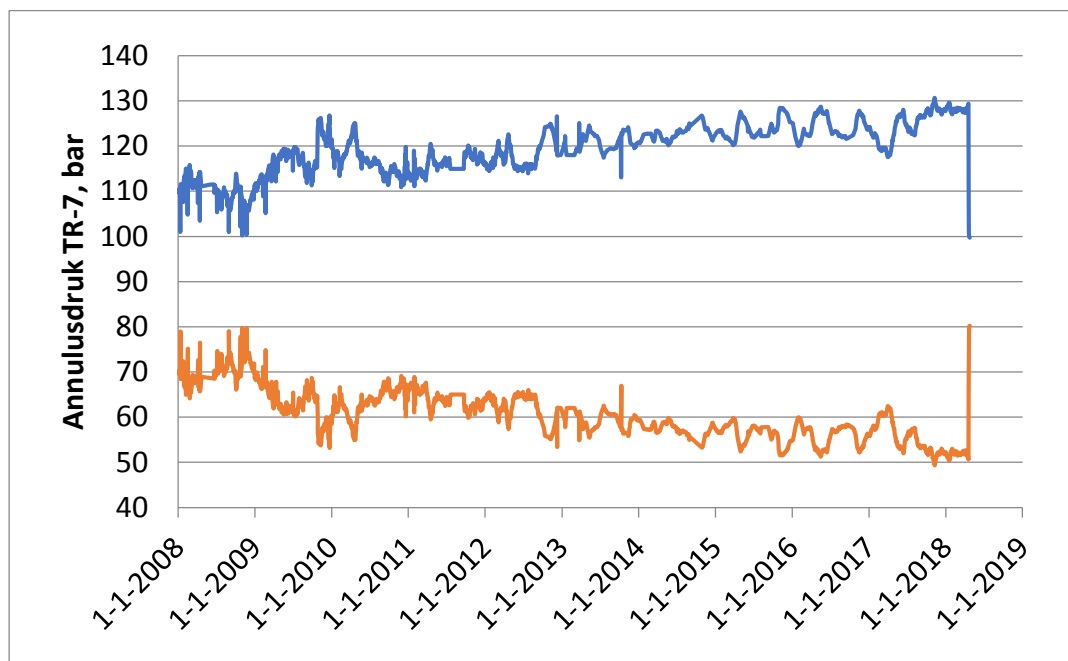
Het jaar 2012 geeft een vergelijkbaar beeld, waar alleen het kruipaandeel hoger is door een 7 bar drukverschil tussen de base-maand (mei). Dit bevestigt de aanname van de extra kruip 1000 m³/maand/bar drukdaling als redelijk, hoewel het ondergronds volume in 2012 iets kleiner was. Bij een 30 bar drukdaling kunnen er natuurlijk iets sterkere niet-lineaire afwijkingen plaatsvinden.

2012	base at 74	28000	m3/mnd	1000	m3/mnd/bar	
squeeze	dp	elastic	p_av	kruip	elastisch	
m3/mnd	bar	m3/bar	bar	m3/mnd	m3/mnd/bar	maand
30617			73	26857	3760	jan
17385	0.39	-23287	72	26467	-9082	feb
27834	-0.39	-2504	73	26857	977	mrt
15833	3.29	-2355	69	23571	-7739	apr
38980	-4.43	-2479	74	28000	10980	mei
28750	0.14	6252	74	27857	893	jun
29336	0.57	3588	73	27286	2050	jul
26817	-0.14	4279	73	27429	-611	aug
11274	3.82	-3231	70	23610	-12336	sep
6757	3.98	-3235	66	19630	-12873	okt
21501	-0.51	-2648	66	20143	1358	nov
30892	-3.27	-2292	69	23408	7484	dec

Tabel A4: Massabalans 2012 per maand.

Appendix 3. Drukverloop caverneveld vanaf 2008 (basis TR-7)

De pekeldruk in het cluster is gedaald vanaf 1995, met een productie van ca. tweemaal de injectievolumes. Vanaf medio 2009 is als gevolg van de operationele situatie de caverneveld langzaam opgelopen. De druk van TR-7 is geplot in onderstaand diagram, waar in blauw de annulusdruk is weergegeven en in oranje de (hieruit afgeleide) onderdruk. De onderdruk beneden lithostatisch was vlak voor de pekellekkage circa 50 bar (referentie TR-7).



Figuur A5: Casingdruk in blauw, en druk beneden lithostatisch in oranje over de periode 2008-2019. De laatste piek is de drukdaling door de lekkage.

Appendix 4 Material Parameters salt and overburden

Halite ZE-III:	$A1 = 1 \cdot 10^{-16} \text{ s}^{-1}$	$n=4$	(creep strain 0,0002% per year at 5 MPa differential)
Halite ZE-II	$A1 = 1 \cdot 10^{-14} \text{ s}^{-1}$	$n=4$	(creep strain 0,02% per year at 5 MPa differential)
Mg-salts-mix	$A1 = 6 \cdot 10^{-13} \text{ s}^{-1}$	$n=2$	(creep strain 0,05% per year at 5 MPa differential)
Halite ZE-III:	$E=20 \text{ GPa}$	$\nu=0.3$	
Halite ZE-II	$E=10 \text{ GPa}$	$\nu=0.3$	
Mg-salts-mix	$E= 3 \text{ GPa}$	$\nu=0.3$	
Bunter	$E=12 \text{ GPa}$	$\nu=0.3$	
Vlieland/Chalk	$E= 5 \text{ GPa}$	$\nu =0.3$	
North Sea	$E= 1 \text{ GPa}$	$\nu =0.4$	