

Doel: Beheersen van pekeldruk in cavernes, de pekelvolumes en de bodemdaling

Autorisatie: Mining Director

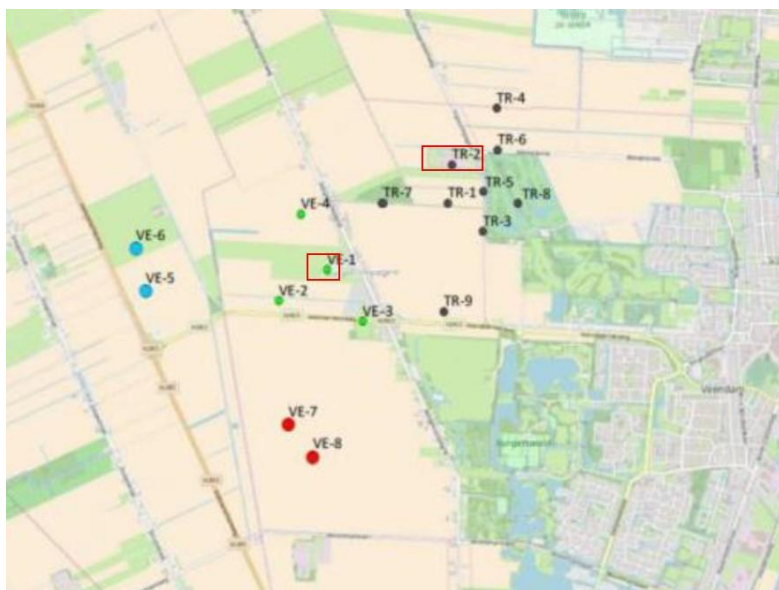
Dit document dient 4 doelen:

- Het is een werkprocedure voor Mining (M-15) ten behoeve van drukbeheersing en rapportage
- Het is vanaf 2022 een kwartaalrapportage aan Staatstoezicht op de Mijnen voor druk en volumebeheersing en rapportage bodemdaling (verzending per e-mail)
- Het is vanaf 2022 een kwartaalrapportage voor belanghebbenden en geïnteresseerden. Dit document wordt ieder kwartaal op de website Nedmag.nl geplaatst, waarbij oude versies tot 2 jaar lang blijven bestaan.
- Vanaf eind 2022 zal het ook de gebruiken en voorraden van dakolie (Surdyne) rapporteren.

De schuingedrukte tekst is met name achtergrondinformatie voor de zelfstandige leesbaarheid. De normale tekst bevat werkinstructies, rapportages en informatie over gestelde limieten.

Samenvatting

(i) Ten behoeve van het voorkomen van lekkages van een caveerne via het zoutdak (ii) ter voorkoming van te grote ondergrondse pekelvolumes en (iii) voor de voorspelling en verificatie van bodemdaling, stelt Nedmag randvoorwaarden aan de winning, die deels direct voorkomen uit het winningsplan 2018 (en voorschriften in de goedkeuring hiervan) en deels een uitwerking daarvan zijn. De beheersing van de integriteit van de verbuizing en wellhead worden beschreven in M-14, het WIMS (Well Integrity Management System). Dit protocol (M-15) is per medio 2022 (ook) een publieks-document en kan door derden worden ingezien via het publieke deel van de website van Nedmag. Dit meet & regelprotocol beschrijft de beheersing van de drukken en volumes in de bestaande bronnen en cavernes (TR-1 t/m TR-9 en VE-1 t/m VE-4). Zodra de nieuwe putten VE-5 en VE-6 zijn geboord (en de eerste meetgegevens verwerkt zijn qua zoutsamenstelling) wordt een update ingediend bij het SodM over de beheersing van drukken en volumes in deze putten, alsmede de registratie van dakolie (Surdyne of een minstens gelijkwaardig alternatief).



Figuur S.1: positie casingschoenen bestaande putten (TR-1 t/m TR-9 en VE-1 t/m VE-4) en verwachte positie van nog te boren putten (VE-5 t/m VE-8). Boorlocaties WHC-1 (VE-putten) en WHC-2 (TR-putten) in rood kader. VE-5 en VE-6 worden in 2022 geboord. VE-7 en VE-8 naar verwachting enkele jaren later.

De initiële maximale cavernedruk is een functie van de initiële zoutspanning in het cavernedak, ten tijde van de boring bepaald via een Leak-Off Test (LOT) bij de casing schoen van de Last Cemented Casing (een 10¾" of 9¾" casing) of via een standaard dichtheid, gebaseerd op eerdere LOT's. Voor de bestaande cavernes (en dieptes) is een gesteentedichtheid van 2150-2250 kg/m³ afgeleid, waar de ondergrens aangehouden wordt om een (conservatief lage) spanning te berekenen op basis van de diepte (True Vertical Depth) van de casingschoen. Alleen als een LOT lager uitvalt wordt deze aangehouden. De maximum cavernedruk op casingschoenniveau is initieel (tijdens de eerste loof fase) 90% van de gesteentespanning (op basis van dichtheid of LOT). Omdat langdurige zoutwinning de spanningen in het zout kan verminderen (door boogwerking "arching" van gesteentes boven het zout) moet de maximale cavernedruk constant blijven of dalen in de tijd. Vanaf een totaal pekervolume van 450.000 m³, gebaseerd op een massabalans, mag de cavernedruk niet hoger worden dan 15 bar boven het laagste jaargemiddelde van alle voorgaande jaren. Daarboven kan niet worden uitgesloten dat er zich een scheur vormt in het zoutdak, waardoor pekkel kan ontsnappen naar de doorlatende lagen boven het zout. Voor de in 2021 bestaande en te opereren cavernes (TR-1 t/m TR-9 en VE-3 t/m VE-4) is de maximum druk gebaseerd op historische drukken. Hoofdstuk 1 behandelt de maximale cavernedrukken.

Vanwege risicobeheersing en bodemdalings-potentieel is er ook een maximum volume vrije pekkel vastgelegd voor iedere caveerne of groep cavernes. Dit is de hoeveelheid pekkel, die naar verwachting door zoutkruip en caverneverkleining gewonnen kan worden (eenwelk gepaard gaat met bodemdaling). Een deel van de cavernepekkel zal echter nooit (in een tijdsbestek van tientallen jaren) gewonnen kunnen worden door zoutkruip, omdat de pekkel zit ingesloten in de poriën van bezinksel (onopgeloste delen steenzout, sylviet, kieseriet, anhydriet en carnalliet of uitgekristalliseerd zout). Dit deel wordt gebonden pekkel genoemd. Het naar verwachting door zoutkruip te winnen deel wordt vrije pekkel genoemd. Het deel gebonden pekkel neemt toe met actieve logging (en de vorming van precipitaat) en wordt verondersteld eeuwig opgesloten te blijven, terwijl het deel vrije pekkel toeneemt door logging en afneemt door zoutkruip (squeeze). Deze harde opsplitsing in een vrij en gebonden deel is voor het cluster van cavernes (TR-1 t/m TR-8 en VE-4) een goede aanname, waar de hoeveelheid gebonden pekkel in de 1b laag praktijkondervindelijk bepaald is (op circa 25% van het opgeloste zout cq gecreëerde holruimte). Voor cavernes TR-9, VE-3 en de nog te boren cavernes zal dit een schatting blijven totdat de totale hoeveelheid kruip (squeeze) in dezelfde orde van grootte komt als de gewonnen pekkel. Dit wordt behandeld in hoofdstukken 2 en 3.

Hoofdstuk 4 beschrijft de meting en rapportage van bodemdaling, als gevolg van zoutkruip (squeeze). Hoofdstuk 5 beschrijft de boekhouding van dakolie en wordt pas ingevuld na boring van VE-5/6, wanneer dit relevant wordt.

Hoofdstuk 6 beschrijft de rapportage en frequentie daarvan van bovenstaande zaken, alsmede het actualiseren van dit document.

Afkorting en begrippen

Annulus	Een ringvormige ruimte tussen 2 casings/tubings
Cavernedak	De eerste vloeistofdichte zout-formatie die zich boven een caveerne bevindt. Voor cavernes in de Zechstein ZE-III-2b/3b formatie, betreft het de lagen haliet (NaCl) van de Zechstein ZE-III-4 en ZE-IV formaties. Voor cavernes in alleen de ZE-III-1b formatie betreft het de ZE-III-2a t/m ZE-IV formaties.
Casing	Een deel van de winningsput dat vastzit in de aarde. Meerdere concentrische casings, van buiten naar binnen steeds dieper stekend, vormen samen de verbuizing van een winningsput
Casingschoen	onderkant van een gecementeerde casing, met een bekende diepte onder maaiveld (casing head housing). De last cemented casing is de casing tot in het zoutdak (een $9\frac{5}{8}$ " of $10\frac{3}{4}$ ")
Caverne	Met pek en vaste stof gevulde ruimte in de Zechstein ZE-III formatie
Dakolie	Mijnbouwhulpstof die gebruikt wordt om een caverne zich zijwaarts te laten ontwikkelen i.p.v. alleen maar verticaal omhoog. In het verleden diesel, in de toekomst een alternatief dat veiliger is voor mens en milieu, bijv. Surdyne.
Last cemented casing	Zie casingschoen
Meet- en Regelprotocol	Het protocol zoals voorgeschreven door het bevoegd gezag in artikel 10 in het instemmingsbesluit gewijzigd winningsplan 2018 Nedmag
Overburden	De formaties die zich boven het zout bevinden
Well	Engelse benaming voor winningsput
Wellhead	De onderdelen van een winningsput waarin de last cemented casing en de tubings zijn afgehangen
Wellheadcenter-WHC	Locatie van Nedmag waar zich meerdere wellheads bevinden (WHC-1 en -2)
Wellhead pressure	De druk in de wellhead van een vloeistofgepulde ruimte van een winningsput. Wordt ook wel aangeduid met de afkorting WHP
WIMS	Well integrity management system. Beschreven in M14

1. Beheersing cavedrukken bestaande cavernes (putten geboord in 1972-2011)

1.1. Cavernedrukken cluster (TR-1 t/m TR-8 en VE-4)

Putten TR-1 t/m TR-8 (geboord vanaf WHC2) en put VE-4 (geboord vanaf WHC1) hebben een gezamenlijke caverne, waardoor de putdrukken elkaar volgen. Put TR-5 is van een cementplug voorzien en kan niet meer gemonitord worden. De druk van het cluster wordt momenteel gestuurd (en gemonitord) op put TR-2. TR-2 bezit geen productieverbuizing meer en wordt alleen voor monitoring gebruikt. Put TR-6 wordt als back-up gebruikt indien de drukmeting in TR-2 verstoord zou zijn om wat voor reden dan ook.

Het cluster wordt sinds Q3 2018 op constante druk gehouden, waarbij de druk mogelijk in Q3 2022 wordt verlaagd als de uitstroomvolumes door caverneconvergentie te laag worden. Nedmag heeft als beleid dat de druk in het cluster niet boven de (aangenomen) fracture-reopening-druk mag uitkomen die bepaald is na het incident in april 2018 (263 bar voor TR-2). Beneden deze druk reageert het cluster in drukafhankelijkheid (stijfheid, kruipconvergentie) net als voor het incident. Deze 263 bar als drukmaximum is strikter dan uit het winningsplan 2018 en de daaraan verbonden vergunningsvoorschriften voortvloeit: de druk waarbij het cluster wederom een scheur vormt (en een pekellekkage plaatsvindt) wordt medio 2022 geschat op 272-285 bar voor TR-2 schoendruk. De druk is sinds eind 2018 niet boven de 260 bar geweest (een insluittest gedurende een weekend om caverneestijfheid en lektheid te testen) en sinds 2019 niet boven de 258 bar.

	Diepte schoen (m TVD)	LOT (bar)	Lithostatisch @ 2150 kg/m ³ (bar)	Gemiddelde druk @ schoen (bar) Q1-Q2-Q3-Q4	Max druk @ schoen (bar)	Max druk @ wellhead (bar)
TR-2	1615	340	340			
2020				257-257-257-257		
2021				257-257-257-257		
2022				257-257*	Q2: 263	Q2: 103 (water)
TR-6	1628	356	343			
2020				260-260-260-260		
2021				260-260-260-260		
2022				260-260*	Q2: 266	Q2: 60 (pekkel)

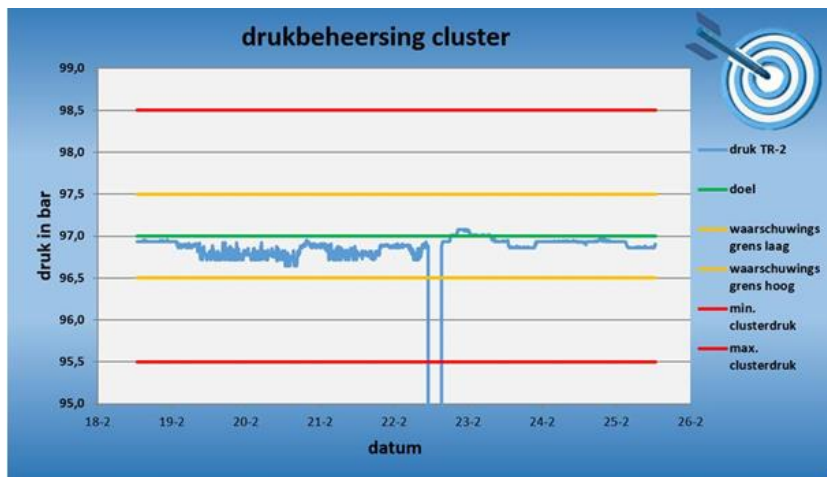
Tabel 1.1: Drukken en maximum drukken voor TR-2 en TR-6. Tabel wordt per kwartaal geüpdatet.

*= prognose.

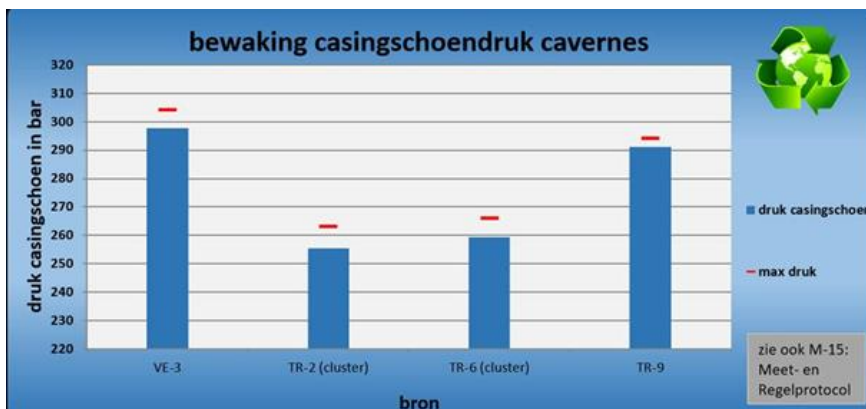
Mocht één van de cluster-cavernes zich geheel (of alleen het ZE-III 2b/3b deel) afzonderen van het cluster en waarbij er schoendrukverschillen ontstaan (gecorrigeerd voor diepte) die meer dan 10 bar bedragen, dan krijgt deze put of caverne een afzonderlijke maximum druk, met inachtneming van de maximale drukstijging van 15 bar ten opzichte van laagste druk in de voorafgaande jaren, zoals voorgeschreven in de goedkeuring op het winningsplan 2018. Dit is uiteraard alleen mogelijk indien de put nog toegankelijk is (niet het geval voor TR-5). Voor putten zonder productie-verbuizing (TR-2, TR-7 en wellicht eind 2022 TR-1) kan in geval van nood door de casing pekkel worden afgelaten.

De putdrukken worden gemonitord in de controlekamer (figuur 1.1), waarbij in 2022 gestuurd wordt op de putmondruk van TR-2, die binnen een minimum en maximumrange moet blijven met een drukrange van 1,5 bar naar boven en beneden. Bij een overdruk gaat een intern alarm af, waar de controle-operator geacht wordt de pekkelproductie te verhogen om de druk weer naar beneden te krijgen. Daarnaast worden de drukken in de controlekamer getoond, waar de werkelijke en maximumdrukken (volgens tabel 1.1) worden geplot, met een marge, om tijd tot ingrijpen te hebben (Figuur 1.2).

Figuur 1.3 geeft de drukhistorie van het cluster van het afgelopen kwartaal.



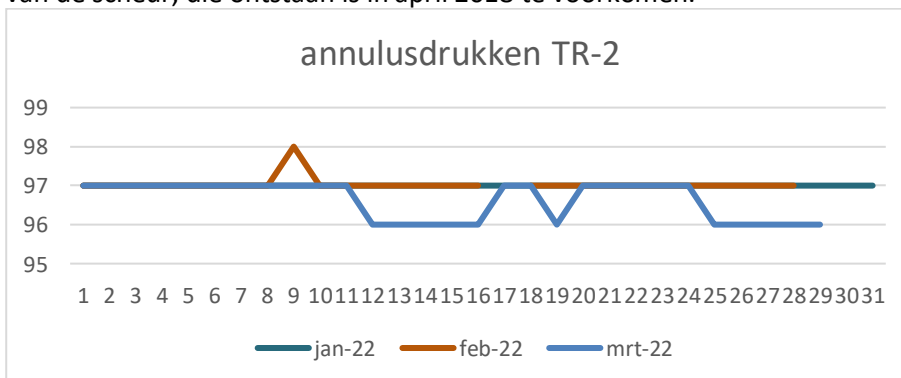
Figuur 1.1 Screenshot (feb 2022) van drukken en maximum drukken cluster, basis TR-2



Figuur 1.2 Screenshot (feb 2022) van drukken en maximum drukken op casingschoenniveau voor het cluster (putten TR-2 en back-up meting TR-6) en voor de cavernes VE-3 en TR-9.

De Mining Director kan besluiten tot een stuurdrukverandering (of een range-aanpassing) van de clusterdruk, bijvoorbeeld als gevolg van pekelbehoefte, binnen de grenzen van de maximumdruk van tabel 1.1

Na ieder kwartaal wordt de maximum (veilige) druk opnieuw vastgesteld. De maximum schoendruk voor TR-2 is het gemiddelde van de voorgaande 4 kwartalen plus 15 bar, maar nooit meer dan de maximum schoendruk van het kwartaal daarvoor en nooit meer dan 263 bar (266 bar voor TR-6). Dit om heropening van de scheur, die ontstaan is in april 2018 te voorkomen.



Figuur 1.3 drukverloop TR-2 in Q1-2022

1.2. Cavernedruk TR-9

Put TR-9 is geboord in 2011, heeft geen verbinding met het cluster en ligt voldoende ver verwijderd van het cluster om vrijwel zeker losstaand te blijven tot het moment waarop actieve winning uit TR-9 cf. het instemmingsbesluit met het winningsplan niet meer toegestaan is (2028). Een voorlopig voorziening van de rechtbank Den Haag staat actieve winning (waterinjectie) niet toe totdat uitspraak is gedaan over het winningsplan (verwachting zomer 2022) of de voorziening anderszins wordt opgeheven.

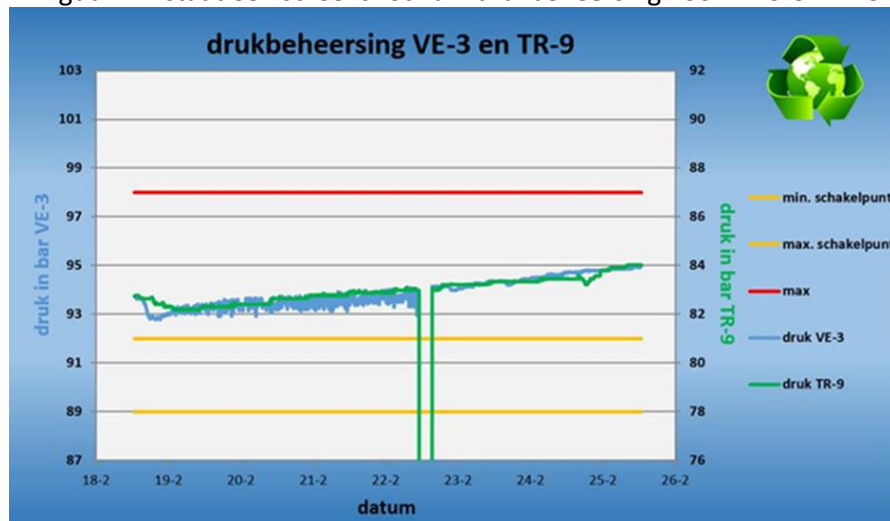
Mocht actieve winning worden toegestaan in TR-9 (op zijn vroegst in Q3-2022), dan zal deze aanvankelijk gebruikt worden om via waterinjectie pekkel te leveren voor gebruik of verkoop. Zodra putten VE-5 en/of VE-6 pekkel leveren, die nog niet aan de kwaliteitseisen voldoet (een te hoog K, Na of SO_4 gehalte of een te lage dichtheid), dan zal TR-9 mogelijk ook gebruikt worden voor na-saturatie met bischofiet, waarbij de onzuiverheden grotendeels neerslaan (als carnalliet, haliet en kieserietzout).

De casingschoen van TR-9 bevindt zich in de ZE-IV formatie, maar de 2b/3b carnallietlagen zijn niet geloofd, waardoor er slechts een met bischofitische pekkel gevulde caveerne in de 1b sectie bestaat.

De maximum druk op casing-schoen diepte wordt bewaakt via alarmsettings op de annulusdruk, waarbij de druk-omrekening plaats vindt volgens de dichtheid van vloeistof in de annulus (in april 2022: pekkel sm 1.30). De alarmsettings worden aangepast aan de maximum toegelaten cavernedruk op basis van de druk van de voorafgaande jaren (tabel 1.2), de verschillen met het cluster en indien de dichtheid van de inhoud van de annulus wijzigt, bijvoorbeeld van pekkel naar water. Indien de annulusdruk niet communiceert met de caveerne (door bijvoorbeeld een blokkade in de 2b/3b zouten) wordt de statische injectiedruk als alternatief genomen, eenwelk naar een druk op het niveau casingschoen wordt doorerekend.

De putdrukken worden gemonitord in de controlekamer, waarbij vanaf Q2-2022 gestuurd wordt op de putmondruk. Bij een overdruk gaat een intern alarm af, en zal de operator de pekkelproductie verhogen om de druk weer naar beneden te krijgen of de injectie verlagen. De drukken worden gerapporteerd in een dag-rapportage, waar de werkelijke- en maximum-drukken (volgens tabel 1.2) worden geplot. Drukverlopen op niveau casingschoen worden per kwartaal gerapporteerd via dit document.

In Figuur 1.4 staat een screenshot van drukbeheersing voor TR-9 en VE-3.



Figuur 1.4 drukverloop VE-3 (linkeras) en TR-9 (rechteras) als verloop van tijd, met als rode lijn de alarm druk (1 of meer bar beneden maximum) voor beide putten aan het wellhead, afgeleid van de maximum casingschoendruk. De gele lijnen zijn de grenzen van de gewenste operating-drukken bij normaal bedrijf van de fabriek aan de Billitonweg. Bij een serverstoring of reboot (zie 22-2) kunnen kortstondig waardes wegvallen.

	Diepte schoen (m TVD)	LOT (bar)	Lithostatisch @ 2150 kg/m ³ (bar)	Gemiddelde druk @ schoen (bar) Q1-Q2-Q3-Q4	Max druk @ schoen (bar)	Max druk @ wellhead (bar)
TR-9	1625	NVT	342			
2021				282-282-270-271		
2022				293-282*	Q2: 294	Q2: 86 (pekel)

Tabel 1.2: Drukken en maximum drukken voor TR-9. Tabel wordt per kwartaal geüpdatet. *= prognose

TR-9 is per 1-4-22 een kleine caverne (< 450.000 m³ totaal volume pekel, tabel 3.1), waarvoor volgens het winningsplan 2018 (en artikel 6 van het instemmingsbesluit) nog geen (drukhistorisch bepaalde) maximumdruk geldt. Vanaf Q2-2022 gaat Nedmag dit vroegtijdig invoeren. De maximum schoendruk wordt op 294 bar gezet (gemiddelde 4 voorgaande kwartalen + 15 bar).

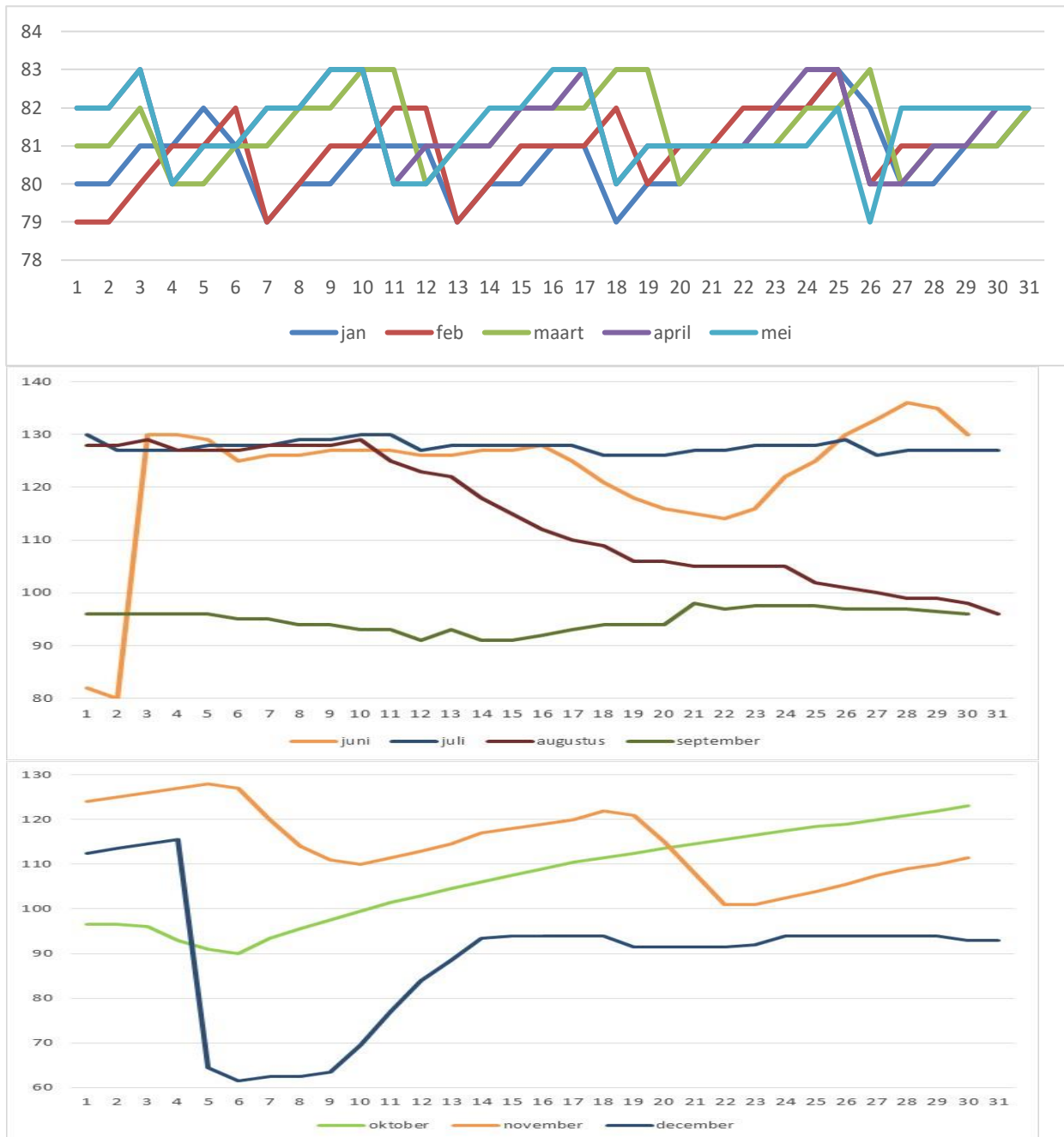
Na ieder kwartaal wordt de maximum (veilige) druk opnieuw vastgesteld. De maximum schoendruk voor TR-9 is het gemiddelde van de voorgaande 4 kwartalen plus 15 bar.

Tijdens de periode van actieve waterinjectie in TR-9, zal de maximum druk van de casingschoen van TR-9 worden teruggebracht naar maximaal 15 bar boven die van TR-6. Tot die tijd ligt de maximum druk hoger om de caverne niet te klein te laten worden, wat negatief is voor de pekalkwaliteit zodra water geïnjecteerd mag worden (geringe verblijftijd en contactoppervlak bischofiet).

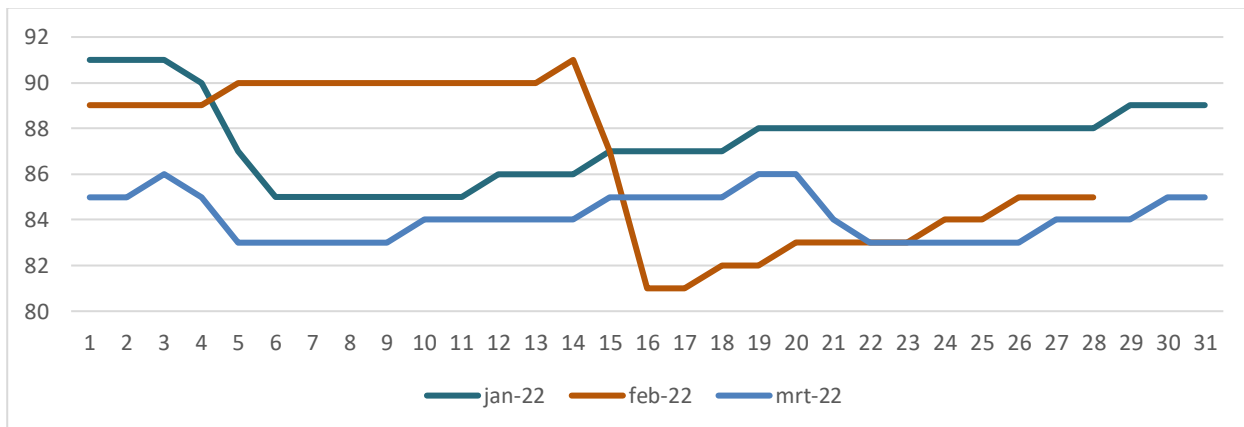
In januari 2022 was de compressibiliteit van TR-9 circa 100 m³ per bar en het cluster 1800 m³ per bar. In het onwaarschijnlijke geval dat TR-9 binnen de limieten van de vergunning door hydraulisch contact toch plusteling verbinding maakt met het cluster zal een 15 bar drukdaling in TR-9 minder dan 1 bar drukstijging in het cluster opleveren. Door verwachte groei van TR-9 (door logging) en krimp van het clustervolume (door squeeze) zal deze verhouding in de toekomst veranderen. Nedmag zal daarom het maximum drukverschil tussen TR-9 en het cluster nog verder doen dalen om de drukstijging van het cluster bij doorbraak onder de 2 bar te houden, wat veilig wordt geacht. Minstens 1 maal per jaar wordt de compressibiliteit gemeten (meestal rond een onderhoudsstop), voor het cluster door een insluittest van 24 uur of langer. Indien nodig wordt de TR-9 druk aangepast, ook aan de clusterdruk.

De kans op samengroeien van TR-9 met het cluster en de denkbare gevolgen daarvan zijn besproken in Hoofdstuk 4.2 van de "Aanvulling op Winningsplan 2018 (16 sept 2019)". Hierin wordt verwezen naar een ouder rapport: "Hydraulic connections between Nedmag caverns. Underlying mechanism, chance of new connections and possible consequences (19-10-2018)". Deze rapporten gaan uit van de worst-case situatie (grote caverne TR-9 en klein resterend pekervolume van het cluster medio 2028) met een hogere verschildruk (circa 50 bar).

Figuur 1.5 (a-c) geeft de drukhistorie van het afgelopen jaar en Figuur 1.6 geeft de afgelopen kwartalen van het huidige jaar.



Figuur 1.5-a/b/c drukverloop annulusdruk van TR-9 in voorgaand jaar (2021). Begin juni is de annulusvloeistof vervangen van pek (1.30 kg/l) naar water, wat een drukstijging aangeeft. Vanaf augustus is de cavedruk verlaagd voorafgaand aan de workover. Per 5 december zit er weer pek (1.3 kg/l) in annulus.



Figuur 1.6. Drukverloop annulus TR-9 in Q1-2022.

1.3. Cavernedruk VE-3

VE-3 mag volgens het goedkeuringsbesluit op het Winningsplan 2018 niet langer gebruikt worden voor actieve logging. De caverne zal langzaam in druk afgelaten worden, waarbij de pekkel gebruikt kan worden voor plantpekkel of andere doeleinden.

	Diepte schoen (m TVD)	LOT (bar)	Lithostatisch @ 2150 kg/m ³ (bar)	Gemiddelde druk @ schoen (bar) Q1-Q2-Q3-Q4	Max druk @ schoen (bar)	Max druk @ wellhead (bar)
VE-3	1590	NVT	335			
2020				289-289-289-289		
2021				289-289-289-291		
2022				296-290*	Q2: 300 [#]	Q2: 99 [#] (pekkel 1.28)

Tabel 1.3 Drukken en maximum drukken voor VE-3. Tabel wordt per kwartaal geüpdatet. *= prognose
=gebaseerd op conservatieve aanname casingsterkte (zie M14)

Na ieder kwartaal wordt de maximum (veilige) druk opnieuw vastgesteld. De maximum schoendruk voor VE-3 is het gemiddelde van de voorgaande 4 kwartalen plus 15 bar, maar nooit meer dan het de maximumdruk van het kwartaal daarvoor en nooit meer dan het maximum in het kader van behoud van de well integrity. De putdruk wordt gemonitord in de controlekamer, waarbij gestuurd wordt op de putmondndruk (Fig 1.4).

De Mining Director kan besluiten tot een stuurdrukverandering (of een range-verandering) van VE-3, bijvoorbeeld als gevolg van pekkelbehoefte, binnen de grenzen van de maximumdruk van tabel 1.3

1.4. Cavernedruk VE-1

Caverne VE-1 heeft geen cavernedeel in de ZE-III-1b bischofietsectie en heeft geen productietubings meer. De druk van de casing kan wordt gemonitord, maar de druk wordt niet gemaximeerd. Gezien de geringe cavernegrootte (schatting 50.000 m³ vrije pekkel) en het ontbreken van snelkruipend bischofiet wordt het risico van grote of snelle lekkage naar naburige cavernes of de overburden gering geacht.

1.5. Cavernedruk VE-2

Caverne VE-2 is reeds 1999 voorzien van een cementplug in de casing en de druk kan niet meer gemonitord worden; pekkel kan niet meer afgelaten worden. Er zijn geen plannen om caverne VE-2 weer open te boren.

1.6. Beheersing cavernedrukken VE-5/6

Dit hoofdstuk zal in 2022 worden aangevuld, zodra putten VE-5/6 zijn geboord en de casingschoen-diepte bekend is. Dit voordat met actieve winning (logging) wordt aangevangen.

1.7. Beheersing cavernedrukken VE-7/8

Dit hoofdstuk zal worden aangevuld, zodra putten VE-7/8 zijn geboord en de casingschoen-diepte bekend is. Dit voordat met actieve winning (logging) wordt aangevangen.

2. Bepaling cavernegroei en convergentie uit productiecijfers

De cavernegroei en convergentie, die uit productiecijfers wordt berekend, gebeurt (per caveerne) aan de hand van debietmeters aan de productie- en injectie- en dilutiekant. Bij Nedmag wordt de cavernepemel binnen de productiebuisk (via een concentrische dilutiebuisk) ondergronds met water verdund (gediluteerd) om afkoelings-kristallisatie te voorkomen. De flows worden continue gemeten en per dag in totalen intern gerapporteerd. Deze dagtotalen worden omgezet in maand-, kwartaal en jaaroverzichten, waarbij ook wordt berekend hoeveel zout is opgelost en hoeveel caverneconvergentie er op basis van de productie- en injectietotalen opgetreden is.

De netto productie uit een caveerne is het (dagelijkse of maandelijkse) productievolume minus het dilutievolume. De injectie is het volume aan injectiewater plus het waterdeel (boven dat van verzadigde cavernepemel) van geherinjecteerde pemel. Er wordt sinds 2011 niet meer actief carnalliet uit de ZE-III-2b/3b opgelost, en dit proces wordt daarom niet besproken. Bij oplossing van zout in de ZE-III-1b laag wordt voornamelijk bischofiet ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) opgelost en kleine hoeveelheden carnalliet ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), haliet (NaCl) en kieseriet ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Dit wordt allemaal berekend op basis van een massabalans en een (te verwachten) verzadigde toestand van de pemel, afgeleid uit de geproduceerde pemel. De cavernepemel (bij 65 °C) van een volwassen caveerne heeft gemiddeld (per caveerne en in de tijd) een dichtheid van 1355 kg/m³ en een MgCl_2 percentage van 38%.

De exacte formules zijn complex en de parameters afhankelijk van de gemiddelde pekelsamenstelling per caveerne, maar een benadering is wel te geven in eenvoudige formules, indien uitgegaan wordt van slechts winning door waterinjectie in bischofietlagen.

Indien 1 m³ water wordt geïnjecteerd, dan lost 2,9 m³ magnesiumzout op, met een gelijke toename van het pekelgevulde cavernevolume. In totaal wordt er 4,1 m³ pemel gevormd uit 2,9 m³ magnesiumzout (bischofiet, carnalliet en kieseriet samen), 1 m³ water en een expansie van 0,2 m³. Dit levert -zonder het effect van zoutkruip en drukveranderingen- 1,2 m³ geproduceerde onverdunde pemel op. Doordat de pemel met 10-20% verdund wordt ter voorkoming van kristallisatie in de leidingen en opslagtanks, wordt er uiteindelijk (zonder squeeze) 1,4 m³ verdunde pemel geproduceerd.

Indien de caveerne groot genoeg is en de cavernedruk laag genoeg, dan levert zouttoestroom (squeeze) door verdringing een extra hoeveelheid pemel op. Van de hoeveelheid pemel in de bischofietlagen (2,9 m³ per 1 m³ waterinjectie) kan 2 tot 2,5 m³ gewonnen worden door zoutkruip. Deze aanwezige hoeveelheid "vrije" pemel neemt toe met logging en af met squeeze.

De onverdunde pekelp productie bij gelijkblijvend vrij pekelvolum kan dan van 1,2 naar 3,2-3,7 m³ stijgen per geïnjecteerde 1 m³ water.

De rest van de pemel in de caveerne (0,5 tot 1 m³ per 1 m³ waterinjectie) is ingesloten in neerslag (brokken onoplosbaar of gekristalliseerd zout) en wordt gebonden pemel genoemd. Die onderverdeling wordt in hoofdstuk 3 besproken.

3. Bepaling opsplitsing gebonden en vrije deel pekkel

Een deel van de pekkel, die ontstaat bij oplossing van bischofiet, zal voor geologische tijden (duizenden tot tienduizenden jaren) opgesloten blijven in de poriën en kleinere holtes van slechter oplosbare zouten: anhydriet (CaSO_4), haliet (NaCl), kieseriet ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en carnalliet ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Dit gebonden deel kan in een tijdsschaal van tientallen jaren (de maximum leeftijd van de productieput) niet door kruipconvergentie gewonnen worden. Het andere deel (het vrije deel) kan door kruip gewonnen worden. De verdeling tussen gebonden en vrije pekkel wordt bepaald op basis van fractie van onzuiverheden in de bischofietsectie. Deze is voor een nieuwe caverne pas bekend nadat de zout(boor)kernen zijn geanalyseerd, daar waar nodig aangevuld met lithologische correlaties uit logs (op basis van met name dichtheid en gamma-ray).

Voor het bestaande cavernecluster zijn de waardes gemiddeld en is er voor de (1b) bischofietsectie ook een calibratie, door analyse van het verloop van de convergentiesnelheid bij constante clusterdruk. Deze convergentiesnelheid heeft een (vrijwel) lineair verband met het resterend volume vrije pekkel. Voor cavernes TR-9 en VE-3 zijn daarvoor nog niet genoeg data aanwezig, mede doordat er actiever geloofd (zout opgelost) werd dan er aan convergentie optrad en de cavernes relatief klein zijn en anders van vorm dan het cluster.

Voor het carnallietdeel van het cluster en de cavernes VE-1 t/m -3 (TR-9 en ook de geplande nieuwe cavernes hebben dat niet) bestaat er ook nog geen praktijkgetal en zijn de aannames op basis van boorkerngegevens. Aan VE-1 en -2 wordt in dit protocol verder geen aandacht besteed, zie § 1.4 en 1.5.

Er wordt van uitgegaan dat vrijwel alle niet-bischofiet-zouten die zich in de bischofietlaag bevinden, na wegloging van het bischofiet, in de caverne zullen vallen met een porievolumen van circa 20%. Als bijvoorbeeld 43% van deze sectie bischofiet is (en dus 57% andere zouten) zal 1 m^3 opgelost bischofiet $1,3 \text{ m}^3$ vaste stof aan neerslag opleveren. Inclusief 20% pekkelvulling is dit $1,6 \text{ m}^3$ neerslag met $0,33 \text{ m}^3$ pekkel (20% van $1,6 \text{ m}^3$). Het ontstane vrije pekkelvolume is dan $0,67 \text{ m}^3$, naast $0,33 \text{ m}^3$ gebonden pekkel oftewel 2/3. Convergentievolumen (squeeze) wordt dan afgetrokken van het vrije pekkelvolume om het resterende squeeze potentieel te berekenen, dat indirect ook de input is voor bodemdalingspotentieel (zie hoofdstuk 4).

	% vrij bij oplossing bischofiet 1b	Vrij pekkelvolume 1b 1-4-2022	Gebonden pekkelvolume 1b 1-4-2022
Cluster	75% (3/4)	1.070.000	2.810.000
TR-9	67% (2/3)	178.000	167.000
VE-3	67% (2/3)	243.000	287.000

Tabel 3.1: percentage van vrij volume bij oplossing Mg-zouten en volumes vrije en gebonden pekkel in de 1b laag. Het % vrije pekkel in de 1b-laag in het cluster is gecalibreerd voor het cluster. De andere percentages zijn bepaald via boorkerngegevens.

Voor de 2b/3b carnallietcavernes is een vergelijkbare analyse gemaakt. In tabel 3.2 staan de daarbij bepaalde ondergrondse pekkelvolumes in de 2b/3b laag (carnallietpekkel). Per kwartaal worden deze waardes gerapporteerd. Het aandeel van de squeeze uit het carnallietpekkeldeel (2b/3b) is een schatting en bedraagt circa 5% van de totale convergentie. Pas zodra de hoeveelheid vrije pekkel in de 1b sectie significant beneden de hoeveelheid vrije pekkel in de 2b/3b komt, kan de bijdrage van de carnallietsqueeze beter ingeschat worden. Ook dan pas kan de hoeveelheid vrije pekkel in de carnallietsectie gecalibreerd worden. Dit is voor het cluster en voor VE-3 pas het geval (naar verwachting) vanaf 2024. TR-9 heeft geen carnallietsectie, net zo min als de te boren putten VE-5 t/m VE-8.

	% vrij bij oplossing carnalliet 2b/3b	Vrij pekkelvolume 2b/3b 1-4-2022	Geb. pekkelvolume 2b/3b 1-4-2022
Cluster	67% (2/3)	1.140.000	935.000
VE-3	67% (2/3)	81.000	100.000

Tabel 3.2: percentage vrije pekkel in 2b/3b laag (carnalliet) en volumes vrije en gebonden pekkel.

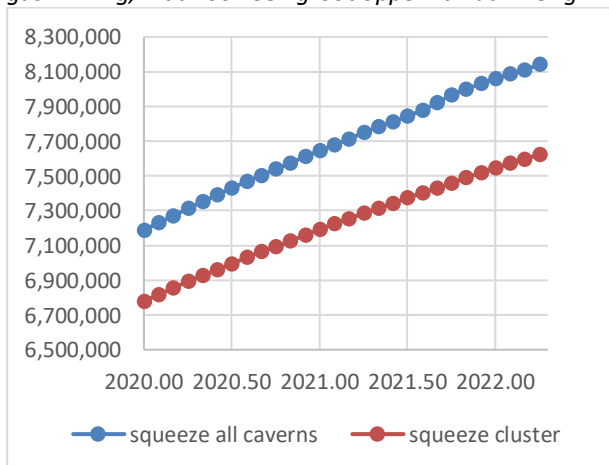
Indien het percentage gebonden pekkel significant hoger blijkt te zijn dan verwacht dan zal minder pekkel gewonnen kunnen worden door zoutkruip (convergentie). Dan zal er ook minder bodemdaling optreden.

Met name het volume vrije pek in het carnallitische deel van het cluster (bepaald op meer dan 1 miljoen m^3) is relevant voor de bodemdaling, met een potentiële reductie van de daling van max. circa 10 cm medio 2045, uitgaande van de maximale winning volgens het winningsplan 2018. Indien het percentage gebonden echter significant lager is (ook voor 1-b sectie van de nog te boren putten) kan er op het diepste punt tot zo'n 7 cm extra bodemdaling optreden, waarmee in het winningsplan rekening is gehouden.

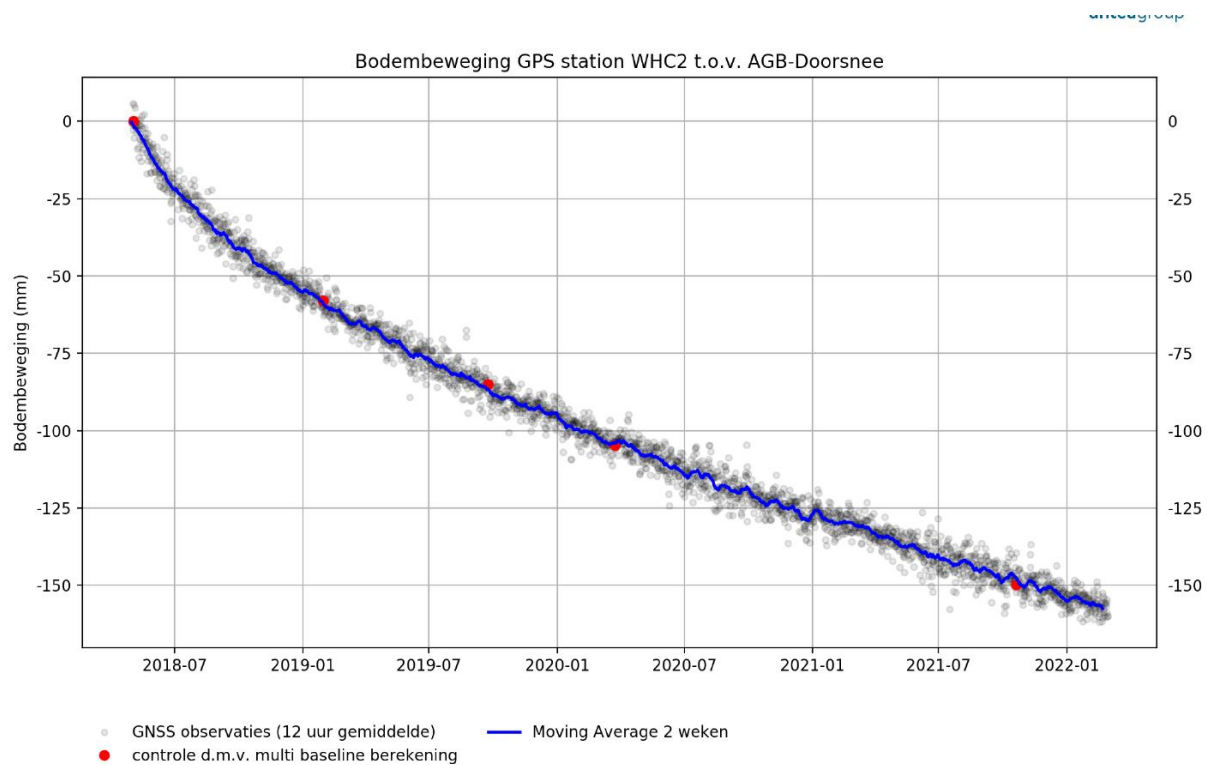
4. Bodemdaling door zoutwinning

4.1. Bepaling bodemdaling: maximum, volumes en komvorm

Op kwartaalbasis worden InSAR metingen verkregen, waarbij de verandering van hoogteligging van verharde vlakken (brede wegen, daken en verharde terreinen) wordt vastgesteld door een satelliet. De bodemdalingstrend wordt vergeleken met de berekende squeezevolumes (Fig 4.1). De dalingsanalyse nabij het diepste punt wordt (onafhankelijk) gecontroleerd met GPS data op WHC-2 (Fig 4.2). In deze dalingswaardes zitten ook dalingen door gaswinning en autonome daling (compactie van ondiepe lagen door inklinking en veenoxidatie) alsmede seizoens-schommelingen door fluctuerende waterstanden en temperaturen. Het berekende komvolume wordt (als totaal en als toename per jaar) vergeleken met het berekende squeezevolume door de gemeten bodemdalingssom te fitten met Geertsma-Van Opstal en/of Gauss-curves, met name om de volumes in de rand van de kom beter te schatten. Hier is heel weinig bodemdaling door zoutwinning en veel verstoring door gaswinning, maar ook een groot oppervlak aanwezig met potentieel grote volumes aan bodemdaling.

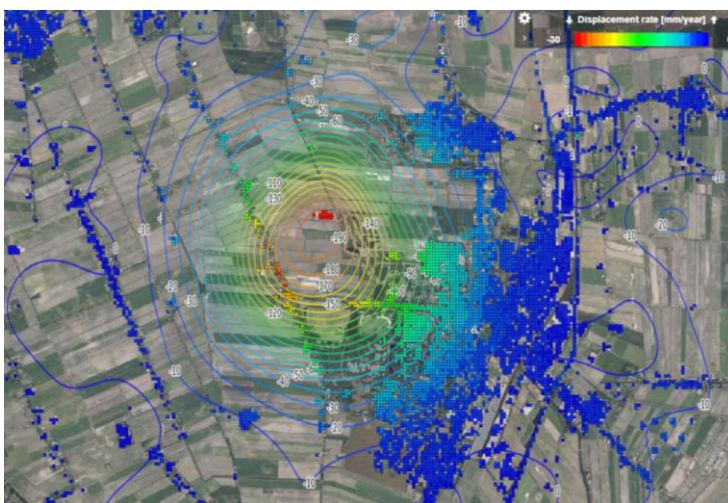


Figuur 4.1: squeeze-evolutie (caverneconvergentie) in m^3 van 2020 t/m Q1-2022.



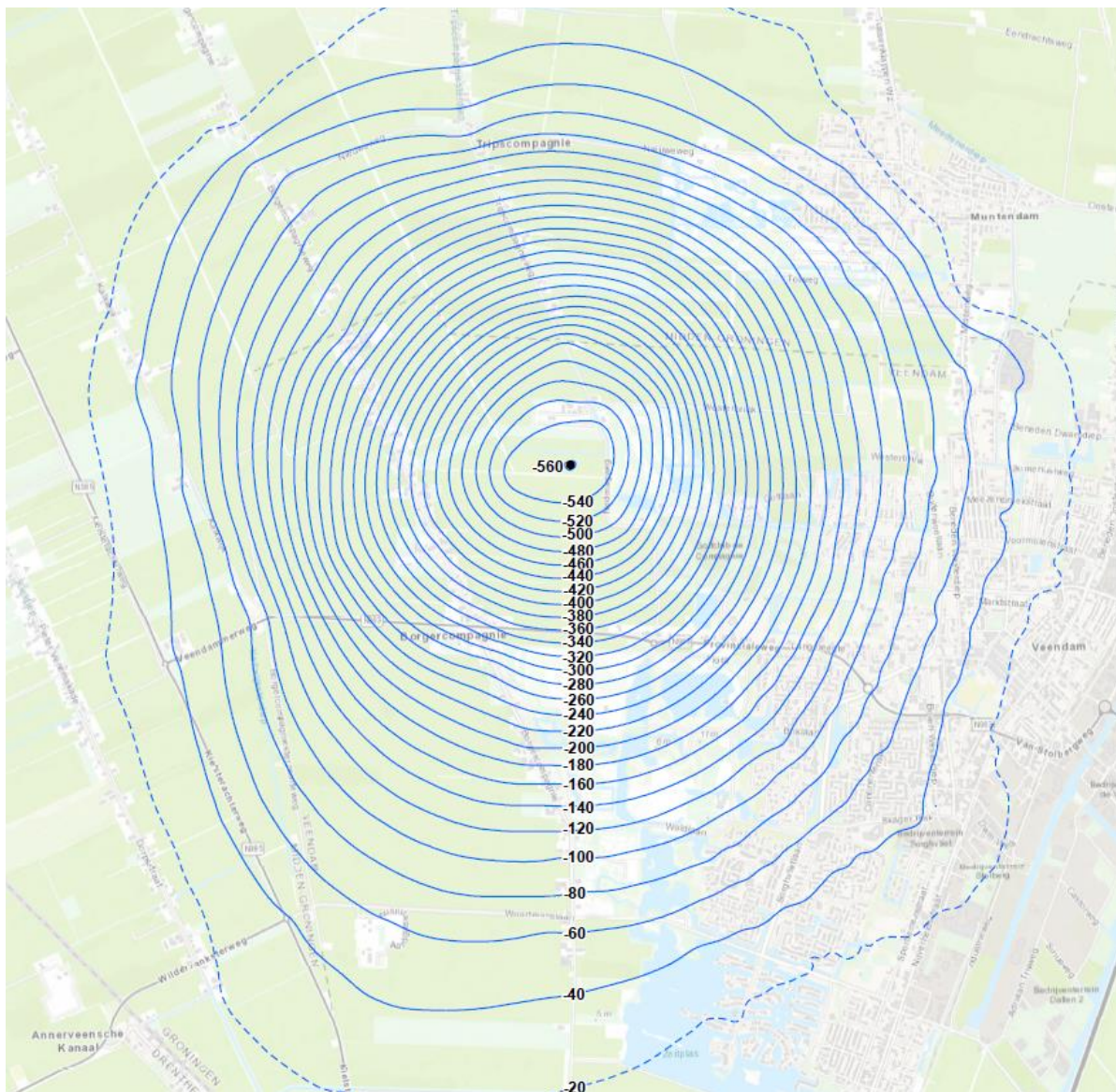
Figuur 4.2 GPS dagwaardes en 14 daagse gemiddelde voor bodemdaling op WHC-2 sinds mei 2018. De spreiding is meetruis (meteorologische effecten), die over een langere periode uitmiddelt.

In het hart van de zoutwinningskom is de daling door Nedmag zoutwinning dominant. Alleen op de flanken (op meer dan 5 km afstand) is er de laatste jaren een significante bijdrage van de gaswinning en/of zoutwinning/gasopslag in Zuidwending (zie figuur 4.6). Het aandeel van bodemdaling door gaswinning (na stoppen gaswinning uit de velden Groningen en Annerveen medio 2022) zal -naar verwachting- afnemen. InSAR-data worden ieder kwartaal omgewerkt in een bodemdalingskom. Zie figuur 4.3 voor een kaart voor de periode 2016-heden.



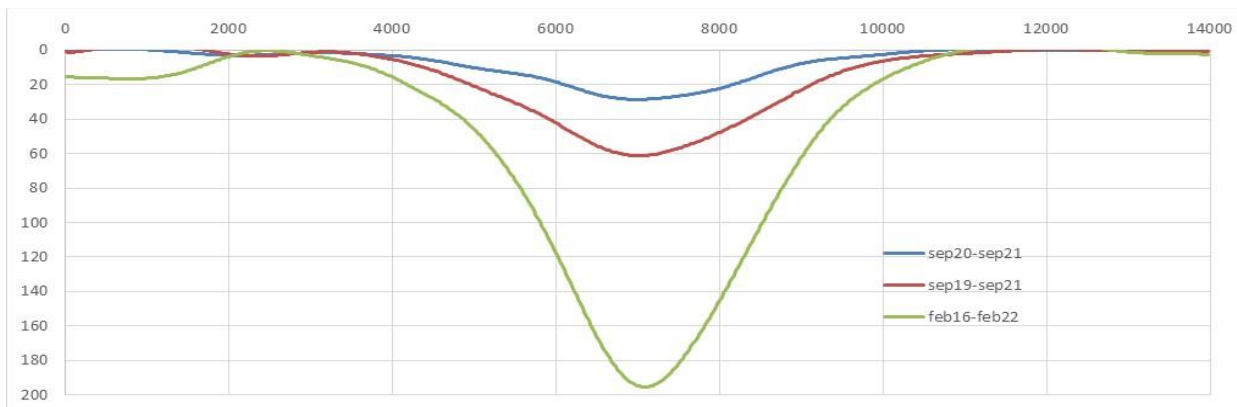
Figuur 4.3 Bodemdalingcontouren Insar feb 2016 t/m maart 2022 in mm. De gekleurde punten geven de gemiddelde dalingssnelheid van meetpunten van 0 tot 30 mm per jaar over deze zelfde periode.

Figuur 4.4: Waterpasmeetnet Nedmag in 2018, deels overlappend met het NAM meetnet.



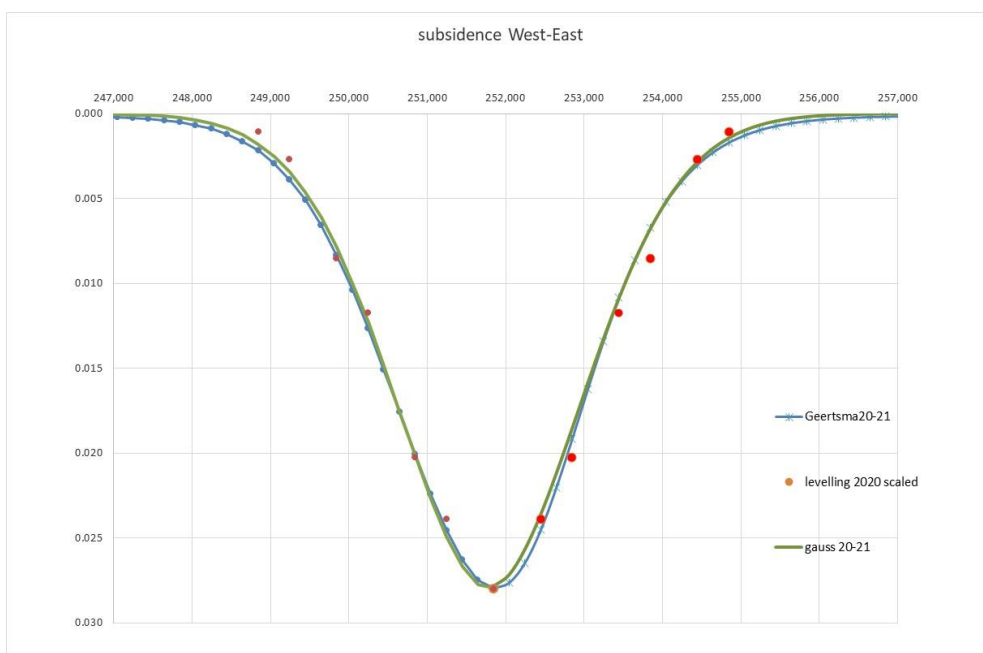
Figuur 4.5: Waterpasmeetresultaten Nedmag 1993- juni 2020 aangevuld met Insar daling juni 2020-augustus 2021

De vorm en het volume van de zoutbijdrage aan de met InSAR gemeten bodemdaling wordt gecontroleerd door een (hoofdzakelijk) west-oost lijn te fitten met theoretische modellen (fig 4.6 en 4.7). In deze richting is er zo min mogelijk verstoring door bodemdaling van gaswinning, omdat deze lijn de grenzen van de gasvelden volgt. Op circa 6 km afstand is er wel invloed van kleinere gasvelden en de zoutwinning/gasopslag van Zuidwending, die door gebruik van de curves (terecht) niet aan Nedmag wordt toegeschreven.



Figuur 4.6 : Insar bodemdaling feb 2016 – feb 2022 en recente dalingen over 1 en 2 jaar.

Figuur 4.7 toont een best-fit Gauss curve en de ook gebruikte Geertsma-Van Opstal van de bodemdaling 2020-2021, en vergelijkt deze met de geschaalde bodemdaling 1993-2020 volgens de waterpassing uit 2020, voor de west-oostrichting. De waterpasdata van 1993-2020 zijn hier geschaald naar 2.8 cm maximum bodemdaling, om vergelijkbaar te zijn. Na iedere waterpassing wordt een nieuwe fit gemaakt.



Figuur 4.7 : fit west-oost bodemdaling sep20-sep-21 volgens Geertsma (SGS-model) en Gauss curve met geschaalde waterpas (levelling) data 1993-2020, als functie breedte-coordinaten (Easting). Northing is 571 088 m

4.2. Voorspelling bodemdalingsvolumes en komvorm

Iedere 2 jaar (even jaren), na het beschikbaar komen van waterpasgegevens, wordt er een update gemaakt van de bodemdalingskom-verwachting van 2045 op basis van opgetreden daling en te verwachten daling op basis van de geplande winning, evaluaties van vrij pekelvolume en geodetische evaluatie van de komvormen.

Voor de voorspelling worden de meest actuele data gebruikt van het resterend volume vrije pekel (per caverne of -cluster) en de convergentiesnelheid op basis van vrij volume en caverne druk. Voor de oudere

cavernes zijn de vrije volumes onderverdeeld in een bischofitische (1b) en carnallitische (2b/3b) cavernesectie.

5. Controle op Surdyne dakolieverbruik

(voorschrift uit Omgevingsvergunning)

Pas na gereedkomen van VE-5 en VE-6 en later ook VE-7 en -8 zal er korte tijd olie (Surdyne of een minimaal gelijkwaardig alternatief) worden gebruikt voor het beschermen van het halietskandak van de cavernes. Tot die tijd wordt geen dakolie gebruikt. De oliebalans en registratie (en rapportage) wordt opgenomen in een volgende versie van dit document.

6. Rapportage en updates

6.1. Ieder Kwartaal

Rapportage van winnings- en injectiegegevens, cavernegroottes, squeeze, olieconsumptie en bodemdaling worden (als update van dit document) aan het SodM gezonden en ook openbaar gemaakt door plaatsing op de Nedmag website (www.nedmag.nl), waar deze minstens 2 jaar na publicatie beschikbaar blijven.

6.2. Iedere 2 jaar

Na een waterpassing in ieder even jaar (en uitgebreide foutanalyse en filtering gaswinningseffecten) wordt een uitgebreide analyse gedaan naar eventuele afwijkingen in vergelijking met de InSAR data en updates van theoretische komvormen. Op basis van de meest recente inzichten wordt ook de bodemdalingsvoorspelling voor 2045 zonodig aangepast en gedeeld met alle relevante overheden. Het betreft naar verwachting hoogstens lichte aanpassingen in de komvorm en de maximum eind-daling (op basis van winningslimieten uit het Winningsplan 2018, zolang dat geldig is).

6.3. Update van dit document

De tabellen in dit document worden ieder kwartaal geüpdatet. Een inhoudelijke wijziging zal naar verwachting na de boring (en boorkernanalyse) van VE-5 en VE-6 plaatsvinden, maar voorafgaand aan de actieve waterinjectie (en Surdyne gebruik voor halietdak bescherming), eind 2022. Ook indien Nedmag (binnen de voorwaarden van het winningsplan) besluit minder of anders te willen monitoren of rapporteren (al dan niet op verzoek van SodM) zal Nedmag een update indienen. In ieder geval iedere 5 jaar (na een laatste formele wijziging) moet dit document worden gereviewed, inhoudelijk geüpdatet en ter beoordeling aan SodM worden gezonden.

Referenties

Te vinden op Nedmag.nl en op Mijnbouwvergunningen.nl.

- [1] Nedmag - Winningsplan 2018, 28 november 2018
- [2] Instemmingsbesluit Winningsplan (2021)