

# MEMO



**Van:** Nedmag. Behandeld door: [naam] en [naam]  
**Aan:** SodM: [naam]  
Ministerie van EZK: [naam]

**Datum:** 21 februari 2019  
**Onderwerp:** Beantwoording vragen Staatstoezicht op de Mijnen zoals verwoord in de memo "NEDMAG VEENDAM – Vragen voor Nedmag rond winningsplan", d.d. 7 februari 2019

## Inleiding

Deze notitie beantwoordt de vragen van SodM, n.a.v. de bestudering door hen van het op 28 november 2018 door Nedmag bij het Ministerie van EZK ingediende Winningsplan 2018. De beantwoording vindt vraag voor vraag plaats. Bijgevoegd zijn:

- de memo met vragen van SodM
- een memo van het KNMI over de minimum magnitude die een eventueel seismisch event moet hebben om te kunnen worden gesignaleerd, alsmede over de nauwkeurigheid waarmee de locatie van een eventueel seismisch event kan worden bepaald. Dit alles na de installatie van een nieuwe geofoon, die door Nedmag geïnstalleerd en vervolgens aan het KNMI overgedragen wordt.

## Beantwoording vragen

### ***Hoeveel vrije pekkel was er in het cavernestelsel op het moment van de lekkage? Hoe groot is de onzekerheid hiervan?***

Op het moment van de lekkage was er totaal 4.4 Mm<sup>3</sup> vrije pekkel aanwezig in alle cavernes, waarvan 3.7 Mm<sup>3</sup> in het cluster. De onzekerheid is maximaal 6 %, zie ref. 9 bij het Winningsplan 2018.

### ***Hoeveel vrije pekkel heeft Nedmag daar momenteel van opgepompt? Hoeveel verwacht Nedmag nog op te kunnen pompen?***

De hoeveelheid vrije pekkel in het TR-cluster is sinds het incident t/m januari 2019 met ca. 0,5 Mm<sup>3</sup> afgenomen: max. 0,1 Mm<sup>3</sup> is afgelekt, ruim 0,4 Mm<sup>3</sup> is gewonnen. Daarnaast is er 20.000 m<sup>3</sup> vrije pekkel afgelaten uit VE-3 en TR-9. Eind januari was de hoeveelheid vrije pekkel in Nedmag's cavernes dus 3,9 Mm<sup>3</sup>, waarvan 3,2 Mm<sup>3</sup> in het cluster. Het streven is laatstgenoemde hoeveelheid de komende decennia te winnen. De verwachting is dat een groot deel gewonnen kan worden. De lengte van de daarvoor benodigde periode, wordt met name bepaald door de tijd die nodig is voor de winning van de vrije pekkel in de bovencavernes van het cluster (de cavernes in de Zechstein III 2b en 3b laag). De winning vindt overigens niet plaats door pekkel op te pompen, maar door pekkel af te laten uit het onder druk staande cluster.

***Welke maatregelen kunnen worden genomen om zo veel mogelijk vrije pekels uit het cluster te pompen?***

Nedmag heeft een workover-strategie ontwikkeld om voldoende winningsputten ter beschikking te hebben voor het aflaten van het cluster. Daarnaast zal geleidelijk de druk in het cluster worden verlaagd. Dit alles om zoveel mogelijk vrije pekels uit het cluster af te laten. Het boren van nieuwe winningsputten naar het cluster is niet opportuun. De winningsputten die met het cavernecuster in verbinding staan zijn voldoende ruimtelijk verdeeld.

***Gaat het bij de 450.000 m<sup>3</sup> ook om vrije pekels, of is dit inclusief het pekelsvolume dat in de sump zit? Hoe groot is de cavernes (inclusief sump) op dat moment?***

De 450.000 m<sup>3</sup> is het totaal van vrije pekels en pekels in de sump (gebonden pekels) in een nieuwe cavernes aan het einde van fase 0. Het volume aan zout dat op dat moment is opgelost bedraagt ongeveer 470.000 m<sup>3</sup> en ten gevolge van een licht sublithostatische druk in de cavernes is er tot dat moment ca. 20.000 m<sup>3</sup> convergentie opgetreden.

***Wat is dit maximaal gewenst volume? Is dit inclusief de sump en/of de gebonden pekels?***

Het maximaal gewenste volume vrije pekels zoals genoemd onder fase 1 (actieve winning) bedraagt 1,5 Mm<sup>3</sup>, zie Winningsplan 2018 ref. 11, pagina 28, laatste alinea.

***Waarop is die 450.000 m<sup>3</sup> en/of het maximum gewenst volume gebaseerd?***

Bij het genoemde volume van ca. 450.000 m<sup>3</sup>:

- is de menging van water met in de cavernes aanwezige bischofitische pekels zodanig, dat op een veilige verticale afstand boven het injectiepunt (voldoende ver onder de Zechstein III 2a laag) de concentratie magnesiumchloride in het mengsel hoog genoeg is om oplossen van haliet te voorkomen
- is de cavernes voldoende horizontaal ontwikkeld en is ook voor dat doel het gebruik van diesel niet meer nodig
- is de cavernes groot genoeg om te gaan squeezezen. Waarbij de snelheid van convergentie initieel overigens nog niet zo groot is, als gevolg van de bescheiden omvang van de cavernes en de relatief hoge druk erin.

Voor de bepaling van het benodigde (en ter beperking van risico's dus tevens maximaal gewenste) cavernes-volume, zijn diverse factoren van belang:

- een cavernes moet na de ontwikkelfase (fase 0) groot genoeg zijn om zonder diesel te kunnen worden bedreven
- er moet voldoende contactoppervlak tussen cavernespekels en bischofiet in het omliggende zout zijn om de gewenste hoeveelheid bischofiet op te lossen
- de verblijftijd in de cavernes moet lang genoeg zijn om pekels van de gewenste kwaliteit te produceren

- bij de benodigde productiecapaciteit en een druk die hoog genoeg is om de pekels te kunnen winnen, moet het volume van de cavernes groot genoeg zijn om voldoende te kunnen squeezezen, ter compensatie van de cavernegroei door oplossing.

Op basis hiervan is voor de actieve winning een cavernegrootte voorzien van maximaal 1,5 Mm<sup>3</sup> vrije pekels.

***Wat gebeurt er, wanneer een veel kleinere cavernes (bv 100.000 m<sup>3</sup>) onder lage druk wordt geopereerd?***

Een kleine cavernes op lage druk heeft een te kleine capaciteit en/of levert pekels van een te lage kwaliteit. Bovendien kan hij niet zonder diesel bedreven worden.

***Klopt het dat Nedmag hiermee toch nieuwe winning uit het grote cluster voorstelt? Om hoeveel magnesiumzout gaat het hier?***

Bij de ontwikkeling van nieuwe cavernes, ontstaat er vrijwel altijd een zekere hoeveelheid pekels met een relatief lage kwaliteit, zoals carnallitische pekels. Dit doordat de cavernes nog klein is of doordat er om andere redenen onvoldoende contact is tussen pekels in de cavernes en bischofiet in het omliggende gesteente. Deze pekels met een relatief lage kwaliteit kan slechts worden ingezet of verkocht nadat hij is naverzadigd, tot bischofitische pekels.

Herinjectie van carnallitische pekels in het grote cluster heeft een beperkte winning uit het cluster tot gevolg. Gebaseerd op de ervaringen met de ontwikkeling van TR-9, gaat het om max. 100.000 m<sup>3</sup> herinjectie van pekels, per nieuw te ontwikkelen cavernes: een groot deel van de in fase 0 (ontwikkeling cavernes) geproduceerde pekels is reeds geschikt voor verdere verwerking. Voor 4 cavernes gaat het dus om max. 400.000 m<sup>3</sup>. De pekels die geherinjecteerd wordt, bevat reeds meer dan 20% magnesiumchloride. Als deze naverzadigd wordt in het cluster lost er bischofiet op, maar slaat tegelijkertijd carnalliet, haliet en kieseriet neer. Om de druk in het cluster constant te houden wordt parallel aan de injectie in totaal 450.000 m<sup>3</sup> bischofitische pekels aan het cluster onttrokken. Tijdens dit proces ontstaat er ca. 200.000 m<sup>3</sup> vrije pekels. Het uiteindelijk aflaten van deze vrije pekels veroorzaakt nog ca. 1 cm bodemdaling. Deze is onderdeel van de in het winningsplan geprognoseerde bodemdaling.

***Wat zijn de risico's van deze herinjectie? Hoe zit het met mogelijke verstopping van putten doordat bij de toevoer van NaCl pekels zout neerslaat bij de put? In hoeverre vertraagt deze herinjectie het leegproduceren van het cluster?***

Het belangrijkste risico is het ongewenst verhogen van de druk in het cluster. Dit wordt voorkomen door tijdens de herinjectie tegelijkertijd bischofitische pekels uit het cluster af te laten. Bij de herinjectie worden geen verstoppingsproblemen voorzien. De duur van het leegproduceren van het cluster wordt bepaald door de snelheid waarmee de bovenzakken convergeren. De herinjectie van pekels in de onderzakken, waarbij enige vrije pekels in de onderzakken gevormd wordt, levert daarom geen vertraging op voor het leegproduceren van het cluster.

***Wat zijn de alternatieven? Kan door langzamer loging of eerder overgaan op squeeze bij lagere druk de herinjectie verminderd of vermeden worden?***

Uiteraard is het doel direct bischofitische pekkel te produceren, omdat dit efficiënter is. Nedmag zal alleen pekkel herinjecteren voor naverzadiging, indien er (bij de ontwikkeling van nieuwe cavernes) pekkel geproduceerd is die niet verwerkt of verkocht kan worden zonder naverzadigd te zijn. De herinjectie zorgt voor een omzetting naar pekkel die dat wél is.

In hoeverre er bij de ontwikkeling van nieuwe cavernes carnallitische pekkel ontstaat, wordt vooral bepaald door de mate van contact tussen cavernepikkel en bischofiet in de cavernewand. De snelheid van logen of mate van squeeze zijn veel minder van belang. Het afhangen van de productie- en injectietubings in nieuwe winningsputten, gebeurt op basis van de aanwezigheid van de diverse zouten in de 1b laag. Deze wordt vastgesteld via het nemen en analyseren van zoutkernen tijdens het boren van nieuwe winningsputten. Zodoende kunnen de beste afhanghoogtes voor de injectie- en productietubing worden bepaald, en wordt de kans op de directe productie van een bruikbare bischofitische pekkel gemaximaliseerd.

***Kan het cluster worden ontzien door sequentieel aanleggen van cavernes, dus bv eerst VE-5 en VE-6 met injectie in VE-3/TR-9, vervolgens logen van VE-7 en VE-8 met injectie in VE-5 en VE-6?***

VE-3 levert pekkel van een matige kwaliteit die al niet zonder meer te verwerken is. Herinjectie in VE-3 leidt dus niet tot de benodigde naverzadiging. Herinjectie van pekkel in TR-9 is in theorie mogelijk, maar zal zich in de praktijk moeten bewijzen. Mogelijk kan een deel van de herinjectie in TR-9 plaatsvinden. Wat daarbij meespeelt is dat TR-9 een enkele caveerne is, waardoor er een kans op kortsluiting tussen injectie en productie aanwezig is. De geïnjecteerde carnallitische pekkel zou in dat geval (deels) met de geproduceerde bischofitische pekkel kunnen opmengen, waardoor de pekkel uit TR-9 een te lage kwaliteit krijgt. Bij herinjectie in het cluster wordt carnallitische pekkel in de ene winningsput geïnjecteerd en wordt bischofitische pekkel via een andere winningsput geproduceerd, waardoor kortsluiteffecten niet optreden. Of qua infrastructuur de herinjectie van pekkel uit VE-7 en -8 in VE-5 en -6 mogelijk is, dient nader onderzocht te worden. Tevens zal t.z.t. duidelijk worden of de nog te ontwikkelen cavernes van VE-5 en -6 zich lenen voor de naverzadiging.

De optie tot naverzadiging in het cluster is dus nodig voor pekkel die niet in TR-9/VE-5/VE-6 geherinjecteerd kan worden.

***Heeft Nedmag in het verleden de ontwikkeling van de initiële vorm van de caveerne gemonitord om het nut van dieselgebruik te valideren? Zijn er bijvoorbeeld sonar-metingen gedaan?***

In de jaren 1980 en 1990 zijn diverse sonarmetingen gedaan in cavernes die met gebruikmaking van diesel waren ontwikkeld. De vorm van de gemeten cavernes was ruwweg een conus op de kop. Dit betekent dat het gebruik van diesel er inderdaad voor zorgt dat opwaartse loging voorkomen en zijwaartse loging gestimuleerd wordt. De functie van diesel bij de ontwikkeling van cavernes is het voorkomen van ongewenste opwaartse loging.

***Wanneer er geen sprake meer is van een simpel-vormige caverne, hoe is dan nut en noodzaak van dieselolie uit te leggen?***

De functie van diesel tijdens de ontwikkeling van een caverne is voorkomen van het oplossen van haliet uit de 2a laag en het voorkomen van het ontstaan van een caverne met een zeer kleine diameter.

***Voor de ontwikkeling van een initiële caverne (van 100.000 m<sup>3</sup>) wordt 400 m<sup>3</sup> dieselolie als benodigd genoemd. Waar blijft de overige 2300 m<sup>3</sup>?***

De overige 2300 m<sup>3</sup> is benodigd bij de verdere ontwikkeling van een initiële caverne van 100.000 m<sup>3</sup> tot een caverne van 450.000 m<sup>3</sup>. Het verbruik is niet recht evenredig met de toename van het volume van de caverne.

***Wat wordt precies bedoeld met een ton zout? Is dat zout in de vorm waarin het ondergronds zit (daar bevat het nog een aanzienlijke hoeveelheid water), het genoemde MgCl<sub>2</sub>·6(H<sub>2</sub>O) of wordt met een ton zout puur MgCl<sub>2</sub> bedoeld?***

Met een ton zout wordt een ton pure (watervrije) MgCl<sub>2</sub> bedoeld.

***Wat is de detectiegrens van het meetstation op de locatie van het huidige cavernecluster en op de locatie van de nieuwe cavernes?***

Op alle drie genoemde locaties is de locatiegrens een magnitude van ca. 0,2. Zie het bijgevoegde memo van het KNMI. Deze locatiegrens wordt mede bereikt middels de nieuwe geofoon, die op aangeven van het KNMI door Nedmag op enkele honderden meters ten zuiden van Well Head Centre 2 wordt geplaatst, en vervolgens aan het KNMI wordt overgedragen. De echte detectiegrens ligt lager dan een magnitude van ca. 0,2, maar die kleinere detecties kunnen niet goed gelokaliseerd worden.

***Wat is de locatieonzekerheid voor een event van magnitude 1,0 op de locatie van het cavernecluster en op de locatie van de nieuwe cavernes?***

De afmetingen van de laterale ellips waarbinnen het epicentrum van een eventueel seismisch event met magnitude 1 zich met 95% waarschijnlijkheid bevindt, bedragen op

- de locatie van het cavernecluster ca. 900x700 m
- de locatie van VE-5/6 ca. 1050x800 m
- de locatie van VE-7/8 ca. 1400x800 m.

De nauwkeurigheid waarmee de diepte geschat kan worden, is voor de locaties van het cavernecluster en van VE-5/6 vergelijkbaar met de nauwkeurigheid waarmee de diepte van andere events binnen het Groningen netwerk kan worden geschat. Voor de locatie van VE-7/8 is de schatting van de diepte iets onnauwkeuriger. Zie ook de bijgevoegde memo van het KNMI.



# memo

NEDMAG VEENDAM - Vragen voor Nedmag rond  
winningsplan

## Cavernevolumen

Het totaal aanwezige pekervolume in de caverne is een belangrijke factor in de ernst van een eventueel optredende scheur in het dak.

Bij de winning door Nedmag vormt zich onderin de caverne een hoeveelheid vaste stof, gevormd door gevallen brokstukken van minder/niet oplosbaar materiaal en neerslag van zouten uit de oplossing. Deze onderste laag in de caverne wordt de "sump" genoemd. Tussen het vaste materiaal in deze laag bevindt zich pekkel. Nedmag spreekt hier van gebonden pekkel. Wanneer een volume beschreven wordt in het winningsplan is het niet altijd duidelijk of sprake is van enkel vrije pekkel, totale pekkel (vrije en gebonden pekkel) of het totaal caverne-volume (vrije pekkel, gebonden pekkel en vaste stof van sump).

- Hoeveel vrije pekkel was er in het cavernestelsel op het moment van de lekkage? Hoe groot is de onzekerheid hiervan?
- Hoeveel vrije pekkel heeft Nedmag daar momenteel van opgepompt? Hoeveel verwacht Nedmag nog op te kunnen pompen?
- Welke maatregelen kunnen worden genomen om zo veel mogelijk vrije pekkel uit het cluster te pompen?

Voor het eind van fase 0 (loging onder bijna-lithostatische druk) wordt een volume van 450.000 m<sup>3</sup> pekervolume genoemd (p.20). Vervolgens staat bij fase 1 (de actieve winning) een 'maximaal gewenste volume vrije pekkel' genoemd, maar niet gespecificeerd.

- Gaat het bij de 450.000 m<sup>3</sup> ook om vrije pekkel, of is dit inclusief het pekervolume dat in de sump zit? Hoe groot is de caverne (inclusief sump) op dat moment?
- Wat is dit maximaal gewenste volume? Is dit inclusief de sump en/of de gebonden pekkel?
- Waarop is die 450.000 m<sup>3</sup> en/of het maximum gewenste volume gebaseerd?
- Wat gebeurt er, wanneer een veel kleinere caverne (bv 100.000 m<sup>3</sup>) onder lage druk wordt geopereerd?

### **Herinjectie onverzadigde of carnallitische pekkel**

Het winningsplan spreekt van herinjectie van de initiële pekkel in de TR putten. Dit is nodig omdat de pekkel niet alleen magnesiumzout, maar ook Natrium en Kaliumzouten bevat. Door dit te injecteren in de magnesium-verzadigde bestaande cavernes slaan andere zouten neer, en lost magnesium op.

- Klopt het dat Nedmag hiermee toch nieuwe winning uit het grote cluster voorstelt?
- Om hoeveel magnesiumzout gaat het hier? Ik snap dat het niet mogelijk is exact te voorspellen wat de verdeling van de verschillende zoutlagen is op de plek van nieuwe cavernes, maar een inschatting moet toch te maken zijn, op basis van de ervaring bij andere putten of desnoods een maximum op basis van grotendeels andere zouten bij de nieuwe cavernes. Potentieel heb je het dan over maximaal  $4 * 450.000 \text{ m}^3$ , dus 1,8 miljoen  $\text{m}^3$ . Dat zijn serieuze hoeveelheden, die expliciet vermeld moeten worden.
- Wat zijn de risico's van deze herinjectie? Hoe zit het met mogelijke verstopping van putten doordat bij de toevoer van NaCl pekkel zout neerslaat bij de put? In hoeverre vertraagt deze herinjectie het leegproduceren van het cluster?
- Wat zijn de alternatieven? Kan door langzamer logging of eerder overgaan op squeeze bij lagere druk de herinjectie verminderd of vermeden worden?
- Kan het cluster worden ontzien door sequentieel aanleggen van cavernes, dus bv eerst VE-5 en VE-6 met injectie in ve3-tr9, vervolgens logen van VE-7 en VE-8 met injectie in VE-5 en VE-6?

### **Gebruik van dieselolie**

Nedmag noemt het gebruik van dieselolie essentieel voor de breedte-ontwikkeling van de cavernes. Tegelijkertijd spreekt het winningsplan van dunne lagen magnesiumzout, afgewisseld met andere lagen. Het beeld van een eenvoudige holruimte, met een dunne laag dakolie bovenin, en daardoor logging aan de zijkanten wordt opgevoerd tegelijk met een verhaal over lastig doordringbare lagen met veel vast neergeslagen zout, en een complexe cavernevorm met bochten en hobbels.

- Heeft Nedmag in het verleden de ontwikkeling van de initiële vorm van de caverne gemonitord om het nut van dieselgebruik te valideren? Zijn er bijvoorbeeld sonar-metingen gedaan?
- Wanneer er geen sprake meer is van een simpel-vormige caverne, hoe is dan nut en noodzaak van dieselolie uit te leggen?

- Voor de ontwikkeling van een initiele caverne (van 100.000 m<sup>3</sup>) wordt 400 m<sup>3</sup> dieselolie als benodigd genoemd. Waar blijft de overige 2300 m<sup>3</sup>

### Eenheden

Het winningsplan hanteert diverse eenheden waarmee op de een of andere manier een hoeveelheid zout aangeduid wordt. Het zou helpen, wanneer een kort stukje aangeleverd kon worden, waarin de verhouding tussen een m<sup>3</sup> steenzout, een m<sup>3</sup> pekel, en een ton magnesiumzout wordt verhelderd.

- Wat wordt precies bedoeld met een ton zout? Is dat zout in de vorm waarin het ondergronds zit (daar bevat het nog een aanzienlijke hoeveelheid water), het genoemde  $MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$  of wordt met een ton zout puur  $MgCl_2$  bedoeld?

### Seismiciteit

Voor het monitoren van de (micro-)seismiciteit rond de cavernes gaat Nedmag een monitoringsstation plaatsen.

- Wat is de detectiegrens van het meetstation op de locatie van het huidige cavernelcluster en op de locatie van de nieuwe cavernes?
- Wat is de locatieonzekerheid voor een event van magnitude 1,0 op de locatie van het cavernelcluster en op de locatie van de nieuwe cavernes?



Royal Netherlands  
Meteorological Institute  
Ministry of Infrastructure  
and Water Management

# Detection and location thresholds for scenario events at existing and planned Nedmag salt caverns

KNMI, R&D Seismology and Acoustics

February 20, 2019

## Introduction

Nedmag is planning to mine two new salt caverns: VE-5/6 and VE-7/8. Also, Nedmag is commissioning the installation of a new seismic station, which we christen for the moment as *GNM*. In this short note, the impact of the new borehole station on the location threshold for induced seismicity in the Veendam region is assessed. Furthermore, the location uncertainty is assessed in case local magnitudes  $M_L$  1.0 earthquakes would occur at the new mining sites, or at the existing mining site TR-1.

## Location threshold

The new borehole station *GNM* is planned at the following location: [RDx RDy]=[252.210 570.780] km, as indicated with the red dot on Fig. 1. The 200 m depth geophone is used for detection and location. The noise level at 200m depth is assumed to be comparable to the level at the other borehole stations in the region. In addition to the main existing production location, as indicated with a pink dot in Fig. 1, two new production clusters are planned: VE5/6 and VE7/8. The former approximately 2.8 km west from the current production cluster, the latter app. 2.4 km to the southwest. The three production clusters are indicated in green in Figs. 2 and 3.

Fig. 2 shows the current situation without the planned station. The production clusters fall within the  $0.2 < M_L < 0.4$  range. This means that with the current network all events of minimum magnitude between 0.2 and 0.4 (dependent on production site) can be detected and located. In the new situation (Fig. 3) all production sites fall within the  $M_L = 0.2$  range.

Addition of one station south of the existing borehole network would have an impact on the location uncertainty, especially for VE7/8 (see next sections), but will improve the location threshold only marginally.

## Epicentral uncertainty

We assume that the earthquakes would be detected and located with P waves. From a database of Groningen seismicity, we determine until which distances P-waves can be detected and picked. For  $M_L = 1.0$  events we find a maximum distance of  $19.7 \pm 7.6$  km, where 7.6 is the standard

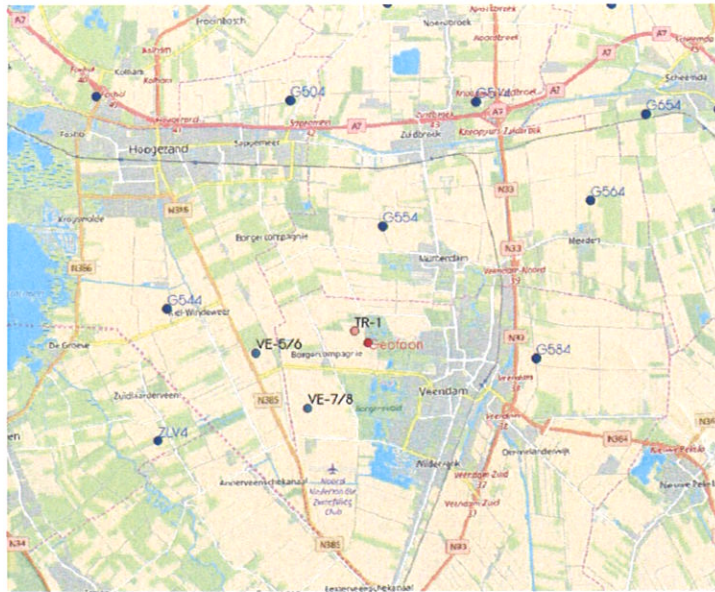


Figure 1: Overview of the Veendam area with a current Nedmag mining site (TR-1), existing KNMI borehole stations (blue dots), two planned Nedmag mining sites (grey dots) and a planned Nedmag borehole station (red dot). Background map is from [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).

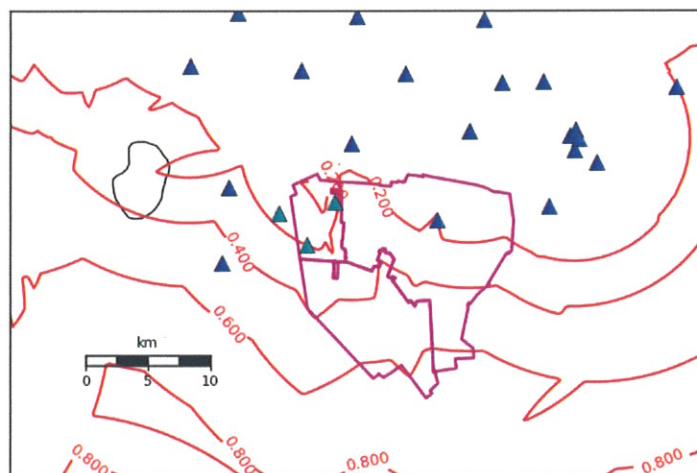


Figure 2: Location threshold contours expressed in  $M_L$  (red) based on existing borehole stations (blue) in the Veendam region. Salt caverns are shown in green and the Veendam community borders in purple.

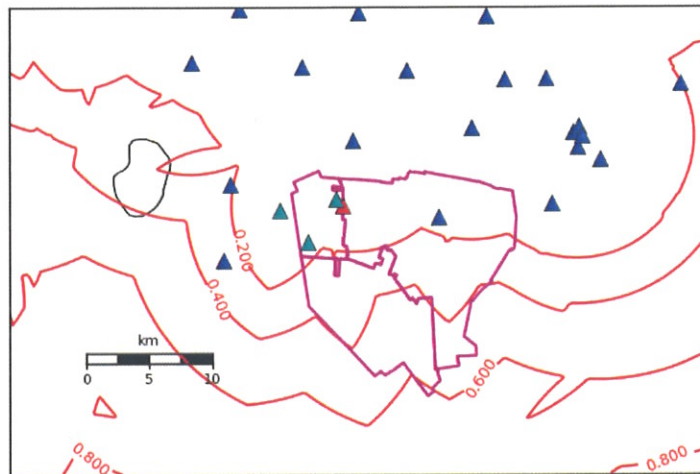


Figure 3: Location threshold contours expressed in  $M_L$  (red) based on existing (blue) and a planned (red) borehole stations. For further description, see Fig. 2.

deviation over events that occurred between January 2015 and December 2018. To have a conservative assessment of the location uncertainty, we include all KNMI stations that are within  $19.7-7.6=12.1$  km radius. Moreover, we assume that the planned seismic station *GNM* has already been installed. Furthermore, we assume the same velocity model and traveltime error as determined from a recent event near Veendam ( $M_L = 1.3$ , 07-01-2019:11:12:49.2). This error incorporates both the local variations of the velocity field as well as picking errors. The traveltime error is propagated further into epicentral probability density functions (PDFs), from which the 95% confidence regions are shown.

### Scenario TR-1

In this section we assess the epicentral uncertainty for a scenario event at the existing mining site TR-1 (Fig. 1). Fig. 4 shows the seismic sensors where manual P-wave picks would be available for this event. A grid search is done for a region around the Hypocenter solution, as indicated by the red box in Fig. 4. In the first step, equal differential time (EDT, Zhou, 1994) residuals are computed. That is, for each grid point and for each station combination, the traveltime differences are forward modelled and tabulated. From these values, the observed traveltime differences are subtracted to obtain the EDT residuals. In the second step, the PDF (Tarantola, 2005) is derived from the EDT residuals, using a L1 norm. Fig. 5 shows the 95% confidence area of the resulting PDF.

In the following, the relevant input and output is listed. The scenario epicenter is listed both in wgs84 and in the Dutch national triangulation system (RD). Also a gridded version of the 95% confidence contour of the PDF, and its major and minor axes, can be found.

Epicenter in wgs84 [deg ]: 6.834, 53.118

Epicenter in RD [m ]: 251850, 571100

PDF major axis [m ]: 919

PDF minor axis [m ]: 694

Orientation of the PDF ellipse [deg ]: -3.3

95% confidence contour RDx [m ]: 251816, 251850, 251900, 251920, 251950, 252000, 252015, 252050, 252061, 252093, 252100, 252122, 252145, 252150, 252170, 252187, 252196, 252200, 252200, 252196, 252187, 252171, 252150, 252146, 252117, 252100, 252076, 252050, 252018, 252000, 251950, 251914, 251900, 251850, 251800, 251750, 251745, 251700, 251650, 251650, 251600, 251599, 251562, 251550, 251537, 251518, 251508, 251503, 251501, 251503, 251508, 251517, 251532, 251550, 251554, 251577, 251600, 251611, 251650, 251653, 251700, 251709, 251750, 251800, 251816

95% confidence contour RDy [m ]: 570600, 570592, 570594, 570600, 570608, 570636, 570650, 570686, 570700, 570750, 570763, 570800, 570850, 570863, 570900, 570950, 571000, 571050, 571100, 571150, 571200, 571250, 571289, 571300, 571350, 571371, 571400, 571426, 571450, 571464, 571490, 571500, 571506, 571515, 571514, 571502, 571500, 571485, 571450, 571450, 571401, 571400, 571350, 571324, 571300, 571250, 571200, 571150, 571100, 571050, 571000, 570950, 570900, 570862, 570850, 570800, 570766, 570750, 570703, 570700, 570656, 570650, 570621, 570603, 570600

## Scenario VE-5/6

In this section we assess the epicentral uncertainty for a scenario event at the planned mining site VE-5/6. Fig. 6 shows the seismic sensors where manual P-wave picks would be available for this event. A grid search is done for a region around the Hypocenter solution, as indicated by the red box in Fig. 6. Fig. 7 shows the 95% confidence area of the resulting PDF.

In the following, the relevant input and output is listed. The scenario epicenter is listed both in wgs84 and in the Dutch national triangulation system (RD). Also a gridded version of the 95% confidence contour of the PDF, and its major and minor axes, can be found.

Epicenter in wgs84 [deg ]: 6.793, 53.113

Epicenter in RD [m ]: 249150, 570500

PDF major axis [m ]: 1049

PDF minor axis [m ]: 803

Orientation of the PDF ellipse [deg ]: -22.4

95% confidence contour RDx [m ]: 249132, 249150, 249200, 249250, 249300, 249350, 249354, 249400, 249435, 249450, 249482, 249500, 249514, 249537, 249550, 249551, 249564, 249571, 249573, 249571, 249565, 249553, 249550, 249541, 249525, 249500, 249500, 249476, 249450, 249441, 249400, 249398, 249350, 249344, 249300, 249268, 249250, 249200, 249150, 249100, 249050, 249000, 248950, 248918, 248900, 248852, 248850, 248808, 248800, 248776, 248756, 248750, 248740, 248730, 248726, 248727, 248733, 248745, 248750, 248759, 248776, 248800, 248803, 248830, 248850, 248865, 248900, 248909, 248950, 248961, 249000, 249028, 249050, 249100, 249132

95% confidence contour RDy [m ]: 570000, 569993, 569980, 569977, 569982, 569998, 570000, 570022, 570050, 570063, 570100, 570127, 570150, 570200, 570248, 570250, 570300, 570350, 570400, 570450, 570500, 570550, 570559, 570600, 570650, 570700, 570700, 570750, 570787, 570800, 570848, 570850, 570896, 570900, 570934, 570950, 570961, 570981, 570992, 570996, 570996, 570995, 570987, 570969, 570950, 570940, 570900, 570898, 570850, 570838, 570800, 570750, 570728, 570700, 570650, 570600, 570550, 570450, 570437, 570400, 570350, 570307, 570300, 570250, 570222, 570200, 570159, 570150, 570109, 570100, 570067, 570050, 570035, 570010, 570000

## Scenario VE-7/8

In this section we assess the epicentral uncertainty for a scenario event at the planned mining site VE-7/8. Fig. 8 shows the seismic sensors where manual P-wave picks would be available for this event. A grid search is done for a region around the Hypocenter solution, as indicated by the red box in Fig. 8. Fig. 9 shows the 95% confidence area of the resulting PDF.

In the following, the relevant input and output is listed. The scenario epicenter is listed both in wgs84 and in the Dutch national triangulation system (RD). Also a gridded version of the 95% confidence contour of the PDF, and its major and minor axes, can be found.

Epicenter in wgs84 [deg ]: 6.814, 53.099

Epicenter in RD [m ]: 250550, 569000

PDF major axis [m ]: 1414

PDF minor axis [m ]: 795

Orientation of the PDF ellipse [deg ]: -12.8

95% confidence contour RDx [m ]: 250565, 250600, 250650, 250700, 250750, 250767, 250800, 250834, 250850, 250876, 250900, 250905, 250928, 250944, 250950, 250958, 250969, 250977, 250981, 250983, 250983, 250981, 250976, 250969, 250958, 250950, 250946, 250935, 250919, 250900, 250898, 250880, 250852, 250850, 250827, 250800, 250792, 250753, 250750, 250706, 250700, 250650, 250645, 250600, 250550, 250546, 250500, 250450, 250400, 250381, 250350, 250300, 250295, 250250, 250249, 250216, 250200, 250193, 250174, 250162, 250154, 250150, 250150, 250146, 250146, 250149, 250150, 250153, 250158, 250166, 250176, 250191, 250200, 250206, 250221, 250243, 250250, 250264, 250289, 250300, 250316, 250350, 250350, 250385, 250400, 250429, 250450, 250484, 250500, 250550, 250565

95% confidence contour RDy [m ]: 568300, 568284, 568274, 568275, 568290, 568300, 568318, 568350, 568366, 568400, 568442, 568450, 568500, 568550, 568573, 568600, 568650, 568700, 568750, 568800, 568850, 568900, 568950, 569000, 569050, 569079, 569100, 569150, 569200, 569244, 569250, 569300, 569350, 569354, 569400, 569438, 569450, 569500, 569504, 569550, 569556, 569597, 569600, 569630, 569649, 569650, 569663, 569666, 569658, 569650, 569639, 569605, 569600, 569551, 569550, 569500, 569464, 569450, 569400, 569350, 569300, 569250, 569250, 569200, 569150, 569100, 569094, 569050, 569000, 568950, 568900, 568850, 568825, 568800, 568750, 568700, 568685, 568650, 568600, 568581, 568550, 568500, 568500, 568450, 568432, 568400, 568378, 568350, 568336, 568306, 568300

## Depth uncertainty

A well calibrated 3D P-wave velocity model is available for the region (*Romijn*, 2017). For scenario TR-1 and VE5/6, the 5 and 4 stations within the 5.5 km range (Figs. 5 & 7) would allow for a similar depth-estimate precision as can be obtained for most of the events within the Groningen network (*Spetzler et al.*, 2018). For scenario VE7/8, also 5 stations are available within a 5.5 km radius (Fig. 9). However, there is a large azimuthal monitoring gap at the south-southeastern side of this potential mining site. This will result in a somewhat larger depth uncertainty than for sites TR-1 and VE5/6.

## References

- Romijn, R. (2017), Groningen velocity model 2017, *Tech. rep.*, NAM (Nederlands Aardolie Maatschappij).
- Spetzler, J., E. Ruigrok, and B. Dost (2018), Improved 3D hypocenter method for induced earthquakes in Groningen, Nederlands Aardwetenschappelijk Congres, March 15-16. Veldhoven, the Netherlands.
- Tarantola, A. (2005), *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*, SIAM, Philadelphia.
- Zhou, H.-w. (1994), Rapid three-dimensional hypocentral determination using a master station method, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B8), 15,439–15,455.

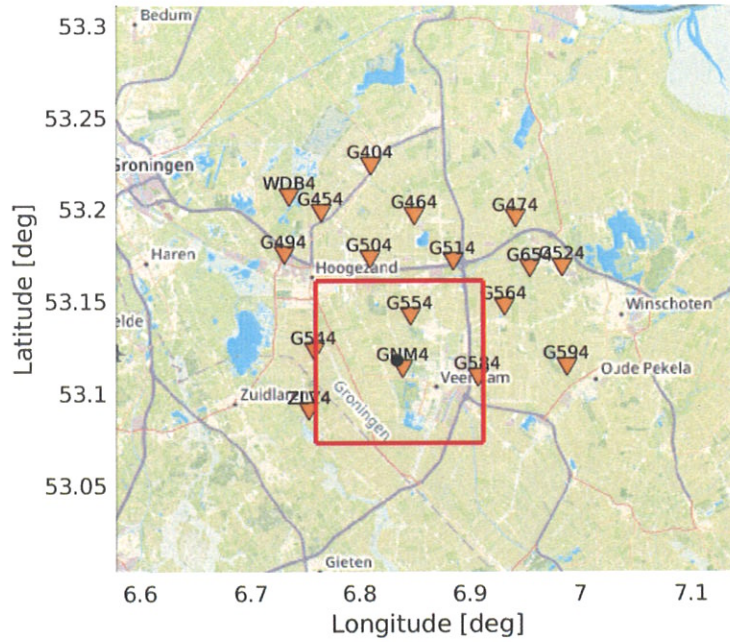


Figure 4: Overview map with locations of stations (yellow triangles) where P-wave onsets are picked, the scenario epicenter (black dot) at existing salt cavern TR-1 and the boundary line of the area in which a grid search is done (red box). Background map is from [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).

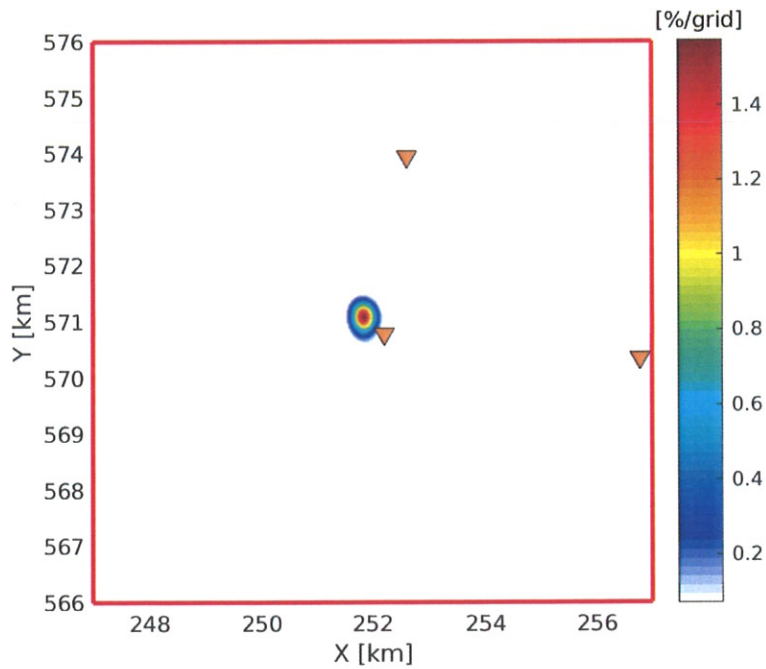


Figure 5: Map showing the epicentral probability density function (PDF) for a scenario event at existing salt cavern TR-1. The 95% confidence area of the PDF is shown, with probabilities expressed in percentage per grid point.

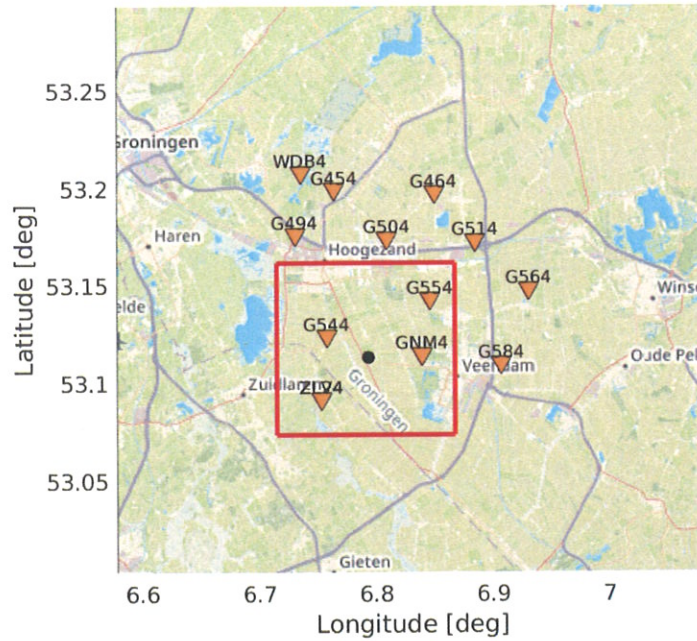


Figure 6: Overview map with locations of stations (yellow triangles) where P-wave onsets are picked, the scenario epicenter (black dot) at planned salt cavern VE-5/6 and the boundary line of the area in which a grid search is done (red box). Background map is from [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).

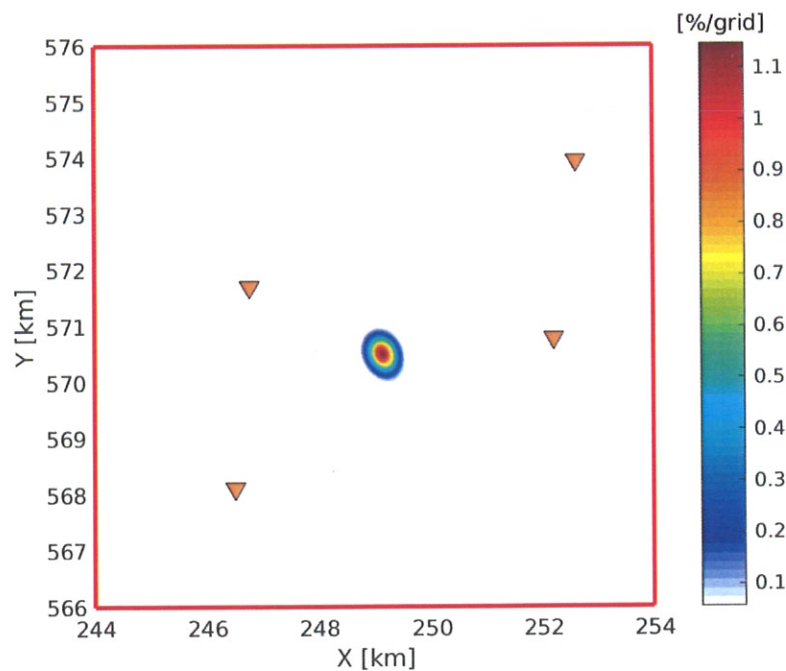


Figure 7: Map showing the epicentral probability density function (PDF) for a scenario event at planned salt cavern VE-5/6. The 95% confidence area of the PDF is shown, with probabilities expressed in percentage per grid point.

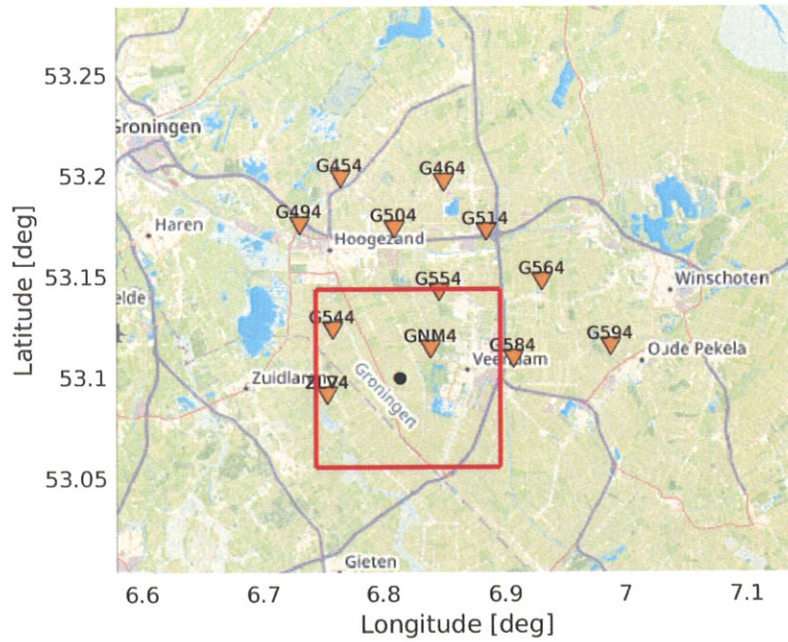


Figure 8: Overview map with locations of stations (yellow triangles) where P-wave onsets are picked, the scenario epicenter (black dot) at planned salt cavern VE-7/8 and the boundary line of the area in which a grid search is done (red box). Background map is from [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).

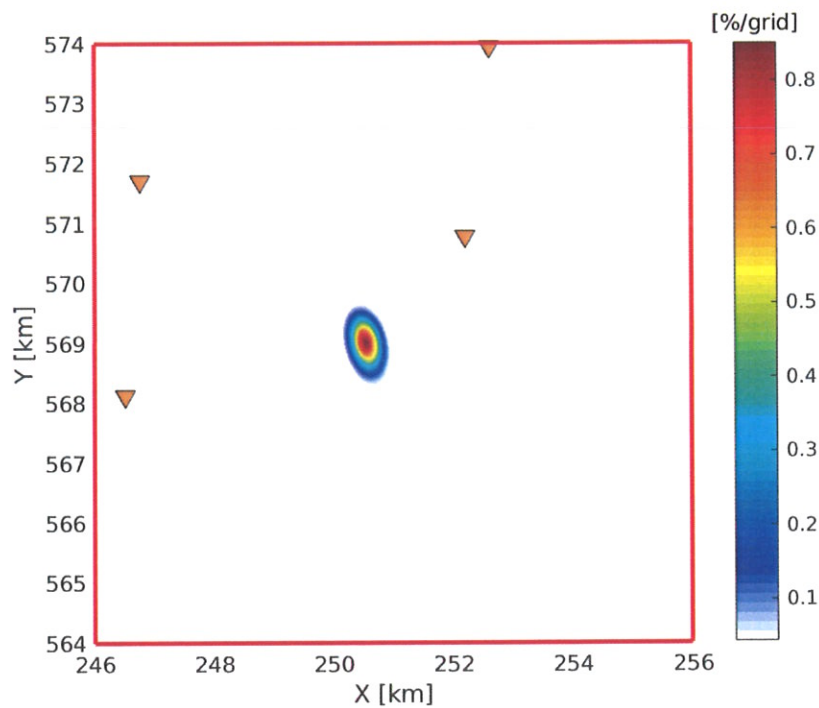


Figure 9: Map showing the epicentral probability density function (PDF) for a scenario event at planned salt cavern VE-7/8. The 95% confidence area of the PDF is shown, with probabilities expressed in percentage per grid point.