

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

Autorisatie: Mining Director

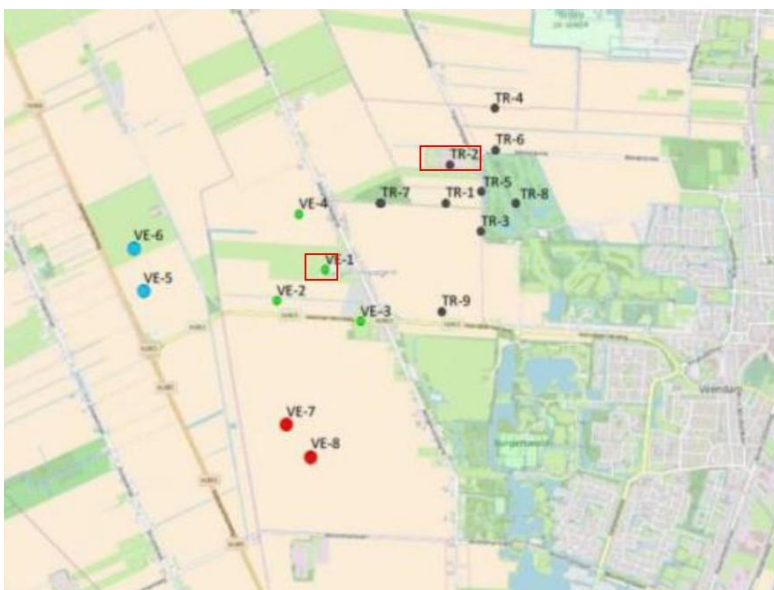
Dit document dient 3 doelen:

- Het is een werkprocedure voor Mining (M-15) ten behoeve van drukbeheersing en rapportage
- Het is een kwartaalrapportage aan Staatstoezicht op de Mijnen voor druk en volumebeheersing en rapportage bodemdaling (verzending per e-mail)
- Het is 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.
- Bij/tijdens gebruik van dakolie zal het ook de gebruiken en voorraden van dakolie 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 instemming hiermee, en deels een uitwerking daarvan zijn. Over de instemming loopt nog een beroepsprocedure en een verzoek tot voorlopige voorziening bij de Raad van State. De beheersing van de integriteit van de verbuizing en wellhead worden beschreven in procedure M-14: het WIMS (Well Integrity Management System). Dit protocol (M-15) is (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). In 2022 zijn ook de winningsputten VE-5 en -7 geboord. Zodra begonnen wordt de ontwikkeling van de bijbehorende cavernes wordt een update ingediend bij het SodM over de beheersing van drukken en volumes in deze cavernes, alsmede de registratie van dakolie.



Figuur S.1: positie casingschoenen bestaande putten (TR-1 t/m TR-9 en VE-1 t/m VE-5 en VE-7) en indicatieve posities van nog te boren putten (VE-6 en VE-8). Boorlocaties WHC-1 (VE-putten) en WHC-2 (TR-putten) in rood kader.

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 (tijdens de eerste loofase) op casingschoenniveau is initieel 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 waarde 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 een risicobeheersing en bodemdalings-potentieel is er ook een maximum volume vrije pekkel vastgelegd voor iedere caverne 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 loging (en de vorming van precipitaat) en wordt geacht eeuwig opgesloten te blijven, terwijl het deel vrije pekkel toeneemt door loging 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 ontwikkelen 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 voorafgaand aan de ontwikkeling van de cavernes VE-5 en -7, waarvoor dit relevant is. Hoofdstuk 6 beschrijft de rapportage en frequentie daarvan van bovenstaande zaken, alsmede het actualiseren van dit document.

Afkortingen 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 ⁵ / ₈ " of 10 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 (verwacht herhaalde) 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 vloeistofge vulde ruimte van een winningsput. Wordt ook wel aangeduid met de afkorting WHP
WIMS	Well integrity management system. Beschreven in M14

1. Beheersing cavernedrukken

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 caveerne, 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 vrijwel constante druk gehouden. Nedmag heeft als beleid dat de druk in het cluster niet boven de minimale (aangenomen) fracture-closing-druk mag uitkomen die bepaald is na het incident in april 2018 (263 bar voor TR-2). Beneden deze druk reageerde 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

	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			
2021				257-257-257-257		
2022				257-257-257-257		
2023				256-256*	Q2: 263	Q2: 103 (water)
TR-6	1628	356	343			
2021				260-260-260-260		
2022				260-260-260-260		
2023				259-259*	Q2: 266	Q2: 60 (pekkel)

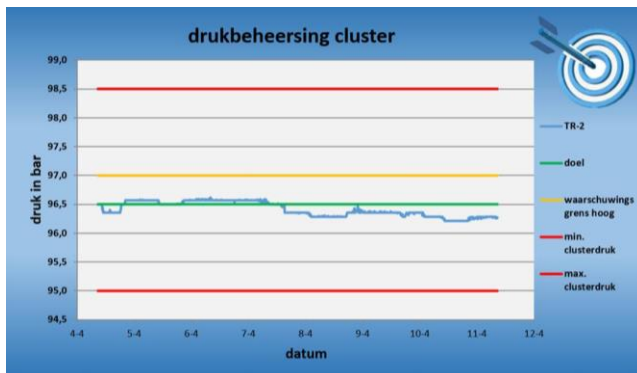
Tabel 1.1: Drukken en maximum drukken voor TR-2 en TR-6. Tabel wordt per kwartaal geüpdatet.

*= prognose.

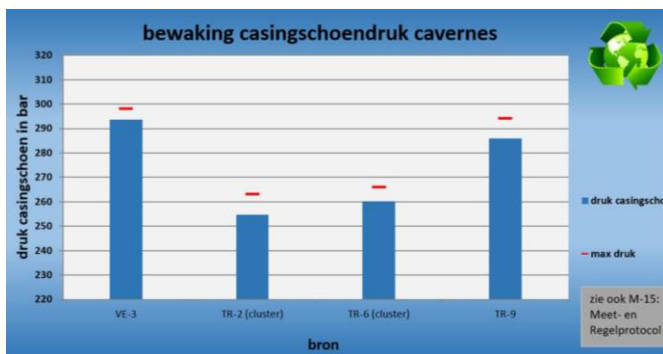
Mocht één van de cluster-cavernes zich geheel (of alleen het ZE-III 2b/3b deel) afzonderen van het cluster, waarbij er schoendrukverschillen ontstaan (gecorrigeerd voor diepte) die meer dan 10 bar bedragen, dan krijgt deze put of caveerne een afzonderlijke maximum druk, met inachtneming van de maximale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

De putdrukken worden gemonitord in de controlekamer (fig 1.1), waarbij in 2023 gestuurd wordt op de putmondruk van TR-2, die binnen een minimum- en maximum-range moet blijven met een drukrange van 3,5 bar (1,75 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 maximale drukken met kleine marge (volgens tabel 1.1) worden geplot. De marge dient om tijd tot ingrijpen te hebben. In fig 1.2 worden huidige en maximum casingdrukken getoond, die als momentopname.

Figuur 1.3 geeft de drukhistorie van het cluster van het afgelopen kwartaal. Omdat de drukken op hele barren worden weergegeven (en dus afgerond) lijken de drukken iets te springen.

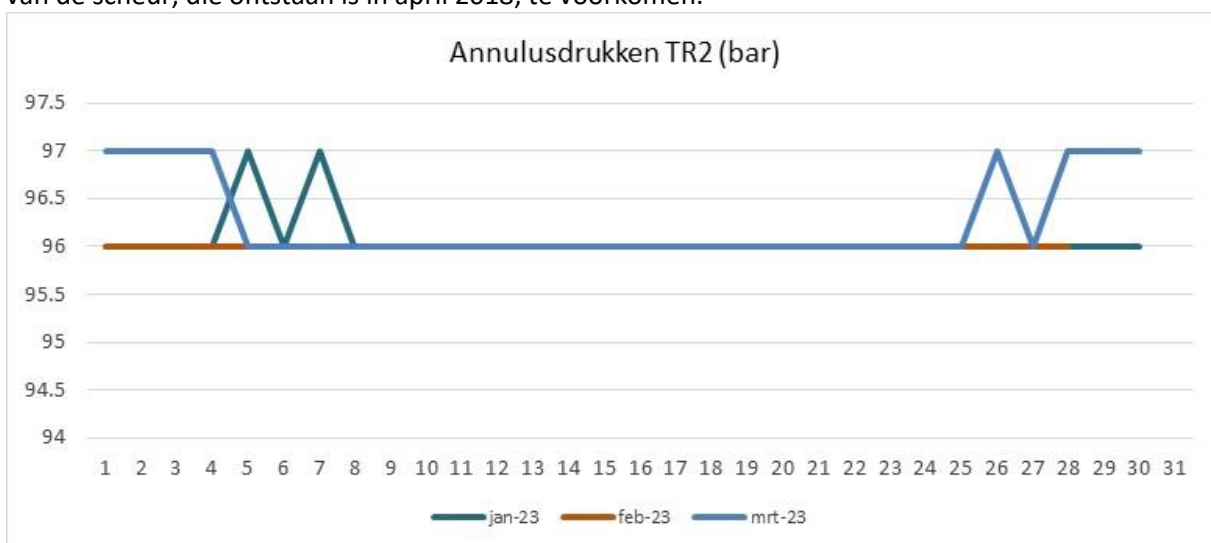


Figuur 1.1 Screenshot (april 2023) van drukken en maximum drukken cluster, basis TR-2



Figuur 1.2 Screenshot (april 2023) 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 cluster-druk, 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 Q1-2023 (drukken zijn afgerond op hele bars).

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.

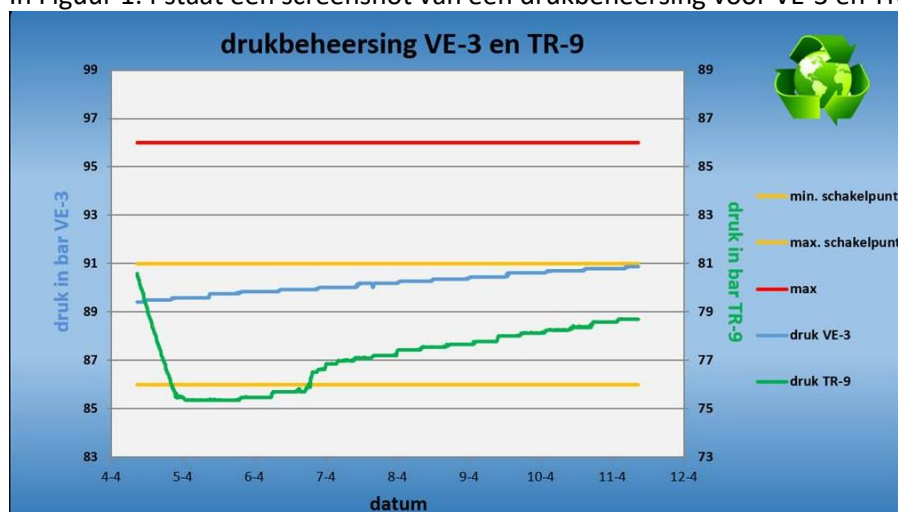
Mocht er door de Raad van State (in Q2-23) geen voorlopige voorziening tegen de actieve winning in TR-9 worden uitgesproken, dan zal deze aanvankelijk gebruikt worden om via waterinjectie pekel te leveren voor gebruik of verkoop. Zodra putten VE-5 en VE-7 pekel leveren, die nog niet aan de kwaliteitseisen 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 pekel 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 maart 2023: pekel 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 verschildrukken met het cluster en indien de dichtheid van inhoud van de annulus wijzigt, bijvoorbeeld van pekel 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 casingsschoen wordt doorgetrokken.

De putdrukken worden gemonitord in de controlekamer, waarbij gestuurd wordt op de putmondndruk. Bij een overdruk gaat een intern alarm af, waar de controle-operator geacht wordt de pekelpductie te verhogen om de druk weer naar beneden te krijgen (of de injectie te stoppen). De drukken worden gerapporteerd in een dag-rapportage, waar de werkelijke- en maximum-drukken (volgens tabel 1.2) worden geplot. Drukverlopen worden per kwartaal gerapporteerd via dit document.

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



Figuur 1.4 drukverloop VE-3 en TR-9 als verloop van tijd, met als rode lijn de alarm druk aan het wellhead, afgeleid van de maximum casingschoendruk. De gele lijnen zijn gewenste operating-drukken bij normaal bedrijf.

	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				293-290-290-290		
2023				290-290*	Q2: 294	Q2: 86 (pekel 1.300)

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

TR-9 is per 1-1-23 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 heeft Nedmag dit vroegtijdig ingevoerd. De maximum schoendruk is op 294 bar gezet.

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, maar nooit hoger dan 294 bar.

Zodra actieve waterinjectie in TR-9 is goedgekeurd door een uitspraak van de Raad v State, zal de maximum druk van de casingschoen van TR-9 in 6 maanden worden teruggebracht naar maximaal 5 bar boven die van TR-6. Tot die tijd ligt de maximum druk hoger om de caverne niet (door zoutkruip) te klein te laten worden, wat negatief is voor de pekelkwaliteit zodra water geïnjecteerd mag worden (geringe verblijftijd en contactoppervlak bischofiet).

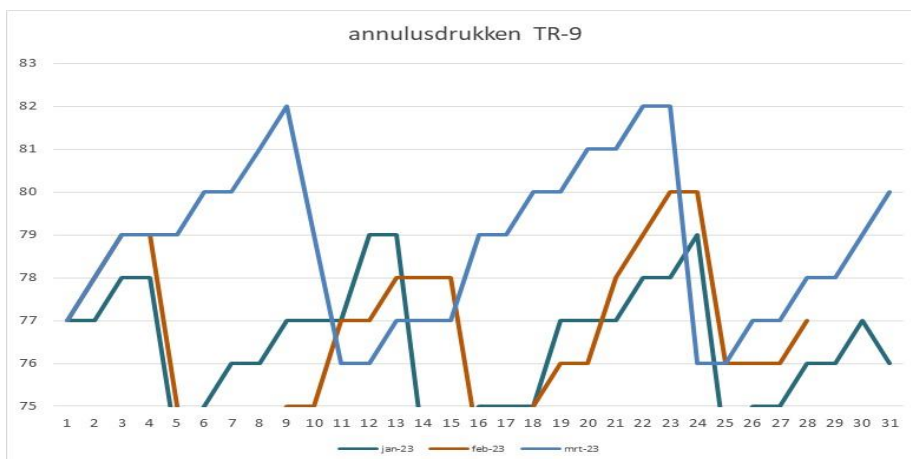
In december 2022 was de compressibiliteit van TR-9 circa 110 m³ per bar en het cluster 1000 m³ per bar (zie Appendix A). In het onwaarschijnlijke geval dat TR-9 binnen de limieten van de vergunning door hydraulisch contact toch plosteling verbinding maakt met het cluster zal een 25 bar drukdaling in TR-9 ongeveer 2.5 bar drukstijging in het cluster opleveren. Na enkele maanden logen in TR-9 en een drukverschil van 15 bar zal dit hoogstens 2 bar zijn.

Door verwachte groei van TR-9 (door logging indien toegestaan vanaf medio 2023) en krimp van het clustervolume (door squeeze) zal deze verhouding in de toekomst (medio 2030) veranderen, vermoedelijk tot (maximaal) 300 m³/bar voor TR-9 en (minimaal) 750 m³/bar voor het cluster. Nedmag zal daarom het maximum (positive) drukverschil tussen TR-9 en het cluster (TR-6 of TR2 gecorrigeerd voor schoendiepte) nog verder doen dalen tot circa 5 bar medio 2028, om de drukstijging van het cluster bij doorbraak tot maximaal 2 bar te houden. Een drukstijging van 2 bar ligt binnen de in § 1.1 genoemde grenzen en leidde tijdens de laatste compressibiliteitstest niet tot afwijkende gedrag van het cluster.

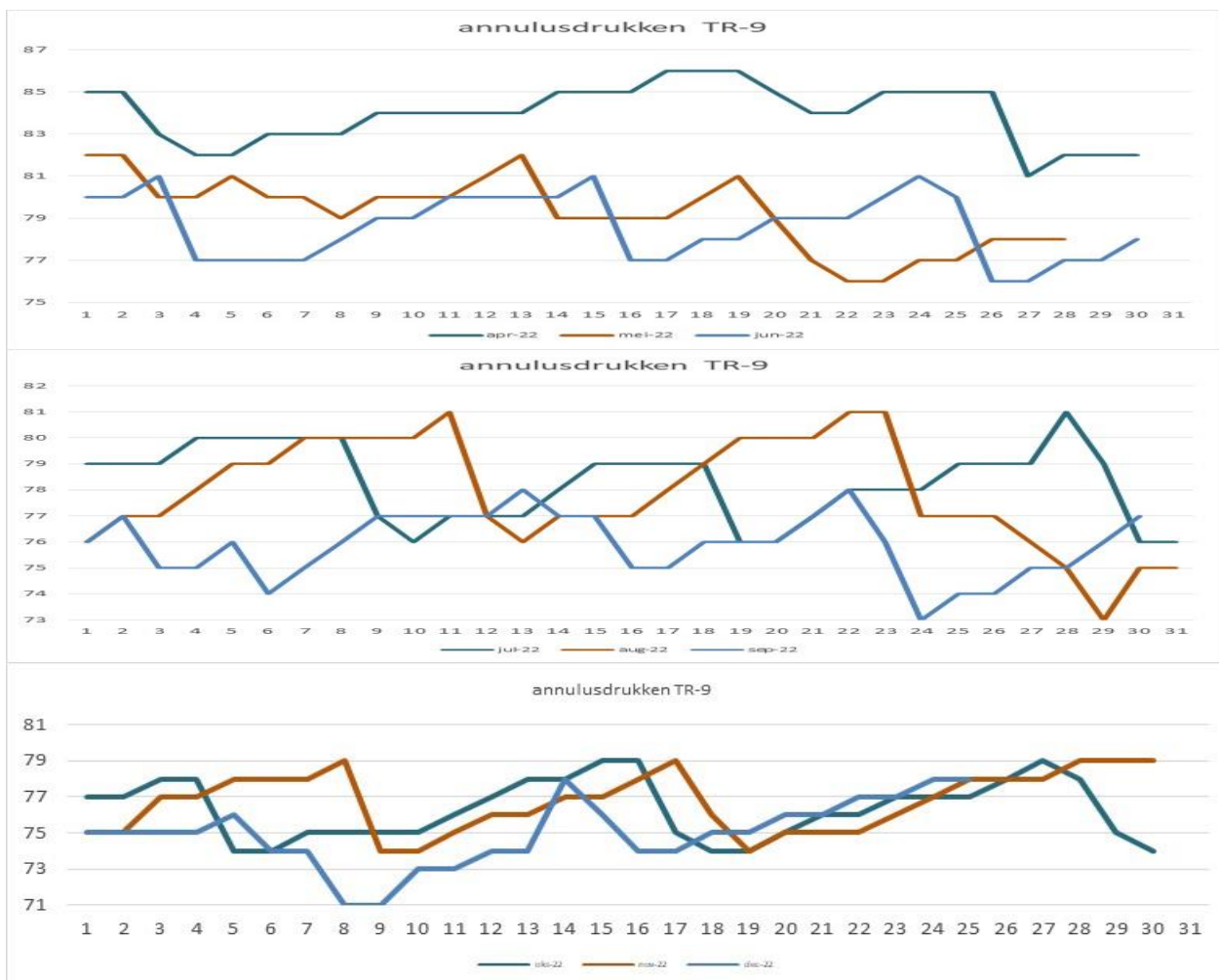
Minstens 1 maal per jaar wordt de compressibiliteit gemeten (meestal rond een onderhoudsstop), voor het cluster door een insluittest van 24-48 uur en een productie- of injectietest voor TR-9 van 12-24 uur. Indien nodig wordt de maximum TR-9 druk aangepast aan die van het cluster. Zie appendix A.

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 pekelvolume van het cluster medio 2028) met een hogere verschildruk (circa 50 bar) dan gehandhaafd zal worden.

Figuur 1.5 geeft de TR-9 drukhistorie in Q1-2023 en Figuur 1.6 van Q2-Q4 2022. Halverwege febr 2023 is een verstopping in de 2b/3b laag met neck-wash verholpen, waarna pekel met een dichtheid van 1.300 kg/m³ (ipv 1.310) in de annulus is gebracht. Dit betekent een wellhead drukstijging van 2 bar bij gelijke casingschoendruk.



Figuur 1.5 drukverloop annulusdruk van TR-9 in Q1-2023. Midden feb 2023 is de annuluspekel vervangen van een pekel met dichtheid 1,316 naar 1,300 kg/l (na een neckwash), wat een wellhead druktoename geeft van circa 2 bar bij gelijke casingschoendruk.



Figuur 1.6a/b/c. Drukverloop annulus TR-9 in Q2-4 2022. Op 27 aug 22 is de pekeldichtheid in de annulus verhoogd van sm 1.302 kg/l naar 1.316 kg/l. Dit geeft een wellhead drukverlaging van 2 bar tov de schoen.

1.3. Cavernedruk VE-3

VE-3 mag volgens het (formeel nog geschorste) goedkeuringsbesluit op het Winningsplan 2018 niet langer gebruikt worden voor actieve logging. De caveerne zal 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			
2021				289-289-289-291		
2022				296-296-292-281		
2023				285-275*	Q2: 298 [#]	Q2: 97 [#] (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. De putdruk wordt gemonitord in de controlekamer, waarbij gestuurd wordt op de putmondruk (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.

In sept 2022 was de compressibiliteit van VE-3 circa 300 m³ per bar

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. Een buitengebruikstelling is geaccepteerd. De definitieve abandonnering van put VE-2 is in voorbereiding voor Q3 2023.

1.6. Beheersing cavernedrukken VE-5

Dit hoofdstuk zal in Q1/2 2023 worden aangevuld. Dit voordat met actieve winning (logging) wordt aangevangen. VE-5 is op dit moment slechts een boorgat.

1.7. Beheersing cavernedrukken VE-7

Dit hoofdstuk zal in Q1/2 2023 worden aangevuld. Dit voordat met actieve winning (logging) wordt aangevangen. VE-7 is op dit moment slechts een boorgat.

1.8. Beheersing cavernedrukken VE-8

Dit hoofdstuk zal worden aangevuld, zodra put VE-8 is geboord en de casingschoen-diepte bekend is. Dit voordat met actieve winning (logging) wordt aangevangen. Dit zal niet voor 2024 zijn.

1.9. Beheersing cavernedrukken VE-6

Dit hoofdstuk zal worden aangevuld, zodra put VE-6 is geboord en de casingschoen-diepte bekend is. Dit voordat met actieve winning (logging) wordt aangevangen. Dit zal niet voor 2026 zijn.

2. Bepaling cavernegroei en convergentie uit productiecijfers

De cavernegroei en convergentie, die uit productiecijfers wordt berekend, gebeurt (per cave) aan de hand van debietmeters aan de productie- en injectie- en dilutiekant. Bij Nedmag wordt de cavernepemel binnen de productiebuik (via een concentrische dilutiebuik) 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 cave 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 cave heeft gemiddeld (per cave 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 cave, 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 pemelgevulde 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 cave 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 pemelproductie bij gelijkblijvend vrij pemelvolume kan dan van 1,2 naar 3,2-3,7 m³ stijgen per geïnjecteerde 1 m³ water.

De rest van de pemel in de cave (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 en berekende volumes worden in hoofdstuk 3 besproken.

3. Bepaling opsplitsing gebonden en vrije deel pekkel

Een deel van de pekkel, dat 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. Voor kleinere cavernes (VE-3, TR-9) lijkt $\frac{2}{3}$ vrije pekkel een goede high-end aanname. Voor het bischofietgedeelte (de 1b) van het cluster lijkt $\frac{3}{4}$ een betere fit.

Voor het carnallietdeel van het cluster en de cavernes VE-1 t/m -3 bestaat er ook nog geen praktijkgetal, maar een analogie met de bischofietsectie van kleine cavernes. 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 caveerne 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 $\frac{2}{3}$. 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). Het verloop van het volume vrije pekkel in het cluster in de tijd (vanaf 2018) staat ook weergegeven in de Appendix (fig A1), waarbij het de hoeveelheid pekkel in de bischofietsectie is afgenomen van bijna 2,5 miljoen m^3 naar minder dan 1 miljoen m^3 .

	% vrij bij oplossing bischofiet 1b	Vrij pekkelvolume 1b 1-4-2023	Gebonden pekkelvolume 1b 1-4-2023
Cluster	75% ($\frac{3}{4}$)	950.000	2.840.000
TR-9	67% ($\frac{2}{3}$)	180.000	170.000
VE-3	67% ($\frac{2}{3}$)	240.000	290.000

Tabel 3.1: percentage van vrij volume bij oplossing Mg-zouten volumes vrije en gebonden pekkel in de 1b laag. Het % vrije pekkel in de 1b-laag in het cluster is gecalculeerd 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 (afgeronde) op deze manier bepaalde ondergrondse pekkelvolumes in de 2b/3b laag (carnallietpekkel). Per kwartaal worden deze waarden gerapporteerd. Het aandeel van de squeeze uit het carnallietpekkeldeel (2b/3b) is een schatting en bedraagt circa 10% van de totale convergentie.

	% vrij bij oplossing carnalliet 2b/3b	Vrij pekkelvolume 2b/3b 1-4-2023	Geb. pekkelvolume 2b/3b 1-4-2023
Cluster	67% ($\frac{2}{3}$)	1.020.000	935.000
VE-3	67% ($\frac{2}{3}$)	59.000	100.000

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

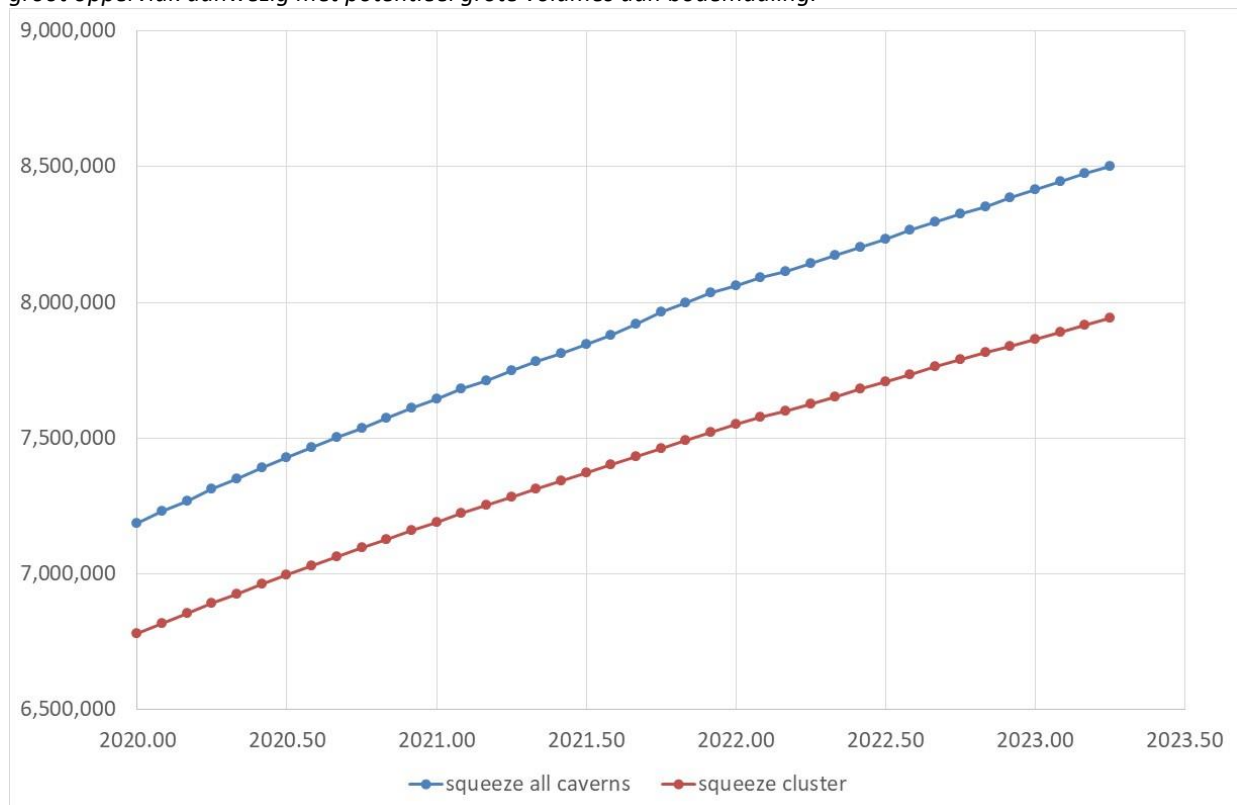
Indien het percentage gebonden pekkel significant hoger blijkt te zijn dan verwacht dan zal minder pekkel gewonnen kunnen worden door zoutkruip (convergentie). Dan zal er ook minder bodemdaling optreden. Met name het volume vrije pekkel in het carnallitische deel van het cluster (geschat op circa 1 miljoen m^3) is relevant voor de bodemdaling op lange termijn, en deze kan voor de 2b/3b lager uitvallen dan geschat. Indien het percentage gebonden pekkel echter significant lager is (ook voor 1-b sectie van de nieuwe putten) kan er tot zo'n 7 cm extra bodemdaling optreden, waarmee in het winningsplan rekening is gehouden.

4. Bodemdaling door zoutwinning

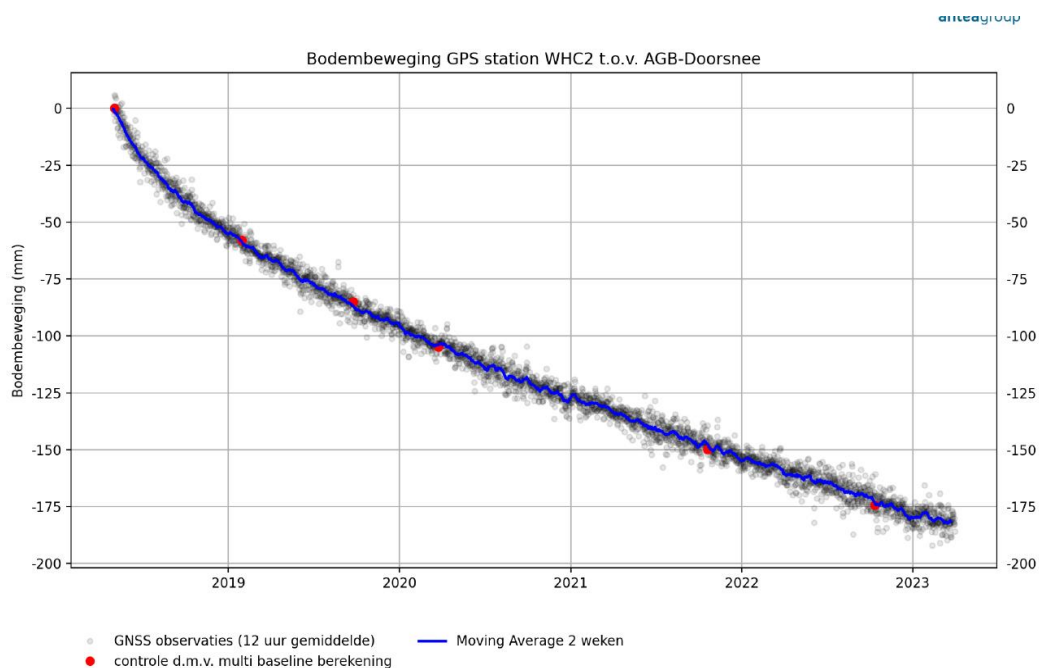
4.1. Bepaling bodemdaling: maximum, volumes en komvorm

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 dalingswaarden 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 bodemdalingstrend 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 en veel verstoring door gaswinning, maar ook een groot oppervlak aanwezig met potentieel grote volumes aan bodemdaling.



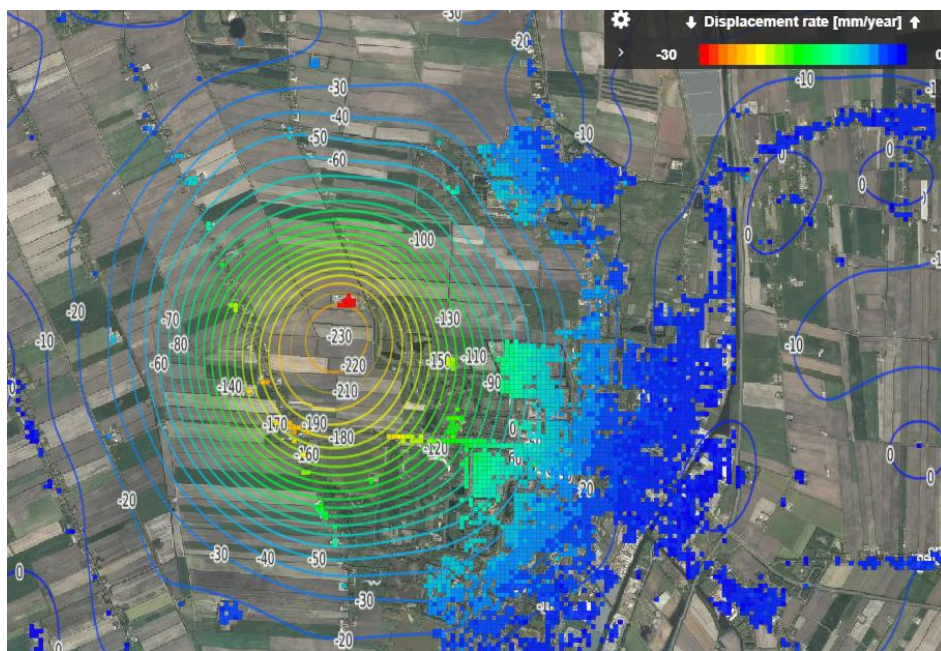
Figuur 4.1: cumulatieve squeeze-evolutie (caverneconvergentie) in m³ van jan-2020 t/m maart-2023.



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) zal -naar verwachting- afnemen.

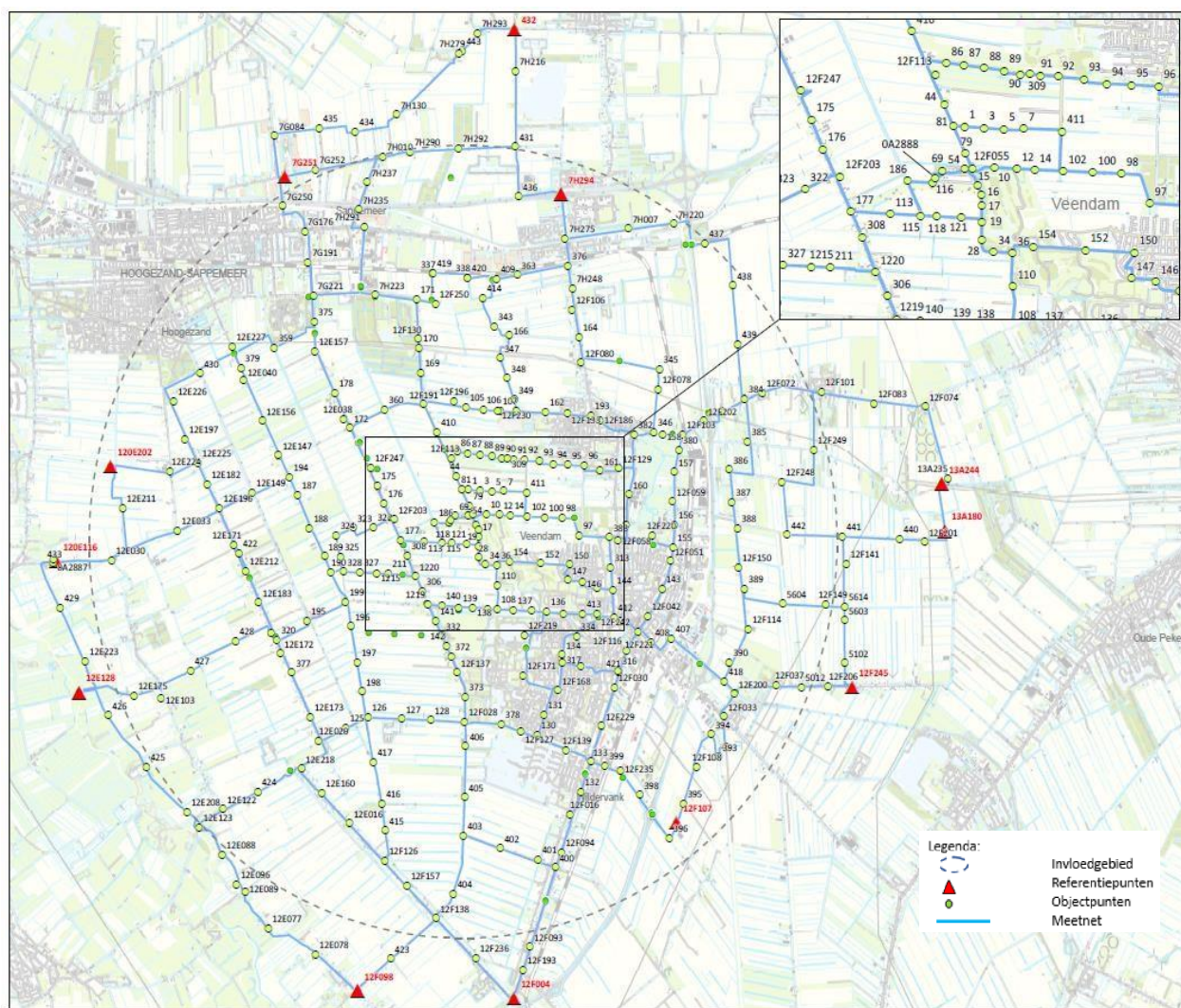
InSAR-data worden ieder kwartaal omgewerkt in een bodemdalingskom. Zie figuur 4.3 voor een kaart voor de periode 2016-heden.



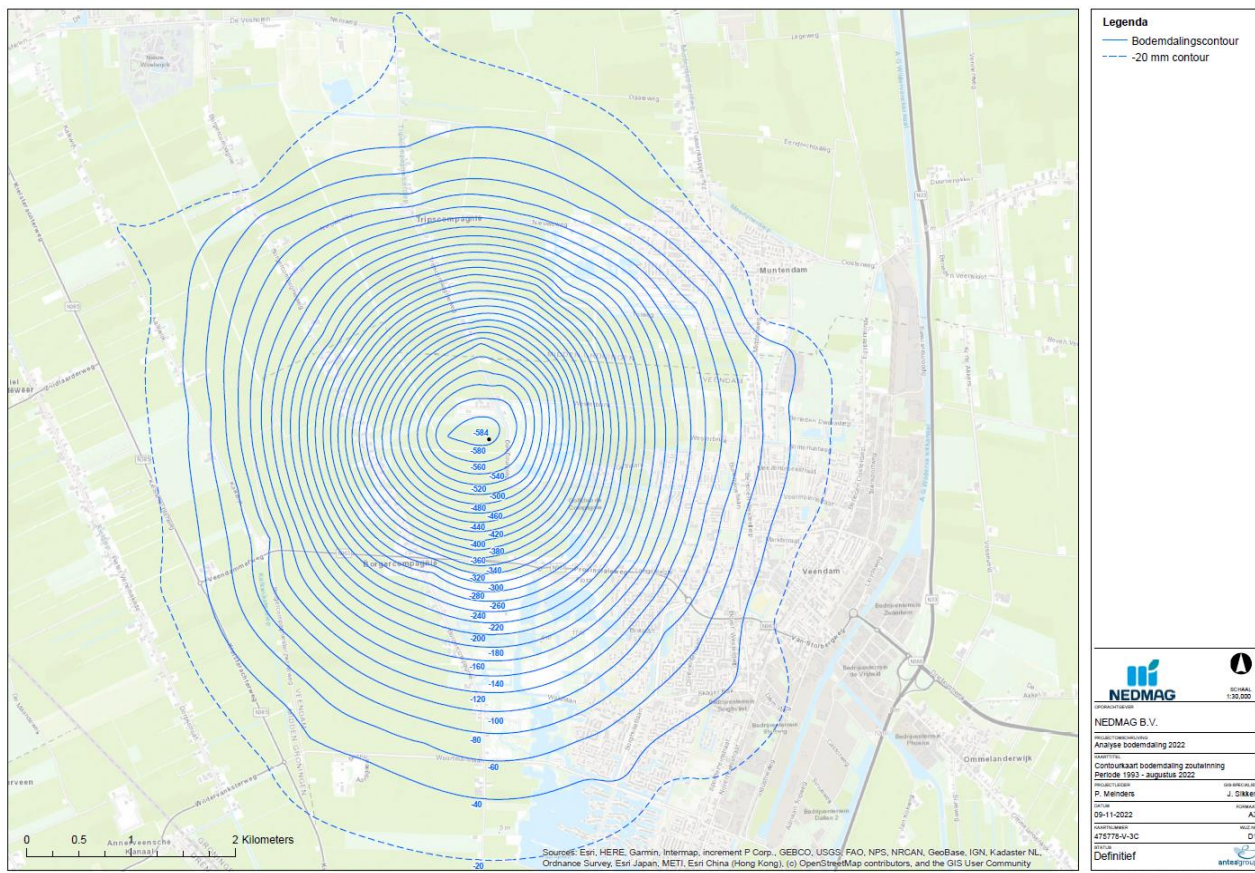
Figuur 4.3 Bodemdalingcontouren Insar feb 2016 t/m maart 2023 in mm. De gekleurde punten geven de gemiddelde dalingssnelheid van meetpunten van 0 tot 30 mm per jaar over deze zelfde periode. De contouren hebben hun eigen kleurenschaal van 0 tot 230 mm.

Om de 2 jaar (ieder even jaar) vindt er een waterpassing plaats.

Deze waterpassing bepaalt hoogte-veranderingen van vaste punten op gefundeerde huizen, objecten en ondergrondse meetpalen. Met deze meting kunnen ondiepe effecten (van de bovenste 1-3 meter met name door grondwaterschommelingen) worden uitgefilterd. De meetpunten bevinden zich in de regel langs wegen, maar ook langs smalle en onverharde wegen, waardoor InSAR en waterpassingen elkaar aanvullen. Het 2018-2022 meetnet staat in figuur 4.4. De bodemdaling 1993 t/m aug 2022 is getoond in Fig 4.5.

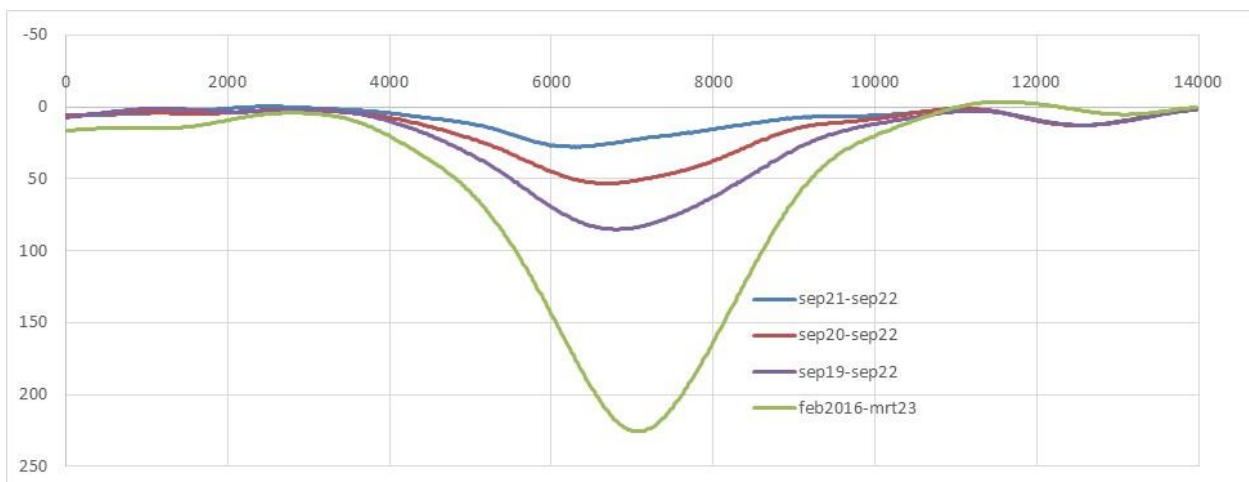


Figuur 4.4: Waterpasmeetnet Nedmag in 2022, deels overlappend met het NAM meetnet.



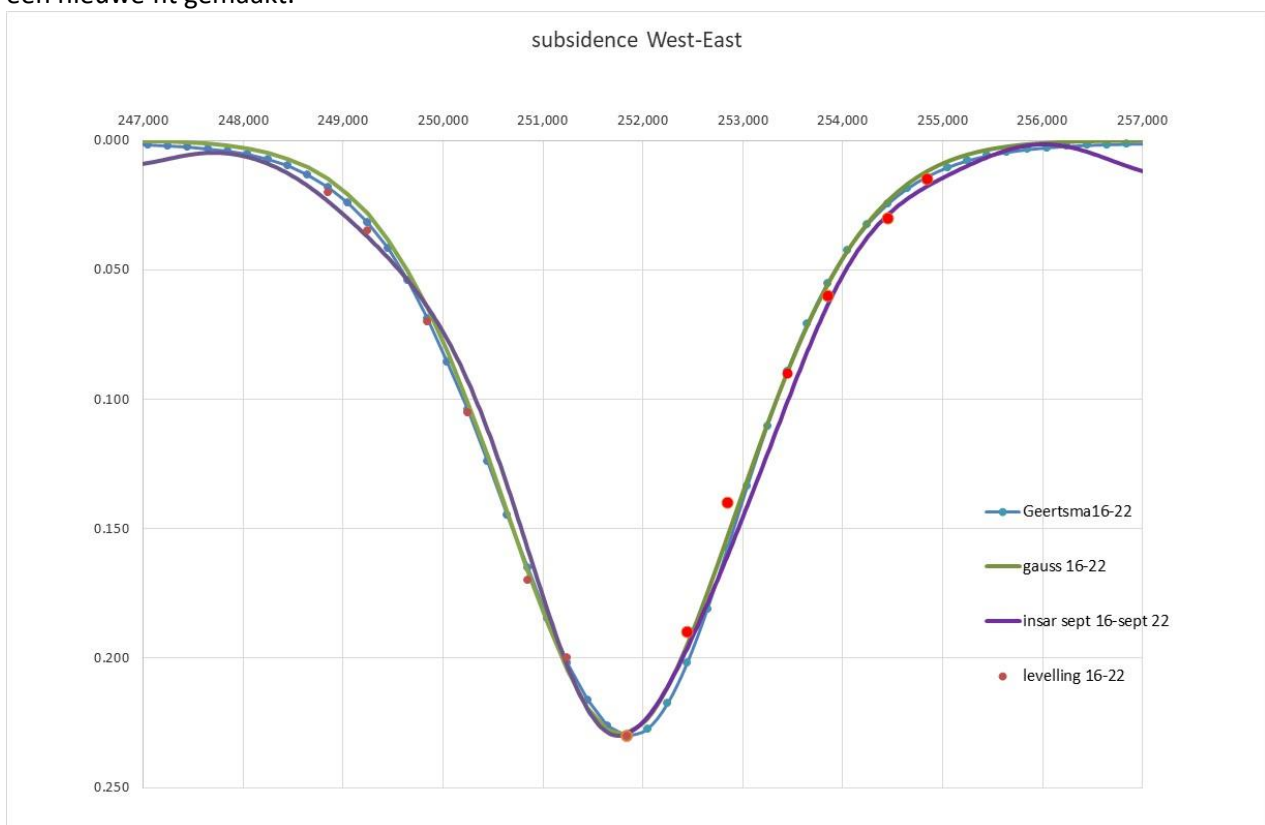
Figuur 4.5: Waterpasmeetresultaten Nedmag 1993- aug 2022 in dalingscontouren, geschoond voor daling door gaswinning. De diepste contourlijn geeft 580 mm bodemdaling weer (diepste punt 584 mm). De gestippelde lijn is een schatting van de 20 mm contour.

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 (sealing faults) 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 W-E feb 2016 – maart 2023 en recente dalingen over 1-3 jaar.

Figuur 4.7 geeft een best-fit aan van de Gauss-curve en de ook gebruikte Geertsma-Van-Opstal-methode aan de bodemdaling 2016-2022 door zoutwinning voor de west-oostrichting. Na iedere waterpassing wordt een nieuwe fit gemaakt.



Figuur 4.7 : fit west-oost bodemdaling volgens Geertsma (SGS-model), Gauss curve, Insar en waterpas (levelling) data 2016-2022, als functie breedte-coördinaten (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. Zolang niet duidelijk is wat (hoeveel) er met putten TR-9 en VE-5 t/m VE-8 gewonnen mag worden (tot de uitpraak van de Raad van State) is een update niet heel zinvol. Op basis van het gedrag van de bestaande cavernes is in 2022 geen nieuw inzicht gekregen in de vorm, positie of maximum diepte van de kom. Voor de voorspelling worden de meest actuele data gebruikt van het resterend volume vrije pek (per caveerne of -cluster) en de convergentiesnelheid op basis van vrij volume en cavernedruk.

5. Controle op dakolieverbruik

(voorschrift uit Omgevingsvergunning)

Op dit moment is logen in VE-5/7 nog niet toegestaan, doordat er een voorlopige voorziening is aangevraagd bij de Raad van State. Pas na uitspraak (medio juni) of intrekken of afwijzen van het verzoek voor de voorlopige voorziening kan aangevangen worden met oliegebruik. Pas na het formeel (wederom) in werking treden van het Winningsplan 2018 zal dit hoofdstuk aangevuld worden en ter beoordeling bij het SodM worden aangeboden. Er zal korte tijd olie (Surdyne of een gelijkwaardig alternatief) worden gebruikt voor het beschermen van het halietsdak van de nieuwe cavernes, maar waar wel getracht wordt haliets/kieseriet tussenlagen in de bischofiet of carnalliet lagen nabij het boorgat op te lossen, die tussen het injectie- en productiepunt liggen. De oliebalans en registratie (en rapportage) wordt opgenomen in een volgende versie van dit document. De putten VE-5 en VE-7 zijn weggezet met Surdyne in de annulus en het boorgat in het zout.

Er wordt geen dakolie gebruikt in de bestaande cavernes (en putten daarheen).

6. Rapportage en updates

6.1. Ieder Kwartaal

Rapportage van cavernegroottes, squeeze, oliegebruik en bodemdaling worden (als update van dit document) aan het SodM gezonden en zo snel mogelijk 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 met de InSAR data en updates van theoretische komvormen. Dit heeft geresulteerd in Figuur 4.7, waarin de overeenstemming vanaf 2016 (aanvang nauwkeurige Insar data) zeer goed is voor de West-Oost richting, waar slechts weinig verstoring is door bodemdaling als gevolg van gaswinning. Op basis van de meest recente inzichten wordt ook de bodemdalingsvoorspelling voor 2045 zonodig aangepast en gedeeld met alle relevante overheden. Dit zal niet eerder gebeuren dan dat de goedkeuring op het Winningsplan 2018 definitief is (en de randvoorwaarden van winning aldus bekend zijn), vermoedelijk medio Q4 2023.

6.3. Update van dit document

De tabellen in dit document worden ieder kwartaal geüpdatet. Een inhoudelijke wijziging zal naar verwachting na een eerste uitspraak van de Raad v State plaatsvinden, medio 2023, maar voorafgaand aan de actieve waterinjectie (en Surdyne gebruik voor halietaak bescherming). 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/of op Mijnbouwvergunningen.nl.

- [1] Nedmag - Winningsplan 2018, 28 november 2018
- [2] Nedmag - Aanvulling Winningsplan 2018, 16 september 2019
- [3] Instemmingsbesluit (hernieuwd) Winningsplan 2023

Appendix A Compressibiliteitsberekening cluster en TR-9

In december 2022 is de convergentiesnelheid van het cluster teruggelopen naar 33 m³/h bij dezelfde cavernedruk die sinds juni 2018 wordt aangehouden (met drukschommelingen tot 2 bar), met destijds 70 m³/h aan convergentiesnelheid. In figuur A staan de aangenomen ondergrondse vrije-pekervolumes van bischofietpekel (1b laag) en carnallietpekel (2b/3b laag) afgezet tegen de convergentie(kruip) snelheid. Er wordt geschat dat de 2b/3b-carnallietsectie met 4-7 m³/h bijdraagt aan de convergentie.

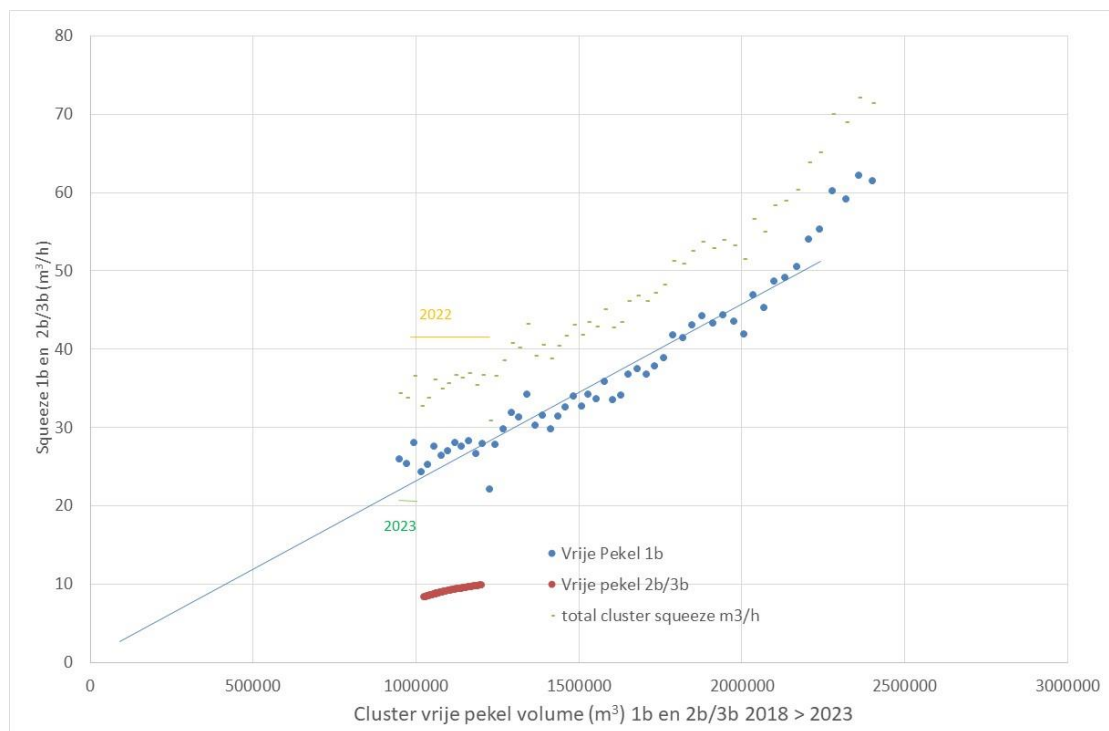


Fig A.1 Convergentiesnelheid van TR-cluster bij bijna constante cavernedruk als functie van het geschatte vrije volume van de 1b (bischofiet) sectie en de 2b/3b carnallietsectie. Aan de rechterzijde is medio juni 2018 met 70 m³/h convergentie en de linkerzijde maart 2023 met 33 m³/h. De meeste convergentie komt uit de bischofiet-sectie, waar aangenomen wordt dat de carnallietsectie langzamer convergeert met circa 8- m³/h.

Put TR-2 (die niet voor productie en injectie wordt gebruikt) is leidend voor de drukmetingen, omdat temperatuurschommelingen in andere putten (opwarmen door productie en afkoeling door injectie of insluiten put) tot 2 bar drukschommelingen geven door dichtheidsveranderingen van water of pek in de putten.

De compressibiliteit van het cluster wordt gemeten door het cluster 24 tot 48 uur in te sluiten. De druk loopt dan op met 1 tot 2 bar door doorgaande kruip en er kan worden aangenomen dat de kruipsnelheid slechts beperkt afhankelijk is van 1 tot 2 bar drukschommelingen.

Figuur A.2 laat de drukstijging zien van 24 uur insluiten (van 16:48 tot exact 2 dagen later). De druk in TR-2 stijgt 1,5 bar, mede bevestigd door put TR-7 (ook buiten gebruik). Putdrukken worden met een nauwkeurigheid van 0,1 bar geregistreerd. De druk na 48 uur daalt weer door een squeezeproductie van iets boven het dec 2022 evenwicht (34 m³/h)

De drukopbouw is niet volledig lineair, deels door een hogere cavernedruk en deels door hysteresis-effect (vermoedelijk te wijten aan transiente kruip-effecten (primary creep), die een beperkt rol spelen in het lange termijn effect.

Wanneer we aannemen dat de convergentie 33 m³/h voor 48 uur bedraagt, is de compressibiliteit 1050 m³/bar. Wanneer we een gemiddelde van 30 m³/h aannemen (van 33 naar 27 m³/h over 48 uur), bedraagt de stijfheid 960 m³/bar. Een redelijke aanname voor de compressibiliteit van december 2022 is 1000 m³/bar.

Vermoedelijk zal de compressibiliteit in de komende 5 jaar afnemen, naar circa 500 m³/bar, afhankelijk van de gekozen cavernedruk (en daarmee de convergentiesnelheid). Dit zal minstens ieder jaar worden gemeten.

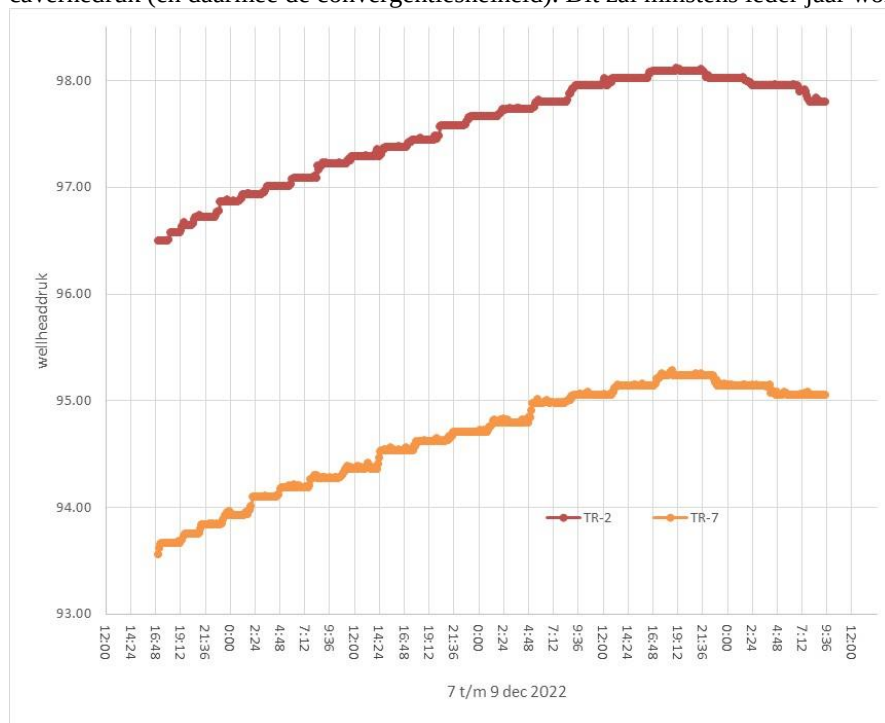


Fig A.2 Drukverloop van insluittest in (inactieve) putten TR-1,2 en 7. Het drukverloop van TR-2 wordt leidend geacht, maar wordt gesteund door het drukverloop van TR-7.. Drukken worden in eenheden van 0.1 bar gemeten, dus vandaar de sprongen.

Put TR-9 heeft in december 2022 een convergentiesnelheid van 1.4 m³/h bij een totaal berekend pekervolume van 350.000 m³, waarvan een berekende 170.000 m³ gebonden pek en hoogstens 180.000 m³ vrije (te squeeze) pek. Een fit tussen convergentie en gemiddelde convergentiesnelheid toont slechts circa 30.000 m³ vrije pek aan. Het kleinere volume en de minder platte vorm (van TR-9 vergeleken met het cluster) geeft vermoedelijk een kleiner relatief squeeze-potentieel. Dat kan natuurlijk groter worden naarmate TR-9 in volume groeit, als het is toegestaan water of onverzadigde pek (uit bijvoorbeeld VE-5 of VE-7) te injecteren.

De compressibiliteit van TR-9 is in december 2022 bepaald op 110-114 m³/bar. Tijdens een drukaflaat van circa 4 bar over 12 uur (Figuur A3 van 16:48 tot 4:48) is 12 uur lang 38m³/h volume afgelaten (productie minus dilutie). Bij verwaarlozing van de zoutkruip levert dit 114 m³/bar. Indien een caverneconvergentie door kruip wordt afgetrokken is dit circa 110 m³/bar. Indien de caverne TR-9 groeit naar (een volgens aanvulling Winningsplan 2018) geschat volume vrije pek van 440.000 m³ vrije pek (en een totaal ondergronds pekervolume van circa 1.000.000 m³), zal de compressibiliteit vermoedelijk verdrievoudigen tot circa 300 m³/bar. Deze waarden zullen periodiek (maar minstens 1 maal per jaar) worden gemeten.

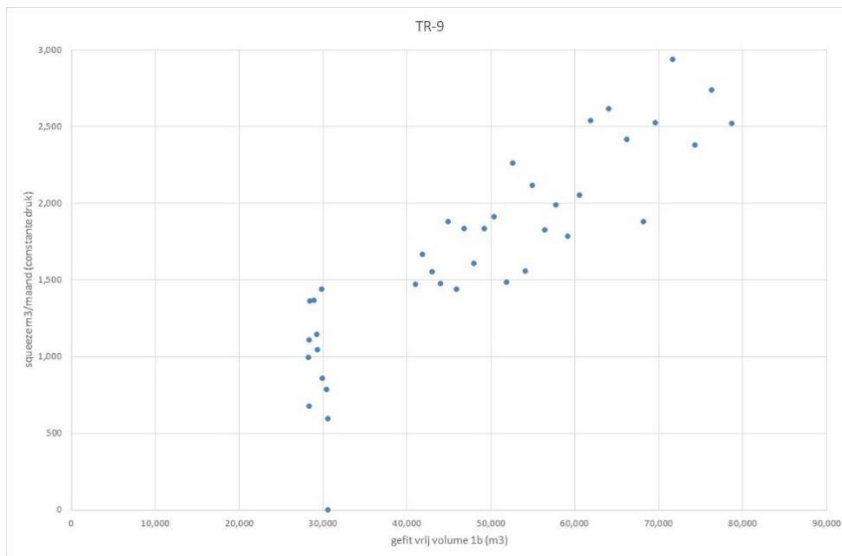


Fig A3 Convergentie (zoutkruip) van TR-9 op circa 1000 m³/maand (1.4 m³/h). Nov 2022 waarden aan de linkerszijde.

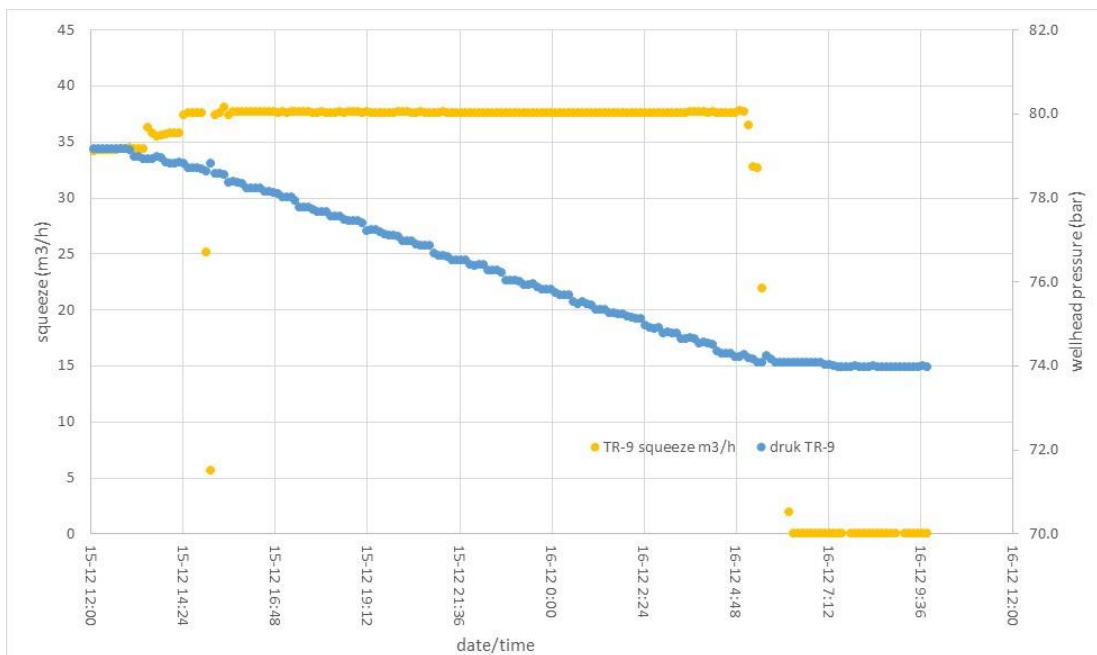


Fig A4 Drukdaling versus netto productie uit TR-9 in dec 2022. De daling bij een constante productie van 38m³/h tussen 15-12 16:48 en 16-12 4:48 (12 uur en 456 m³) bedraagt 4 bar, ofwel 114 m³/bar.