

Beheersen van drukken in Nedmag cavernes tijdens de logings- en afbouwfase en een evaluatie van het cavernegedrag na cementeren van de bron (abandonneren)



Consultant: Well Engineering Partners B.V., Hoogeveen

Author: dr.ir. Peter A. Fokker

Version: Nederlandse Publieksversie

Date: 18 februari 2019



Samenvatting

Dit rapport is een publieksversie van het oorspronkelijke rapport “Managing pressures in Nedmag caverns to prevent brine leakage during the mining and bleed-off phase and an evaluation of post abandonment cavern behaviour”, uitgebracht november 2018 in de Engelse taal, om daarmee een toetsing door internationale experts mogelijk te maken. Op verzoek van omwonenden is besloten een publieksversie in het Nederlands te maken (dit rapport). Het oorspronkelijke rapport, zoals ingediend bij het Winningsplan 2018, blijft de enige officiële versie om juridische redenen. Dit rapport tracht echter een zo goed mogelijke vertaling te geven, maar gericht op omwonenden.

Nedmag opereert een caverneveld voor de winning van magnesiumchloride door oplosmijnbouw. Vrijwel alle andere bedrijven, die zout winnen via oplosmijnbouw, zijn op zoek naar natriumchloride (steenzout oftewel keuzenzout) of kaliumchloride (voor kunstmest met name). Magnesiumchloride is wereldwijd alleen te vinden in dunne lagen van 10-60 meter en is ook lang niet overal aanwezig in de zoutlagen, doordat het zout honderden miljoenen jaren geleden neersloeg in enkele overgebleven poeltjes in een verder (door een destijds warm en droog klimaat) ingedampte binnenzee, te vergelijken met de Dode Zee bij Israël en Jordanië. Door de hoge en snelle oplosbaarheid van de magnesiumzouten worden deze door waterinjectie selectief uitgeloozd, waardoor platte cavernes (holruimtes) ontstaan, met een structuur die het beste te vergelijken is met (ook door selectieve oplossing ontstane) kalksteengrotten, zoals de grotten van Hann in België. De grootste aaneengesloten holruime van Nedmag (waar de pekeldruk hetzelfde is door onderlinge communicatie), heeft een breedte van circa 1000 m. Dit wordt het caverne- of TR-cluster genoemd, waar TR refereert naar de winlocatie Tripscompagnie. Steenzoutcavernes, zoals bij Zuidwending of Heiligerlee hebben meestal een diameter van kleiner dan 100 meter, maar soms wel een hoogte van rond de 1000 meter.

De magnesiumzouten, met name het pure zout bischofiet, zijn zeer vloeibaar, in de zin dat ze makkelijk vervormen onder geringe schuifspanningen, vergelijkbaar met kaarsvet (kaarsen), die in de felle zomerzon al onder hun eigen gewicht kunnen vervormen. Dit leidt ertoe dat de zoutcavernes (in tegenstelling tot cavernes in steenzout op vergelijkbare diepte) vrij snel kleiner worden door zouttoestroming, tenzij de pekeldruk kunstmatig hoog gehouden wordt, zoals gebeurde in de zoutwinperiode voor 1993. De zout-toestroming leidt tot bodemdaling, maar ook tot extra pekeldruk die door de zouttoevloei naar het oppervlak wordt geperst.

Na het ontstaan van een opening in de vorm van een scheur in het zoutdak van het TR-cluster in April 2018 werd, mede gebaseerd op deze studie, duidelijk dat het niet mogelijk is grote cavernes weer op een hoge druk terug te brengen, nadat deze jaren op een lage druk zijn bedreven. De spanningen in het zout, die oorspronkelijk waardes hadden die in evenwicht zijn met het gewicht van de bovenliggende gesteentes (zogenaamd lithostatisch) kruipen bij een lage vloeistofdruk weg en komen maar ten dele terug als de vloeistofdruk langzaam weer wordt verhoogd. Een voorval als in april 2018 is dan mogelijk bij vloeistofdrukken die lager liggen dan de drukken die oorspronkelijk (in de jaren 80-90) werden gehanteerd. Dit rapport richt zich op de kwantificatie van de spanningsveranderingen, om er zo in de toekomst rekening mee te kunnen houden bij het kiezen van de druk van de pekeldruk in de caverne. Dit om zo toekomstige vergelijkbare voorvallen te voorkomen, zowel in nieuwe cavernes, bestaande losstaande cavernes als in het TR-cluster.

Deze studie toont dat de steenzoutlaag tussen de caverne en de daarboven gelegen doorlatende elastische steenlaag (Bunter of bontzandsteen) een significante spanningsdaling laat zien tot waarden van enkele tientallen bar ten opzichte van de oorspronkelijke spanning van circa 350 bar.

Door de langdurige (tientallen jaren) zoutwinning bij lage cavernedruk, is het dak van het cavernecoluster op ca. 1500 m diepte met name in het middengedeelte gedaald, met 1 tot 1,5 meter, waardoor er buiging in de gesteentes optrad. Hierdoor werd het gewicht van de gesteentes boven de cavernes, naar de zijkant afgedragen via boogwerking (vergelijkbaar met een stenen boog in een kerkmuur, waar het gewicht van de stenen boven de boog naar de pilaren of de muren naast de boog worden afgeleid). De zoutspanningen onder deze boog zijn in de loop der jaren door beperkte zoutkruip verlaagd geraakt, met name in het midden van het cluster (midden van de boog). Als na een lange tijd van lage druk, de pekeldruk weer wordt verhoogd, keert slechts een deel van de zoutspanningen terug. Wanneer de pekeldruk te hoog wordt, kan er een scheur in het zout ontstaan. Er ontstaat dan een lekpad tussen de caveerne en de bovengelige doorlatende lagen, waardoor pekeldruk uit de caveerne ontsnapt. Dit kan gebeuren bij een pekeldruk die 50 tot 80 bar lager ligt dan de oorspronkelijke spanning en vloeistofdruk uit de 80-er jaren. Dit bijzondere fenomeen was niet voorzien. De opening sluit zich overigens weer als de vloeistofdruk tot beneden de waarden van de zoutspanning in het dak daalt, waardoor de lekkage tijdelijk was. De lekkage stopte hoogstwaarschijnlijk reeds kort na het ontstaan ervan, bij een pekeldruk die circa 30 bar lager lag dan vlak voor het voorval..

In dit rapport wordt de beschreven situatie gekwantificeerd via een berekening met een simulatiepakket (Eindige Elementen pakket van DianaFEA uit Delft), dat ook wordt gebruikt om bijvoorbeeld viaducten of dijken door te rekenen, zodat ze niet bezwijken bij een zware (maar wel denkbare) last. Er wordt zowel een versimpelde axi-symmetrische berekening gemaakt (waarbij aangenomen wordt dat de caveerne de vorm van een schijf of ring heeft) alsmede een complete 3-dimensionale berekening, waarbij de grillige vorm van de cavernes beter wordt beschreven. Dit is de eerste keer dat een volledig 3-dimensionaal model is gemaakt voor Nedmag (en denkbaar ook voor andere zoutwinners en cavernevelden in Nederland), iets dat tien tot vijftien jaar geleden nog niet mogelijk was door de beperkte kracht van computers in die tijd.

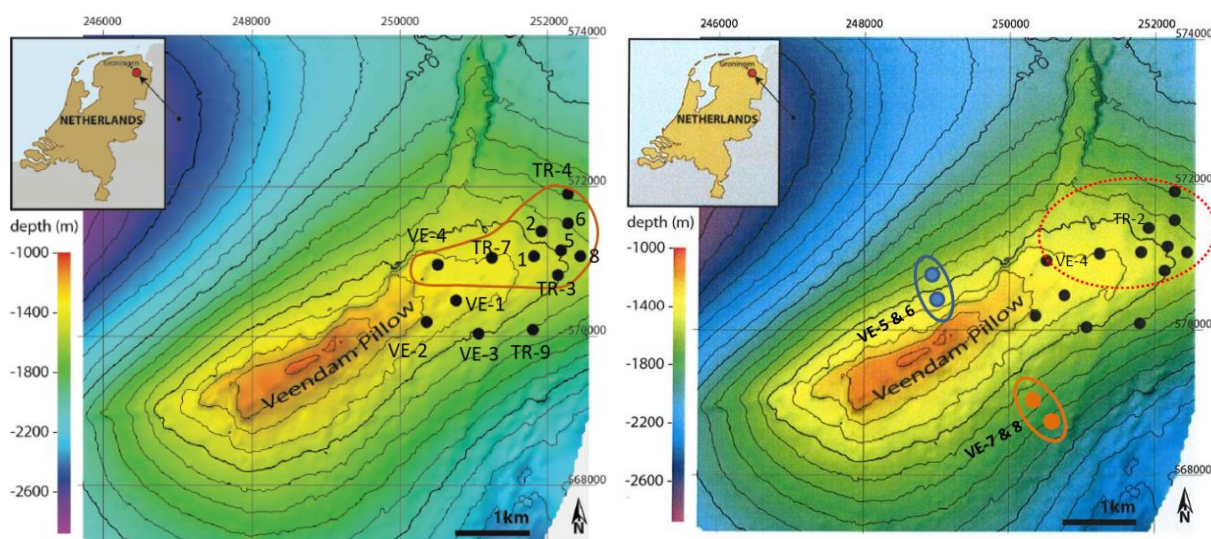
Deze berekeningen geven een handvat voor het hanteren van de drukken in de toekomst, waarbij er wordt geadviseerd om de drukken binnen een nauwe band een neergaande trend te laten beschrijven tijdens de levensloop van een caveerne, totdat de druk tot (iets boven) de waarde komt, die nodig is om pekeldruk (met een dichtheid van 1,3 kg per liter) via de verbuizing naar het maaiveld te transporteren. Een lagere druk is onmogelijk zonder toepassing van ondergrondse pompen. Bij deze lage druk kan ook het ondergronds pekeldrukvolume tot een technisch minimum worden gebracht alvorens de caveerne voorgoed wordt ingesloten door middel van het plaatsen van een cementprop in de verbuizing van de winningsput of -putten, die naar de caveerne leiden. De pekeldruk volumes in de caveerne zijn dan veel geringer dan het volume dat het cavernecoluster had ten tijde van het voorval op 20 april 20218. Hiermee wordt het effect van het ontsnappen van pekeldruk uit een caveerne, nadat deze is verlaten, beperkt tot een minimum en is het zeker veel geringer dan de lekkage van april 2018. Hiermee is het dan zo goed als zeker dat pekeldruk en eventueel ook achtergebleven diesel niet de zoetwater lagen kunnen bereiken (van 0 tot 250 meter onder maaiveld), wat met zeer grote waarschijnlijkheid ook niet gebeurd is tijdens het incident.

1 Achtergrond

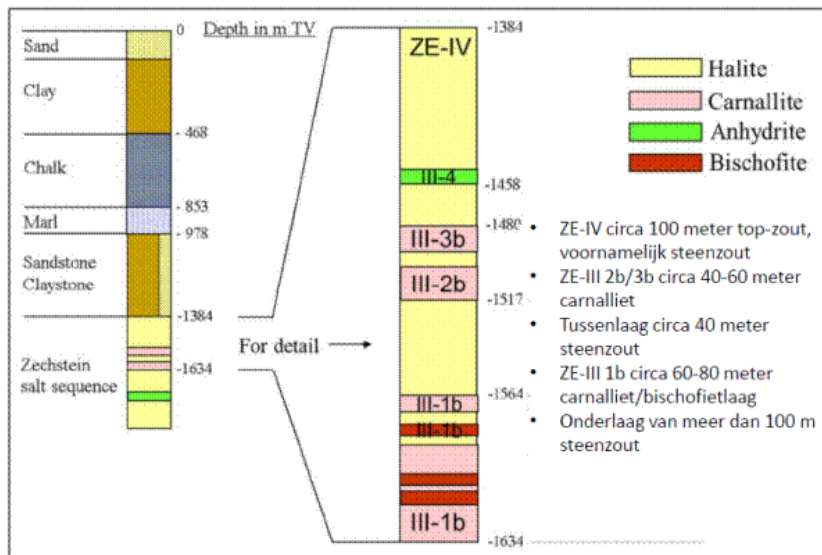
Nedmag bedrijft een oplosmijnbouw locatie aan de westkant van Veendam, bij de dorpen Borgercompagnie en Tripscompagnie. Nedmag wint op circa 1500 meter diepte magnesiumzouten uit de voorkomens van bischofiet, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, carnalliet ($MgKCl_3 \cdot 6H_2O$) en kieseriet ($MgSO_4 \cdot H_2O$) door deze zouten op te lossen via de injectie van water. Hier ontstaat pekkel met een hoge concentratie aan magnesium-chloride en een lage concentratie aan restzouten. De overige aanwezige zouten blijven door waterinjectie ofwel onaangetaast, vallen naar de bodem van de caveerne (als de zouten eromheen worden opgelost), of kristalliseren uit door de verdringing door magnesiumchloride. In de cavernes bevindt zich dan ook een grote hoeveelheid vaste zouten, waarin zich in de poriën magnesiumchloride pekkel bevindt. De niet opgeloste of neergeslagen zouten zijn steenzout ($NaCl$), anhydriet ($CaSO_4$), carnalliet ($MgKCl_3 \cdot 6H_2O$), sylviet (KCl) of kieseriet ($MgSO_4 \cdot H_2O$).

Dertien winningsputten zijn geboord in de periode 1972-2011. Vier vanuit (productiecluster) Well Head Centre 1 te Borgercompagnie (WHC-1: VE-1 t/m VE-4), negen vanuit Well Head Centre 2 te Tripscompagnie (WHC-2: TR-1 t/m TR-9). Vier nieuwe bronnen liggen in de planning om in 2019 of later geboord te worden vanuit WHC-1 (VE-5 t/m VE-8). Figuur 1 toont de ondergrondse locaties van de uiteinden van de verbuizingen, die grotendeels schuin zijn geboord. De kleuren en contourlijnen tonen de diepte van de top van het zout. Het oranje-rode deel is de top van een zoutkussen (zo genoemd omdat het enigszins op een ligkussen van een bed lijkt) met een diepte van circa 1200 m beneden maaiveld. De bestaande en geplande cavernes bevinden zich op de gele tot lichtgroene flanken met een diepte van 1400 tot 1700 m beneden maaiveld. Hier lijken op basis van studies de dikste lagen bischofiet te bevinden.

Negen cavernes (TR-1 t/m TR-8 en VE-4, zoals aangegeven in Figuur 1), zijn onderling verbonden. Deze worden in dit document het TR-cluster genoemd. Vier andere bronnen zijn niet verbonden: VE-1 t/m VE-3 en TR-9. De nieuw te boren bronnen liggen op grote afstand tot de bestaande bronnen. Dit voorkomt aan de ene kant dat de cavernes zich bij het cluster aansluiten, maar zorgt ook voor een evenwichtiger bodemdalingssom.



Figuur 1: Links: locatie van bestaande cavernes (onderzijde verbuizing). Rechts: bestaande en geplande cavernes. De locatie is ingetekend op een dieptecontourenkaart van het Veendam zoutkussen. De rode of blauwe lijnen geven de huidige of toekomstige verbindingen weer.



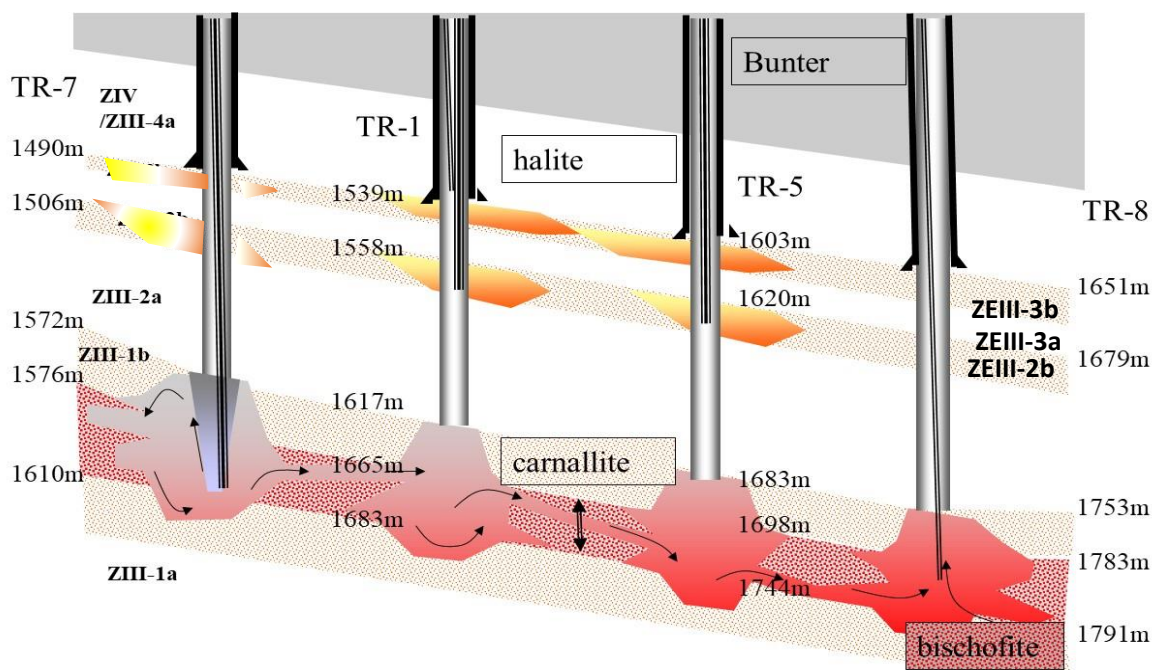
Figuur 2: Laagdiktes van de zouten en de ondiepere ondergrond. Per bron zijn er kleine verschillen in diktes en dieptes, onder andere door de vorm van het zoutkussen.

De originele mijnbouwmethode (1972-1993), paste hoge pekeldrukken toe in de cavernes, die dicht bij (90-95%) de oorspronkelijke gesteentedruk lagen, die overeenkomt met het gewicht van de bovenliggende gesteentes. De stroming van zout richting te cavernes was gering, maar er werd meer pekkel gecreëerd in de ondergrond dan er pekkel werd gewonnen voor commerciële toepassing. Er bleven dan ook naar planning grote hoeveelheden pekkel in de ondergrond achter, die op de lange termijn toch zouden kunnen wegglekken en daarmee tot bodemdaling zouden leiden. Er is toen medio 1995 (na een proef van 2 jaar) besloten de pekeldrukken te verlagen en de bodemdaling per direct te laten optreden. De maatregelen ter compensatie van de bodemdaling (met name waterhuishoudkundige maatregelen als de aanleg van pompen en dammen) konden dan direct door Nedmag betaald worden en dit voorkwam dus dat er een voorschot op de toekomst werd genomen.

In de beginjaren is (in navolging van andere zoutwinbedrijven) ook gewerkt met een oliedak bestaande uit diesel. Diesel drijft op water en pekkel en voorkomt dat het zoutdak boven het injectiepunt oplost (doordat licht water omhoog wil in zware pekkel). Omdat de zoutlagen niet heel uniform zijn en onder een hellingshoek liggen, werd regelmatig diesel niet meer bereikbaar voor terugwinning, doordat deze naar delen van de caveerne stroomde die niet in direct contact met de winningspunten staan. Gedurende 20 jaar (voornamelijk van 1972 tot 1995) is circa 40 000 m³ niet meer terugwinbaar gebleken. Ook in latere jaren, waarin de cavernes door kruip kleiner werden, maar door loging ook zout is opgelost, kon er vrijwel niets van deze diesel worden teruggewonnen. Het overgrote deel van de diesel bevond zich met zeer grote waarschijnlijkheid niet op de plek waar in april 2018 de scheur boven het TR-cluster is ontstaan en is daarmee hoogstwaarschijnlijk ook niet uit het cavernecoluster ontsnapt, maar bevindt zich nog steeds in holtes van tien tot enkele honderden kubieke meter per stuk, verspreid over alle cavernes en verschillende lagen (dieptes).

In 1995 bleek na onderzoek, dat een oliedak (en het gebruik van diesel) niet meer nodig was indien de caveerne dermate groot was, dat het geïnjecteerde water zich direct kon vermengen met zware pekkel en de oplossing van bischofiet snel genoeg was (door voldoende contactoppervlak met de op te lossen zouten) zodat de pekkel nagenoeg verzadigd was aan bischofiet en daarmee geen steenzout meer oploste. Er is na 1995 dan ook vrijwel geen olie meer gebruikt, behalve voor de ontwikkeling van de nieuwe caveerne TR9 van 2011. Ook voor de nieuwe cavernes VE5 t/m VE8 is het gebruik van een oliedak dan ook alleen voorzien voor een periode van initiële loging

voor 1-3 jaar, totdat de concentratie aan $MgCl_2$ -zout (zoals gewonnen wordt) hoog genoeg is en de caveerne groot genoeg is.



Figuur 3: Dwarsdoorsnede met bronnen en cavernes op de flank van het zoutkussen.

Door de drukdaling in de cavernes werd door zoutkruip vrijwel het dubbele volume pekkel gewonnen per geïnjecteerde kubieke meter water: van 1:1 voor 1995 tot 2:1 na 1995. Gedurende de periode 1992-2018 zijn tijdens de zoutwinning veel cavernes ondergronds met elkaar in verbinding geraakt. Een dwarsdoorsnede van het TR-cluster is getoond in Figuur 3. Door de onderlinge verbondenheid kan water in één winningsput geïnjecteerd worden terwijl uit een andere winningsput die met dezelfde verbonden cavernes in contact staat pekkel gewonnen kan worden. De zuiverheid van de pekkel neemt toe door de langere verblijfstijd van de pekkel. Door niet gelijktijdig via dezelfde winningsput te injecteren en te produceren, treden er ook minder verstoppingen op door afkoelingskristallisatie. Bij gelijktijdige injectie van koud water koelt pekkel immers af en begint zout te kristalliseren op de wand van de productie-buis. Om die reden zijn ook de nieuwe bronnen gepaard gepland, waardoor de cavernes na 1-3 jaar verbinding maken.

Het totale pekkelvolume van de caveerne-cluster, (TR1 t/m TR8 en VE4), gebaseerd op een massabalans, is geschat op 7,5 miljoen m^3 begin 2018. Van dit volume wordt gedacht dat circa 2,5 miljoen m^3 zich bevond in vrije ruimte in de bischofietsectie (de rode ondercavernes van Figuur 3) en door zoutkruip in 10-15 jaar uitgeperst kan worden. De andere 5 miljoen m^3 bevindt zich in de poriën van het vaste zout in de bischofietsectie of bevindt zich in de bovcavernes (met carnallietzout; ZE-III 2b/3b) die veel minder makkelijk door zoutkruip kleiner worden. De bodemdaling tussen 1995 en 2018 bedroeg circa 1,5 cm per jaar, en bedroeg circa 44 cm begin april 2018.

De druk in het caveerne-cluster was langzaam weer gestegen na 2008, door een vanwege diverse redenen gedaalde productie-injectie verhouding, van 75% naar 85% van de oorspronkelijke spanning in het zout, wat veilig geacht werd, omdat de druk vroeger hoger was geweest. Op 20 april 2018 werd echter een drukdaling waargenomen (tot circa 30 bar drukdaling na ruim een week), wat na analyse aan een opening in het zoutdak boven het caveernecluster is toegewezen en niet aan een lek van verbuizing. Een geschatte hoeveelheid van maximaal 100 000 m^3 pekkel is toen via de ontstane opening (scheur) afgelekt naar de bovenliggende lagen (Fokker, juli 2018).

Na 1-2 weken (en bij de lagere pekeldruk) heeft de scheur zich weer gesloten en heeft er zich na die tijd geen lekkage meer voorgedaan volgens massa- en volume-balansen.

1.1 Korte samenvatting van het lekkage-incident.

Op 20 april 2018 werd er een drukdaling van circa 10 bar in 3 minuten gezien in het cavernecoluster van Nedmag, bij drie winningsputten (TR1, TR2, TR5). Na 30 minuten waren ook de andere winningsputten van het cluster met deze druk gedaald. Na twee dagen waren alle drukken met circa 30 bar gedaald, waarna de druk stabiliseerde.

Allereerst werd een probleem vermoed met de mantelbuis (Figuur 4), waardoor pekels via een lek in de verbuizing naar de bovenliggende lagen kon afstromen. Een inspectie van de buizen via camera's en andere methodes om de integriteit van de stalen buizen te testen, leverde geen aanwijzingen op dat de buizen lek waren. Stromingsberekeningen gaven ook aan dat de lekkage in de eerste 30 minuten, circa 25 000 m³, nooit door buizen gestroomd kon hebben, omdat de diameter daarvoor te klein was, zelfs als de lekkage via 3 buizen tegelijk was gebeurd. De diameter van de meeste buizen (mantelbuizen genoemd) is 10 ¾ inch, ofwel circa 28 cm.

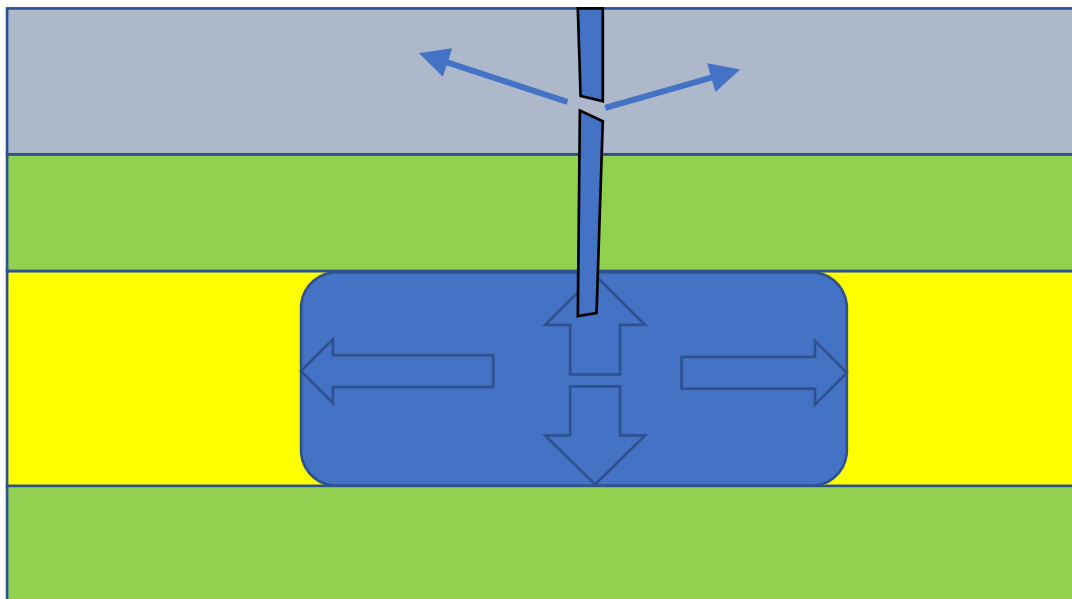


Fig. 4 Bezwijken van de mantelbuis door een breuk met uitstroom van pekels in doorlatende lagen

Een opening in de vorm van een scheur in het zoutdak, Figuur 5, werd waarschijnlijker als oorzaak, maar de aanname was dat dit pas zou kunnen gebeuren bij cavernedrukken, die hoger waren dan de oorspronkelijke gesteentedruk (en ook hoger dan de drukken die ooit gehanteerd werden in de jaren 1972-1995).

Het enige andere lekkagemodel was (Figuur 6), dat blokken zout in de caveerne waren gevallen door een instorting van het zoutdak. Een beperkte instorting van een zoutdak of andere laag boven een holte is elders wel gebeurd, zeker als harde lagen in het zout (zoals gipslagen) spatkrachten uitoefenen (Figuur 7). Dit leidt in de regel tot beschadiging van de mantelbuizen of productiebuizen, maar niet noodzakelijkerwijze tot lekkage, omdat eerst het hele zoutdak dient te bezwijken, voordat pekels kan uitstromen. Daarbij zou de drukdaling ook sterker zijn geweest, tot waardes die in de buurt van de vloeistofdruk boven de cavernes liggen danwel tot de scheurweerstand van de elastische laag boven het zout (Bunter).

Vanaf eind april 2018, is de pekeldruk op een niveau gebracht en gehouden dat hernieuwde scheurvorming voorkomt. De drukniveaus, in samenhang met productievolumes, zijn weer in overeenstemming met de theoretische modellen, die uitgaan van lekvrije cavernes. De waterinjectie is gestopt, uitgezonderd voor verdunning en incidenteel spoelen van bronnen. Voor 2019 wordt voorzien dat de pekewinning uit drukdaling en zoutkruip van het cluster voldoende is om te voorzien in de grondstofbehoefte van de fabriek en de verkoop aan derden zoals Nedmag's buurman Kisuma. Korte insluitproeven laten ook een drukstijging zien, die in lijn is met de elasticiteit van het systeem, zoals deze voor het incident ook was, met circa 2500 m³ per bar drukverandering. Ook de bodemdalingskom, zoals op maandbasis via INSAR (satellietmetingen) en GPS (hoogtemeting) wordt bepaald, vertoont een trend die in lijn ligt met een lekdicht cavernegedrag sinds mei 2018. Tijdens de eerste twee weken vanaf het incident is vermoedelijk maximaal 100.000 m³ pekels afgelekt, waarvan 75.000 m³ in de eerste twee dagen.

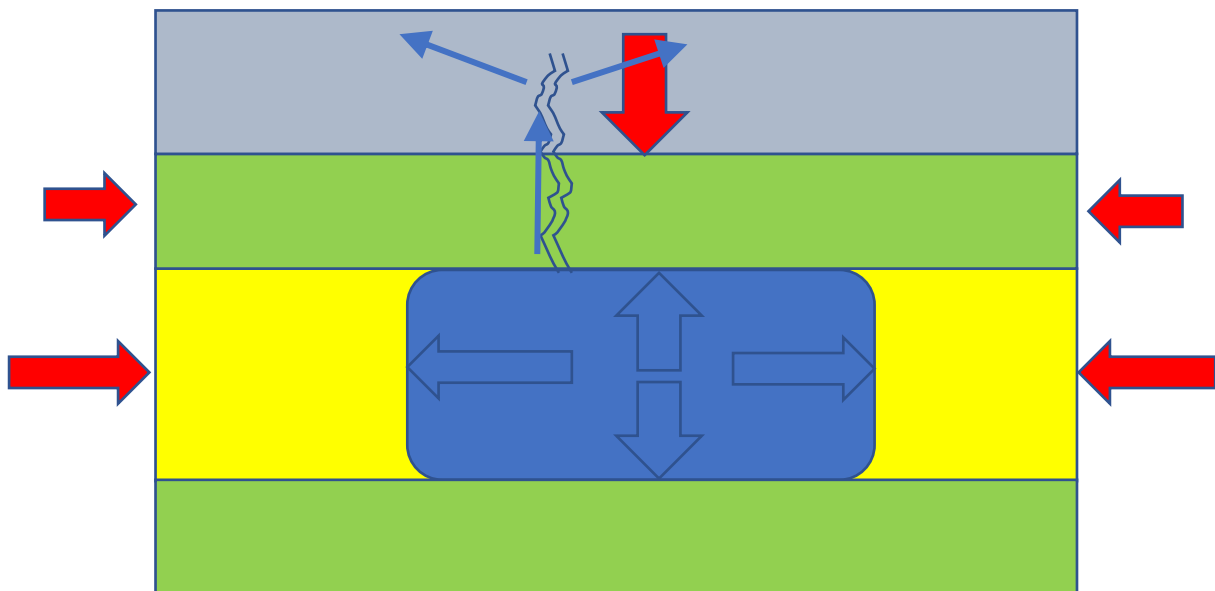


Fig. 5: scheurvorming in het zoutdak doordat de pekeldruk de zoutdruk oversteeg.

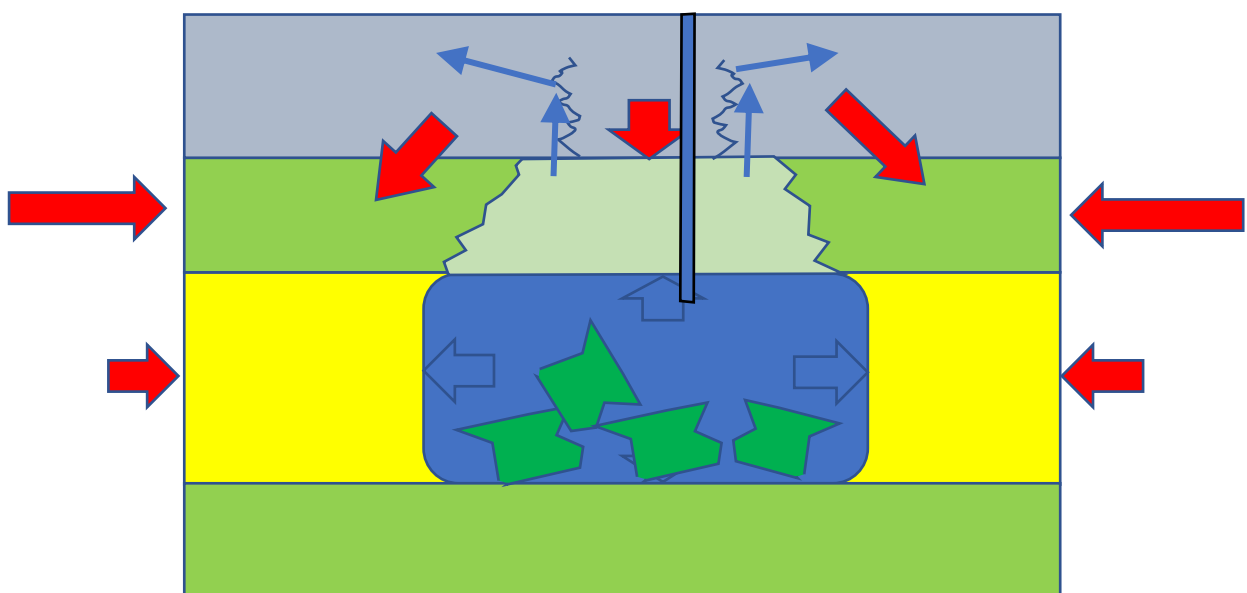


Fig 6: Totaal bezwijken en instorten van het zoutdak

Andere studies hebben zich gericht op de scheurontwikkeling boven het zout, om zo af te schatten waar de uitstromende pekkel met daarin mogelijk een zekere hoeveelheid diesel gebleven is. Uit deze studies volgde dat de pekkel vermoedelijk ook de Bunter gescheurd heeft en dat de pekkel grotendeels in de Vlieland zanden is afgelekt (op circa 1100 m diepte), maar denkbaar deels ondieper tot in de kalklagen tot op 400 meter diepte heeft kunnen komen. Op deze diepte kan via een 16 inch mantelbuis van winningsput TR2 formatiepekkel worden onttrokken, en daarin zijn geen sporen van magnesiumchloride of diesel aangetroffen. De formatiepekkel is hier (door de aanwezigheid van zoutpilaren zoals bij Zuidwending) reeds zout door natriumchloride. Door de hoge dichtheid van de cavernepékkel (ten opzichte van het brakke tot zoute grondwater) zal deze na het incident niet verder omhoog zijn gemigreerd, en eerder naar diepere lagen zijn teruggetrokken.

De volgende hoofdstukken richten zich op het voorkomen van scheuren in de toekomst en met de gevolgen van scheuren die denkbaar optreden na het verlaten van de cavernes, als deze door kruip geen pekkel meer leveren op een snelheid, die openhouden van de bron rechtvaardigt.

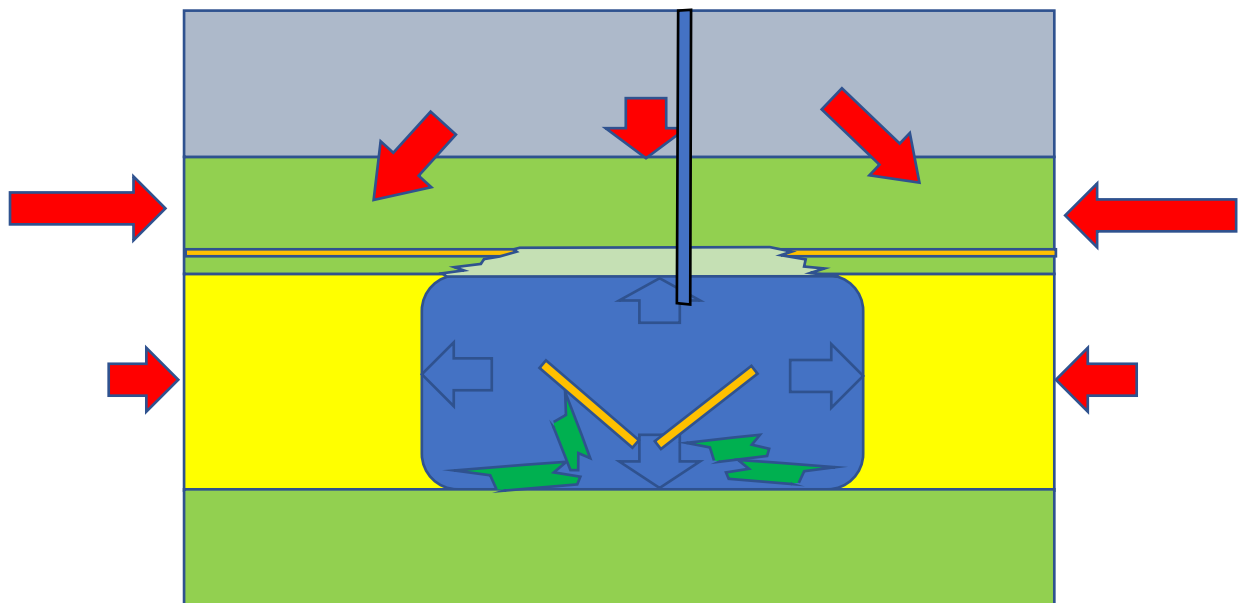
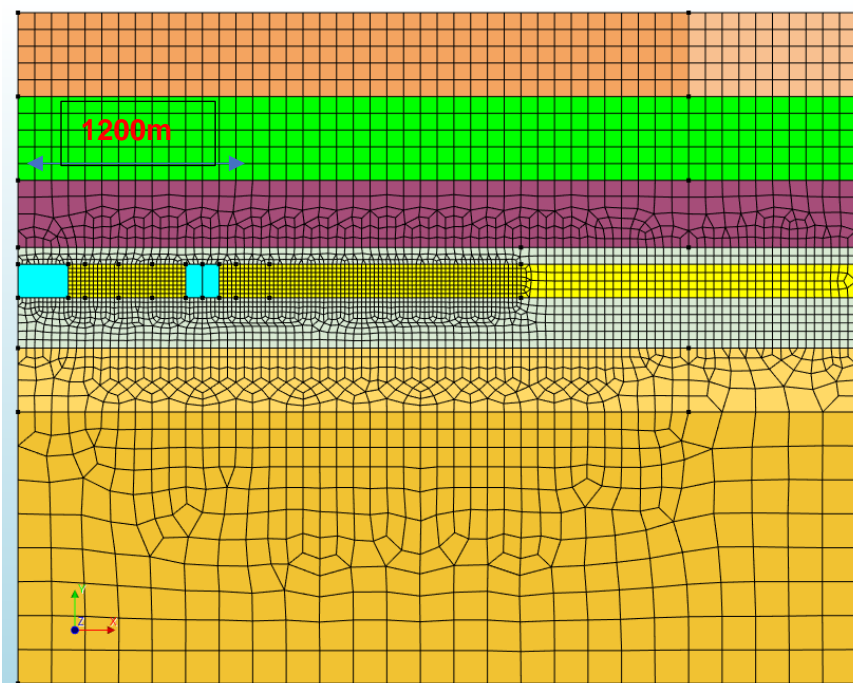


Fig 7 Deels instorten van een zoutdak, door harde lagen spatkrachten veroorzaken

2 Analyse van dakstabiliteit – axi-symmetrische analyse

Als gevolg van tientallen jaren van zoutkruip bij lage pekeldrukken, zijn de magnesiumlagen in het Veendam-cluster circa 1 meter dunner geworden, met een bodemdaling van circa 44 cm per begin april 2018. Om snel en inzichtelijk de spanningsveranderingen rond het cavernecoluster te berekenen is eerst een axi-symmetrisch model gemaakt. Dit gaat uit van de aanname dat cavernes bestaan uit cilinders, schijven of ringen. In een later stadium is een (veel bewerklijker) 3D model gemaakt dat de locatie en de vorm van de cavernes beter beschrijft, dat wordt besproken in Hoofdstuk 3.

Het symmetrische model gaat uit van een centrale holruimte (TR-1-2-5-6) met een diameter van 600 m, geflankeerd door een ringcaverne in de buurt (representatief voor TR-3-4-7-8-9, VE4). De ringcaverne is gerepresenteerd door een overspanning van 200 m, waardoor er een ondersteunende pijler van 700 m tussen de beiden ontstond, noodzakelijk om de vervorming en bodemdaling in de tijd juist te kunnen simuleren. De lagen in het model worden opgedeeld in vakjes (elementen), die per vakje de spanningen en vervormingen kunnen berekenen, met een techniek die “Eindige Elementen Methode” heet. Het totaal van vakjes, het raster, is getoond in Figuur 8. Details van de sublagen in de magnesiumlagen (zoals de onderverdeling in bischofiet, haliet en carnalliet) zijn weggelaten in deze aanpak, daar de focus ligt op het gedrag van de zoutlagen boven de magnesiumlagen.

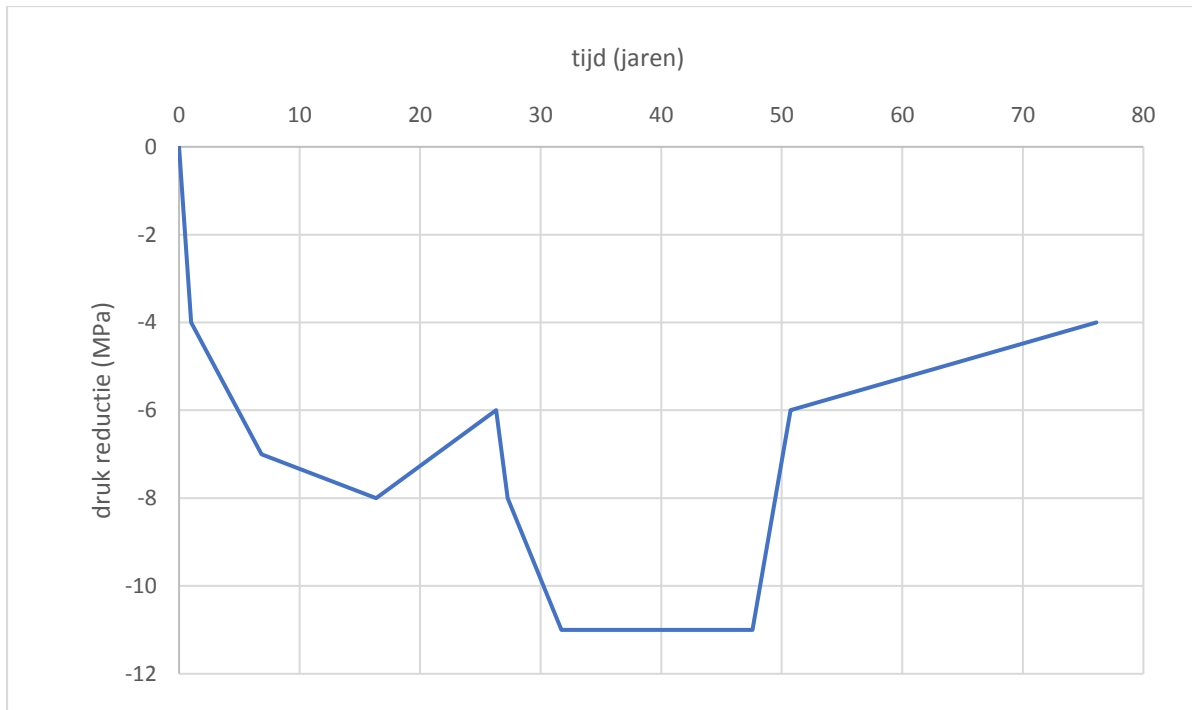


Figuur 8: Raster met geologische lagen. De gele laag representeert de gecombineerde magnesium lagen. De grijze lagen zijn de steenzoutlagen die de boven- en onderzijde van de magnesiumlagen vormen. De paarse laag is de Bunter, de groene laag de Cretaceous (kalk-krijt) en de toplaag is de Noord Zee Groep (voornamelijk zand en klei).

De kruipparameters gaan uit van een kruipsnelheid, die afhangt van de schuifspanning tot een zekere macht m . Deze macht hangt af van het type zout, maar ligt meestal tussen de 1,6 en de 4,5. Er is aansluiting gezocht bij de proefschriften van Urai (1983) en Fokker (1995). De kruipwet gaat uit van een relatie tussen de Von Mises kruip en Von Mises spanning:

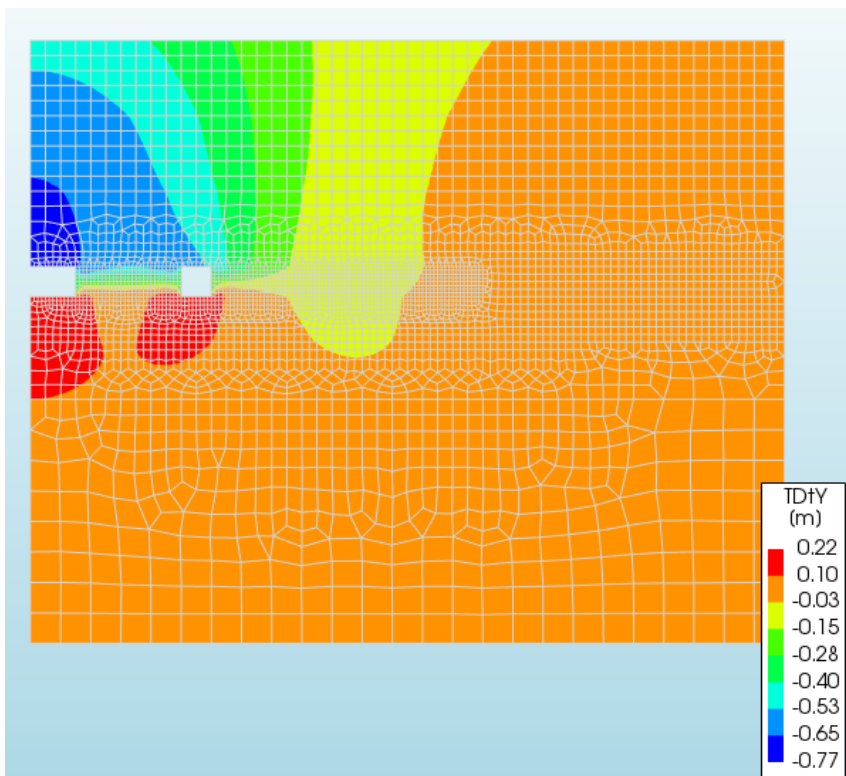
$$\dot{\epsilon}_{VM} = A\sigma_{VM}^m$$

Stijfheden voor de elastische lagen zijn ontleend aan correlaties met boorlog-gegevens. Dit laat nog een redelijke onzekerheid, daar er geen laboratoriumproeven bekend zijn om de elastische stijfheid van deze gesteentes in de omgeving van Veendam (of zelfs de provincie Groningen) te bepalen. De drukhistorie van de cavernes (als gemiddelde trend) is weergegeven in Figuur 9, waar het is aangenomen dat de drukdaling rond 1990 begon.

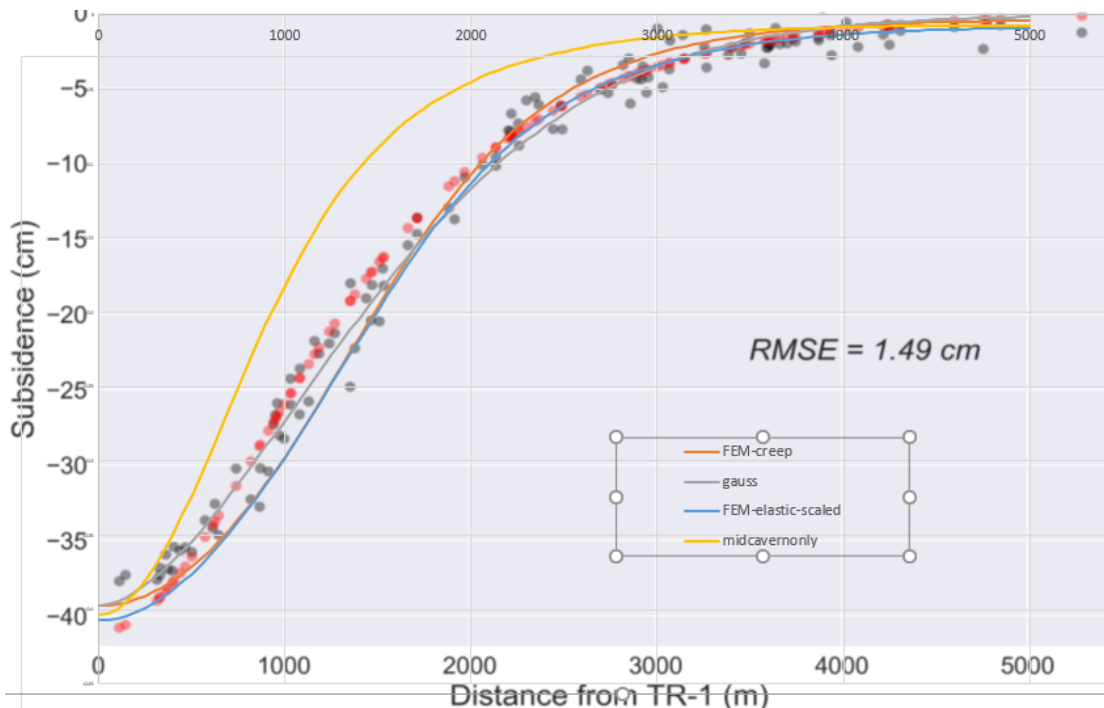


Figuur 9: Drukverloop van zoutcavernes in de tijd. De drukreductie is gemodelleerd vanaf 1990, waar in 2018 een drukdaling optrad tot 80 bar (8 MPa) beneden de initiële spanning. De druk daalt door pekewinning (zonder waterinjectie) tot vermoedelijk 110 bar beneden de initiële spanning in 2021 (jaar 31) en wordt dan constant gehouden voor 16 jaar, op het laagste niveau waar pekewinning nog naar de oppervlakte wil stromen via de productieverbuizing.

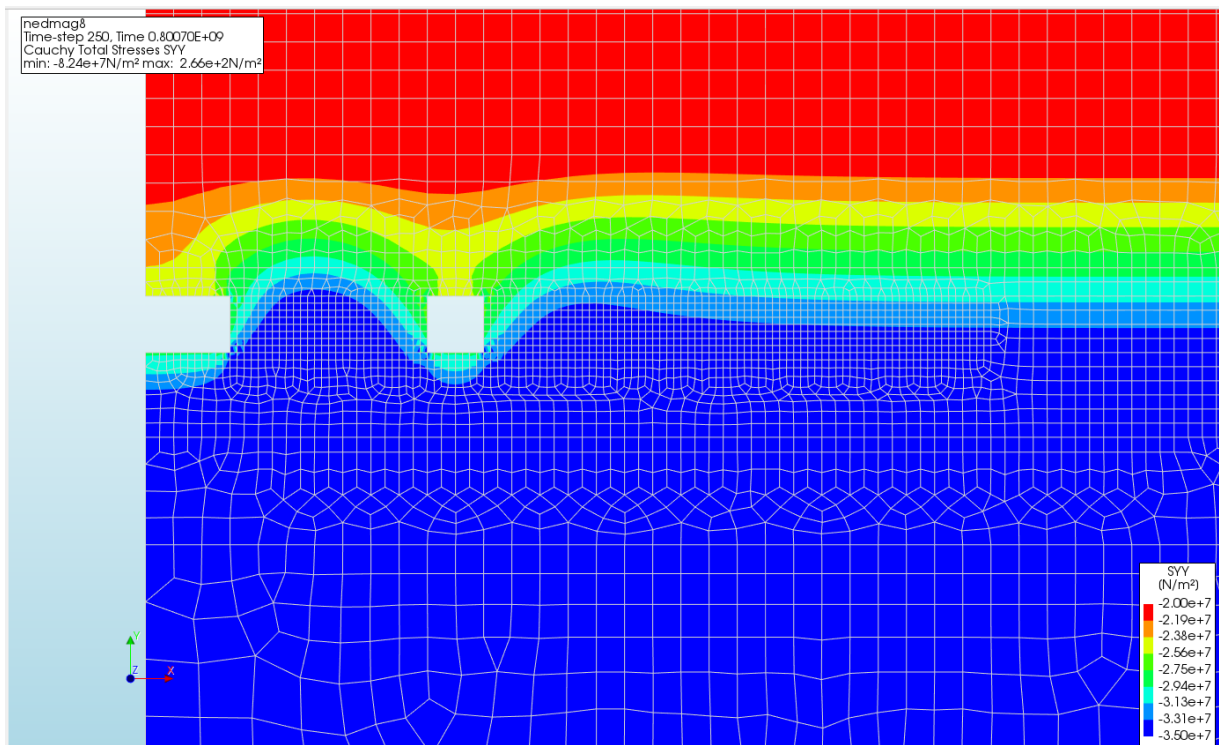
Figuur 10 toont de verticale deformatie in april 2018, met circa 44 cm in het midden van de kom (linksboven in het plaatje). De bodemdalingsskom is weergegeven samen met een doorsnede van de echte kom in Figuur 12 en deze toont een goede overeenkomst. De gele lijn toont de bodemdaling als slechts de centrale caverne van druk wordt gelaten en niet de ringcaverne. Dit geeft een indruk van de invloed van de randcavernes op de vorm van de bodemdalingsskom.



Figuur 10: Verticale deformatie (bodemdaling maaveld tot maximaal 44 cm) begin april 2018.



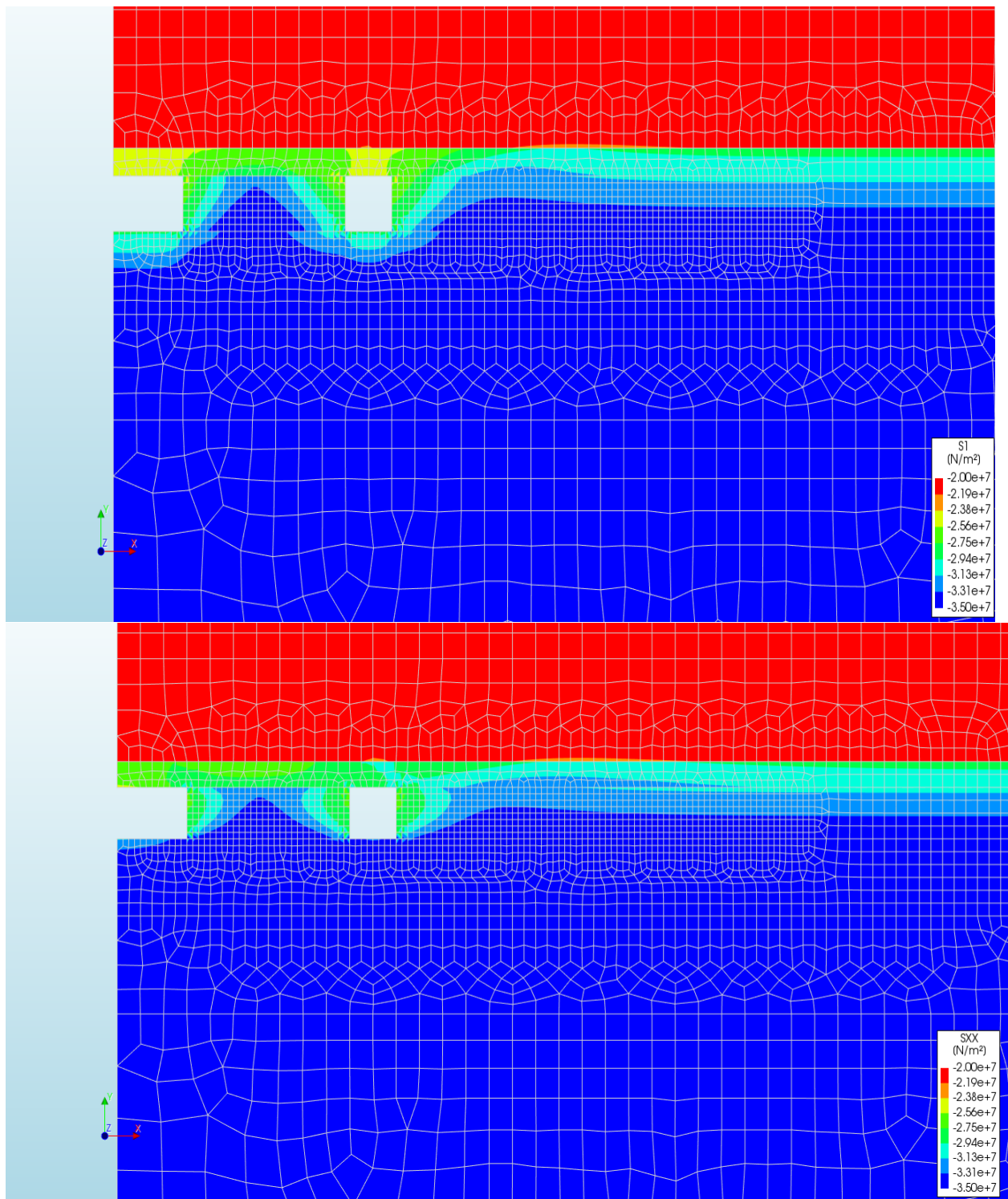
Figuur 11: Vergelijking van (door waterpassing) gemeten bodemdaling en berekende bodemdaling, geschaald naar 40 cm in het diepste punt. Blauwe lijn: deze axi-symmetrische studie. Grijs stippen: waterpasdata 2016. Grijs lijn: beste Gauss-kromme fit. Rode stippen: SGS-Horizon fit via een Geertsma-Van-Opstal methode. De gele lijn is de theoretische komvorm indien alleen de centrale caveerne (en niet de ringcaveerne) van druk wordt gehaald (dit voor een referentiekader).



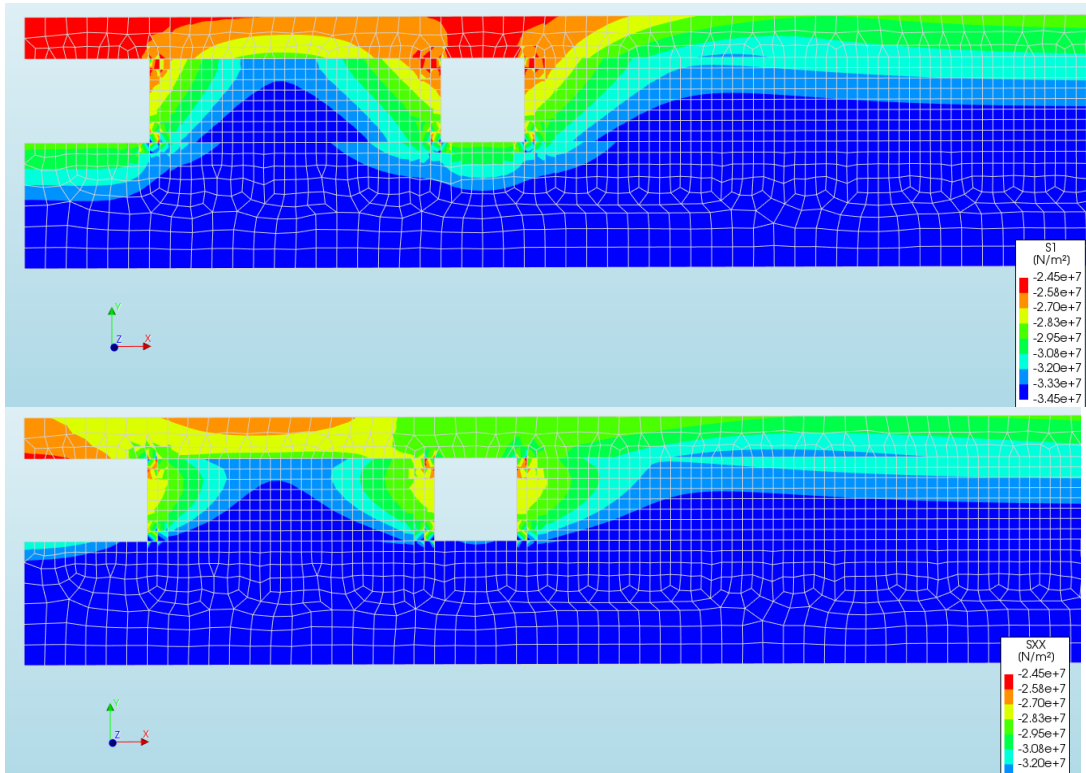
Figuur 12: Verticale spanningen rond de zoutcavernes na 25 jaar van zoutkruip en 44 cm bodemdaling. De kleurenschaal loopt van 200-350 bar ($2\text{-}3.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$). De spanningsreductie rond de centrale cavernes is ongeveer 50 bar.

Analyse toont aan dat de spanningen in het zout na 25 jaar (april 2018) zoutkruip met circa 50 bar ($5 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$) zijn gedaald. De belangrijkste oorzaak lijkt het overdragen van spanningen van het zout naar de elastische lagen boven het zout te zijn, doordat zout kruipt (vervormt) onder constante spanningen en de lagen daarboven niet. De verticale, horizontale en minimum spanningen zijn weergegeven in Figuren 12 t/m 14.

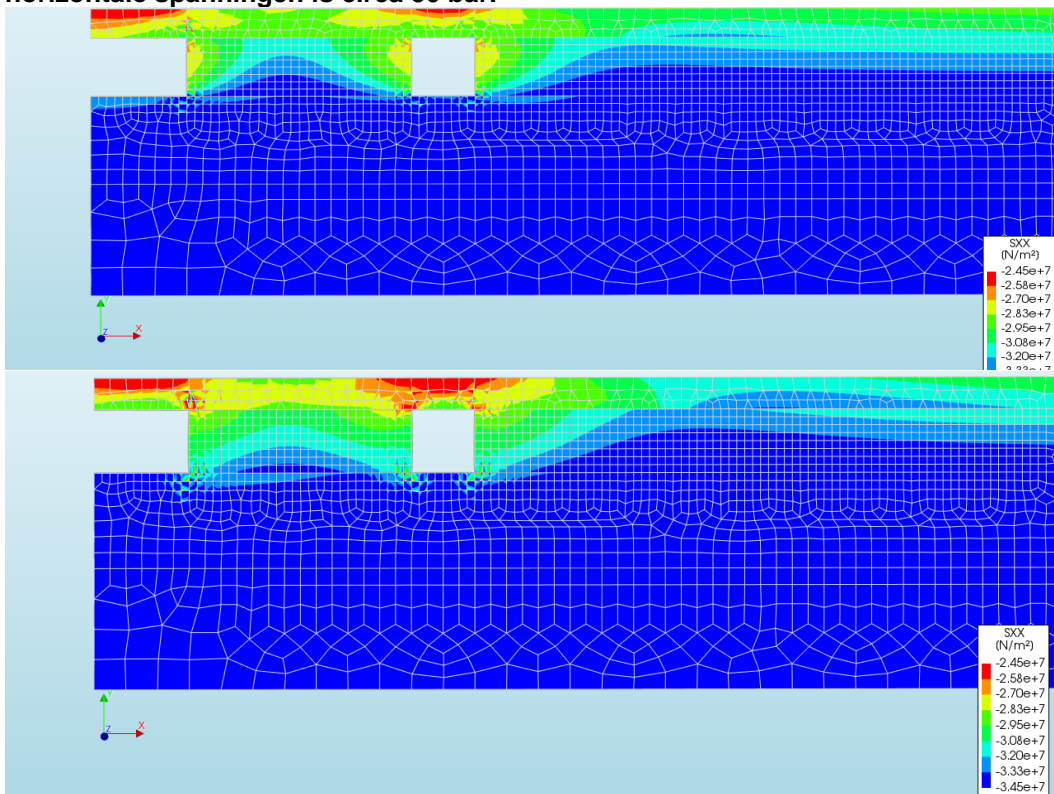
De kruipparameters van het steenzoutdak lijken minder belangrijk in dit geval, aannemende dat ze hoog genoeg zijn om minstens 0.5% kruip te veroorzaken. Een simulatie met een kruipsnelheid die 100 keer zo hoog is onder gelijke spanningen, geeft een iets, maar niet significante extra spanningsdaling: 60 tegen 50 bar (Fig 15).



Figuur 13 a/b: minimum (boven) en horizontale (onder) spanningen boven de zoutcavernes na 25 jaar zoutkruip en 42 cm bodemdaling. de kleurschaal loopt van 200 tot 350 bar. De spanningsreductie rond de centrale cavernes is ongeveer 50 bar. De minimum spanning in het zout boven de cavernes is de verticale spanning en die is bijna gelijk aan de pekeldruk.



Figuur 14 a/b: minimum (boven) en horizontale (beneden) spanning in het zout na 25 jaar kruip en bodemdaling. The kleurschaal loopt van 245 tot 345 bar ($2.5-3.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$). De reductie in horizontale spanningen is circa 50 bar.

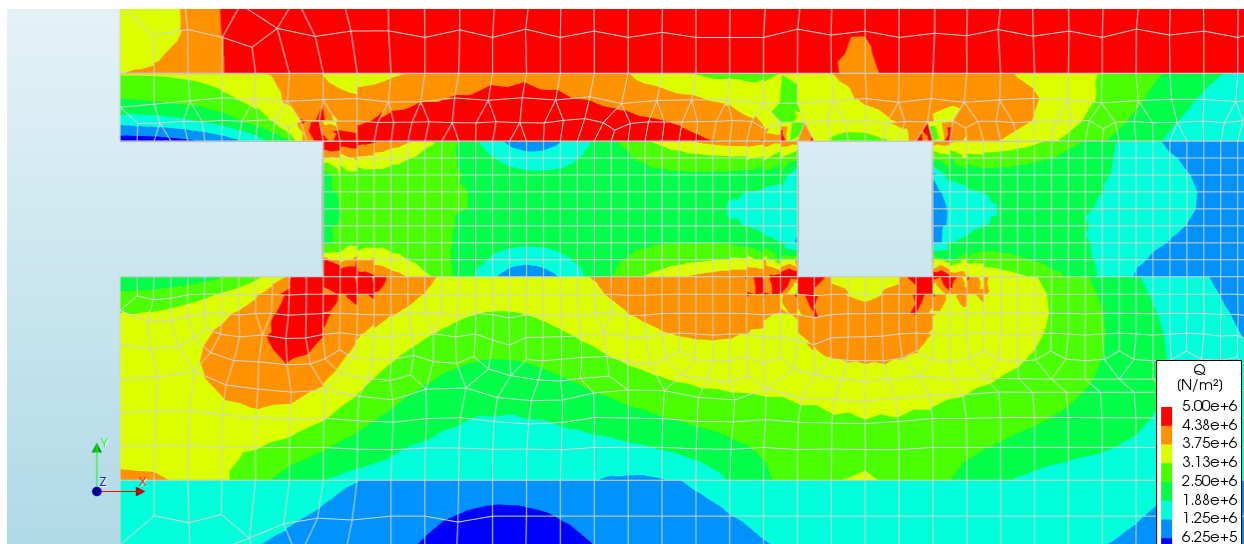


Figuur 15 a/b: Horizontale spanning met 100-voudige kruipsnelheden steenzout na 25 jaar (bovenste beeld) en 60 jaar (onder) van cavern convergentie en bodemdaling. De spanning in het zout is circa 60 bar gedaald.

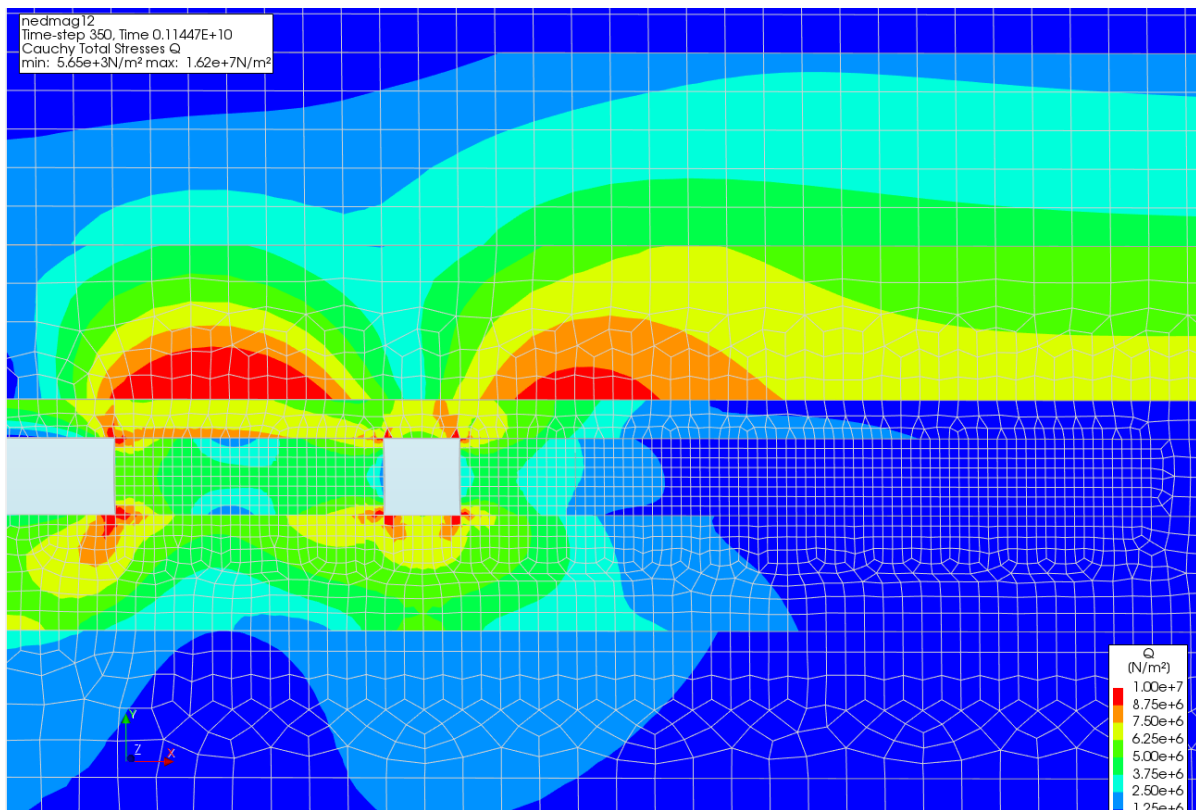
De (Von Mises) schuifspanningen, die de kruipsnelheid, maar ook een eventuele neiging tot bezwijken weergeven, zijn getoond in figuren 16 en 17 voor 2018 (bij 80 bar drukdaling beneden de oorspronkelijke steendrukken) en voor in 2022 verwachte (110 bar daling) cavernedrukken, waaruit een Von Mises spanning van 50 tot 100 bar volgt, ruim beneden spanningen die zout kunnen doen falen (breken) indien het niet ondersteund wordt (200-350 bar).

Aannemende dat het meeste van de zich in het cluster bevindende vrije pekels (pekels niet ingesloten in onoplosbaar materiaal, onopgelost zout of precipitaat) naar de oppervlakte geperst kan worden en circa 4 tot 5 miljoen m³ pekels kan worden onttrokken in de komende 20 jaar, levert dit 30-40 cm extra bodemdaling op. Wanneer we daarna de drukken weer laten oplopen tot 80% van de oorspronkelijke pekeldruk -60 bar beneden de oorspronkelijke gesteentedruk- is de spanningsdaling in het steenzout boven de cavernes toegenomen tot dezelfde 60 bar, waardoor een hernieuwde scheur zou kunnen optreden. Zie Figuur 18 voor horizontale spanningen en Figuur 19 voor de bijbehorende bodemdaling.

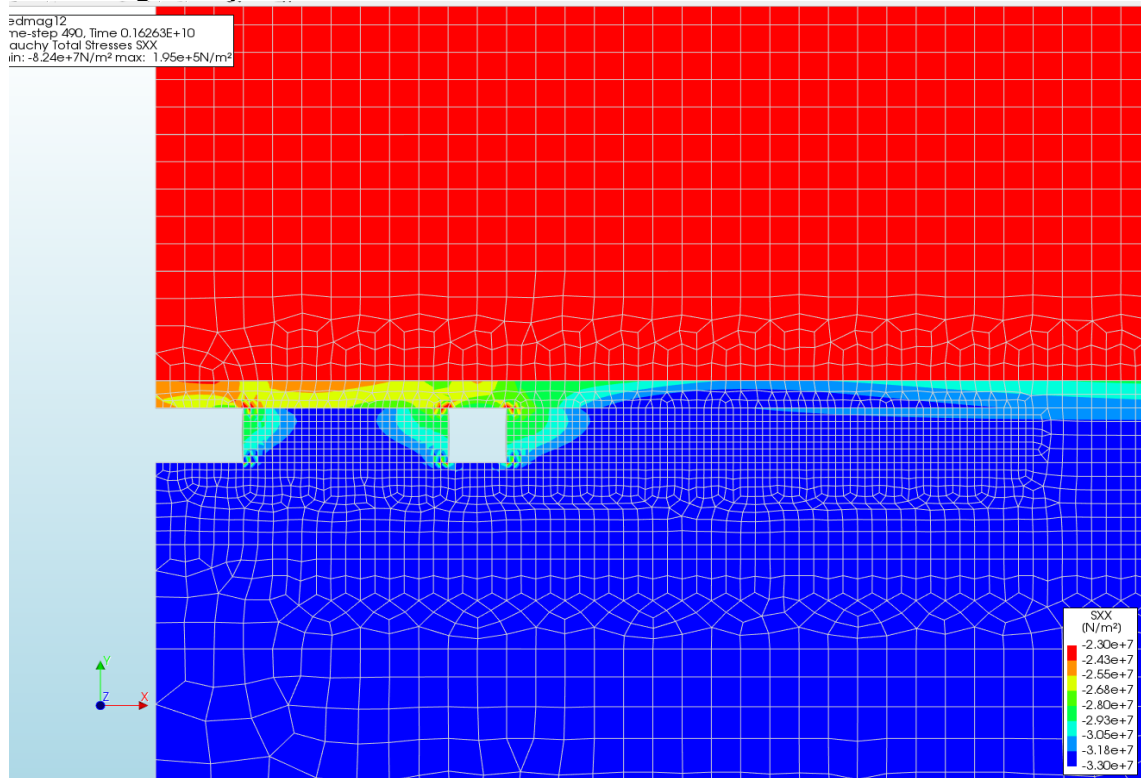
Het zout in het cavernedak en de wand hebben een gereduceerd niveau minimum spanningen t.o.v de oorspronkelijke spanning. Dit effect is echter maar beperkt tot 300 meter van de wand van de caverne. Cavernes die ruim buiten deze 300 m liggen en die geen historie hebben van lage pekeldrukken, zien dus deze verlaagde spanning niet. Bronnen zoals TR9 of de geprojecteerde bronnen VE5 t/m VE8 liggen allemaal ruim buiten deze afstand van 300 m zelfs met conservatieve aannames over waar de pekels precies aanwezig is. Een betere analyse middels 3D modellering volgt in Hoofdstuk 3.



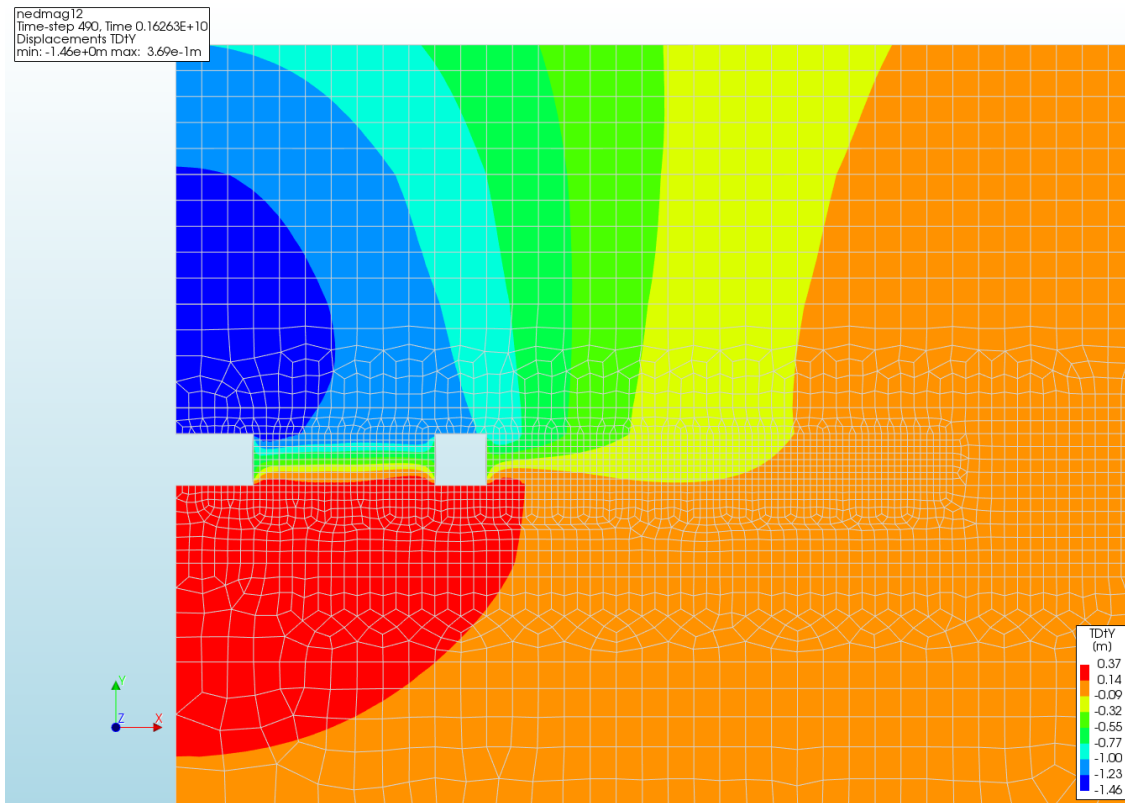
Figuur 16: Von Mises spanningen in zoutlagen (en Bunter) bij 80 bar pekeldruk beneden initiële gesteentedruk.



Figuur 17: Von Mises spanningen in zoutlagen (en Bunter) bij 110 bar druk beneden initiële gesteentespansing. In het zout zijn de hoogste Von Mises-spanningen circa 100 bar in de kunstmatig scherpe hoeken van het model.



Figuur 18: Horizontale spanningen in de zoutlagen (en Bunter) bij 60 bar (na eerst 120 bar) onderdruk van pekkel ten opzichte van initiële gesteentedruk.



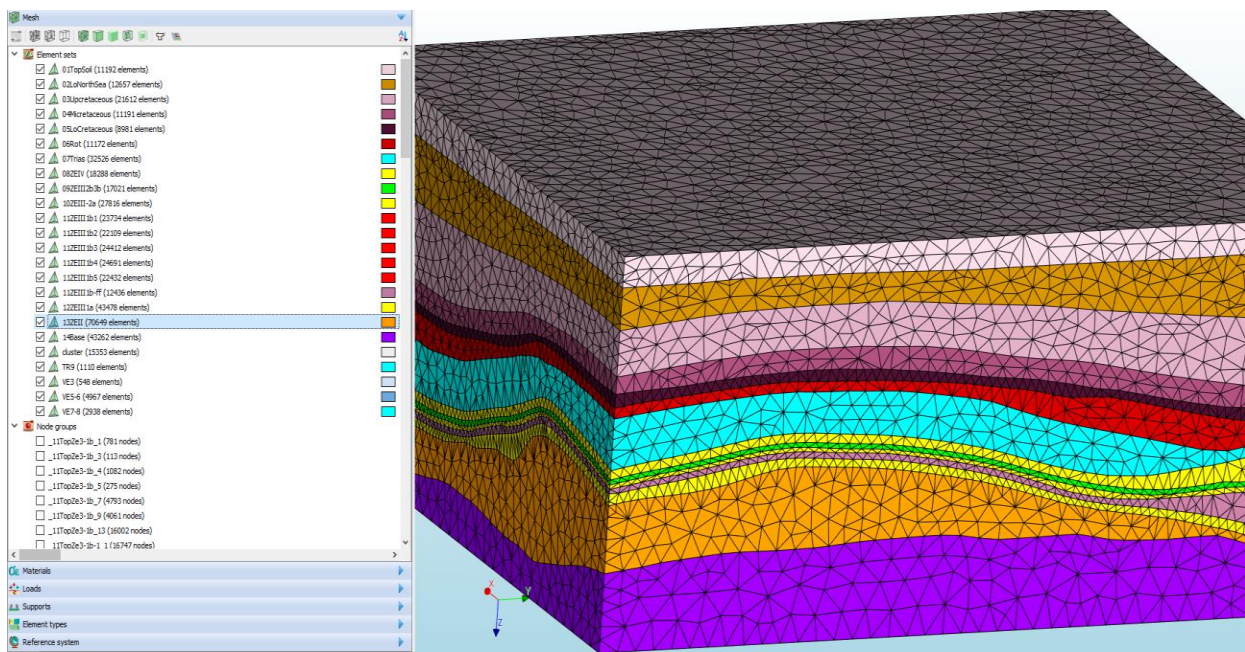
Figuur 19: Gemodelleerde bodemdaling op het einde van de lagedruk pekewinning (tot bijna 1 meter), waarbij er zeer conservatief is aangenomen dat de samendrukking van het precipitaat hoog is.

3 Analyse van dakstabiliteit – 3D analyse

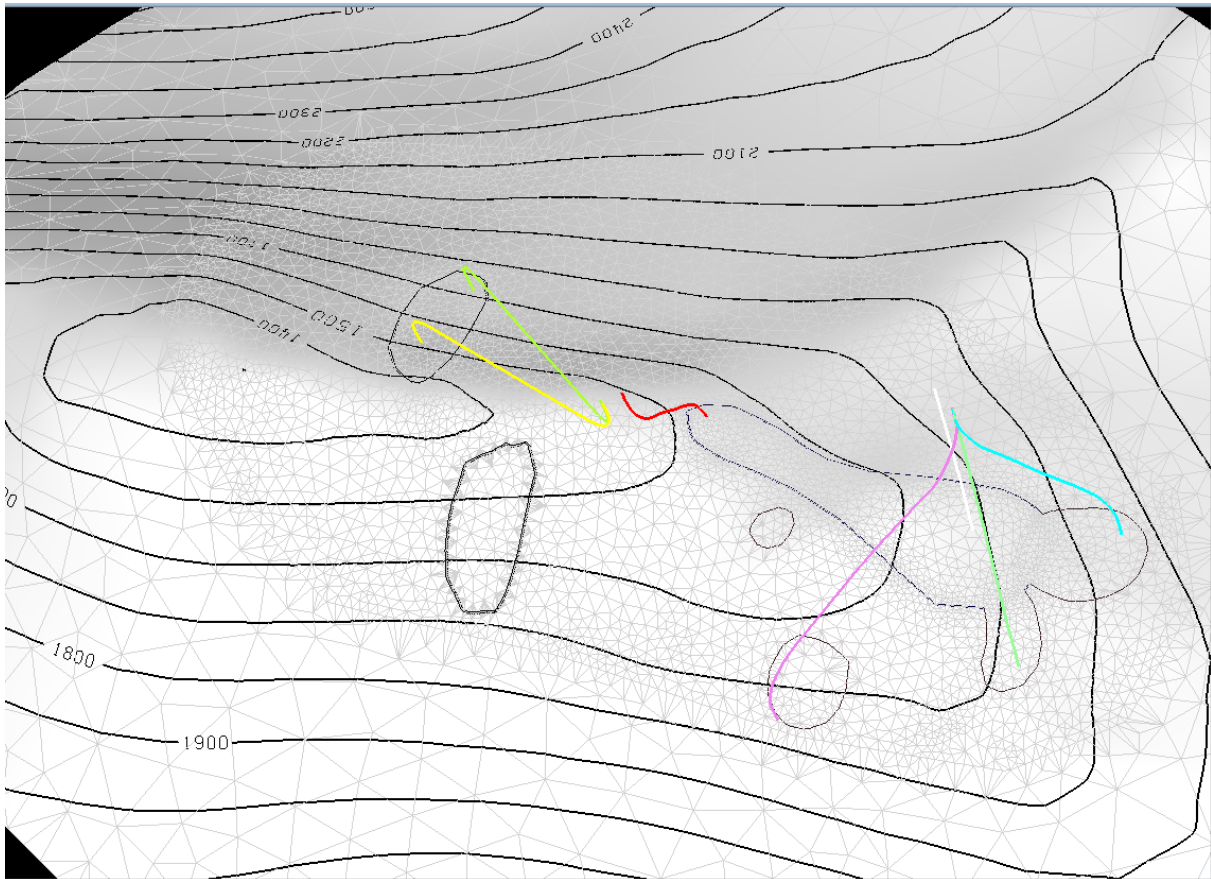
Om de spanningsontwikkeling rond individuele cavernes te kunnen bepalen, alsmede denkbare invloed van het cavernecoluster op de nieuw te ontwikkelen cavernes (of andersom), is een volledig 3-dimensionaal model gebouwd.

De overgangen tussen geologische formaties zijn afkomstig van een geologische interpretatie van seismiek, zoals nader geïnterpreteerd door de universiteit van Aachen en bewerkt in het pakket Petrel. Via een ander softwarepakket (SKUA-Gocad) is het model omgezet in een 3D model van tetrahedrons (piramide van 4 driehoeken), waarin ook de cavernes als losse volumes zijn opgenomen. Deze is vervolgens in de simulator DianaFEA tot een Eindige Elementen Model omgebouwd tot een rekenmodel met circa 400 000 elementen.

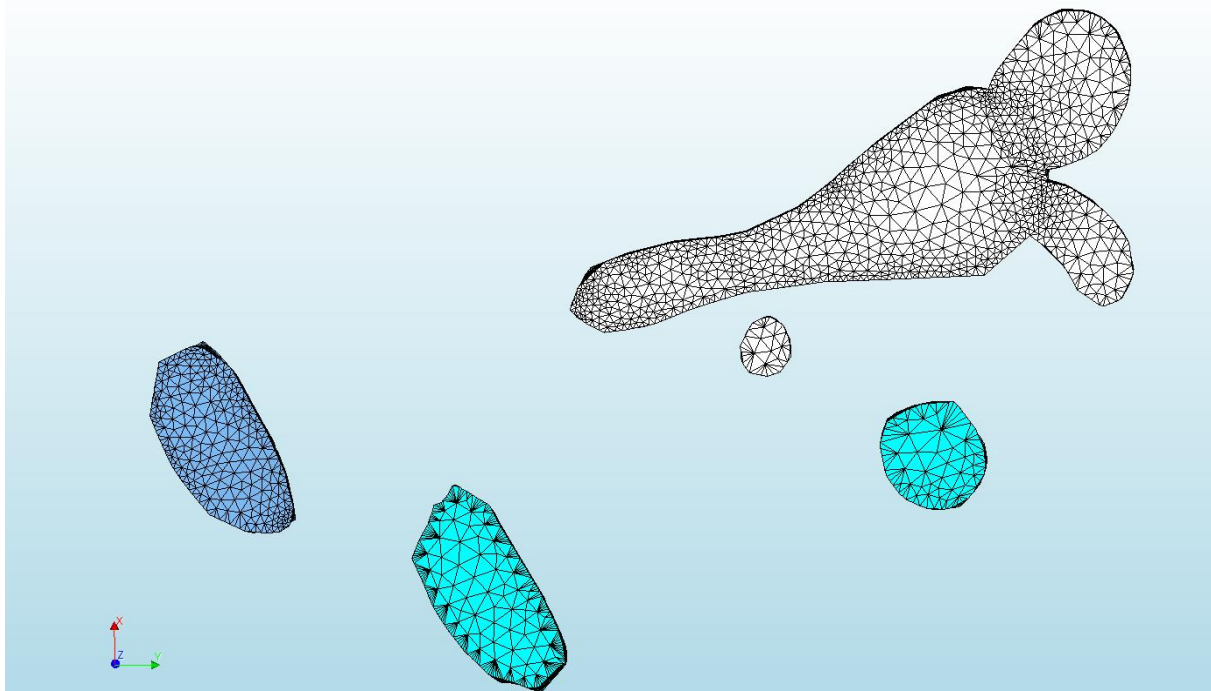
De cavernevormen zijn een representatie van de verbonden ruimtes, de bekende injectiepunten en de verwachte groeirichting (opwaarts via de steilste helling van het zoutkussen). De precieze vorm van de caveerne is niet bekend, omdat er geen technieken bestaan om deze te meten in een labyrint-structuur. Voor de nog te boren bronnen en bijbehorende cavernes is de verwachte locatie en vorm genomen, zoals deze gepland zijn in het winningsplan 2018. De vorm en locatie van de bestaande cavernes kan wel afgestemd worden met de gemeten bodemdalingskom, die bij een foute aanname van de ligging of grootte, verschoven zal zijn ten opzichte van de waarnemingen. Figuur 20 toont het volledige raster (de mesh) vanaf een boven-zijaanzicht. Figuur 21 toont de top van de bischofietsectie met dieptecontouren (in meters) en de omtrekken van gemodelleerde cavernes. Figuur 22 toont de cavernevolumes in een bovenaanzicht. Figuur 23 toont cavernes boven op de steenzoutlaag onder de cavernes.



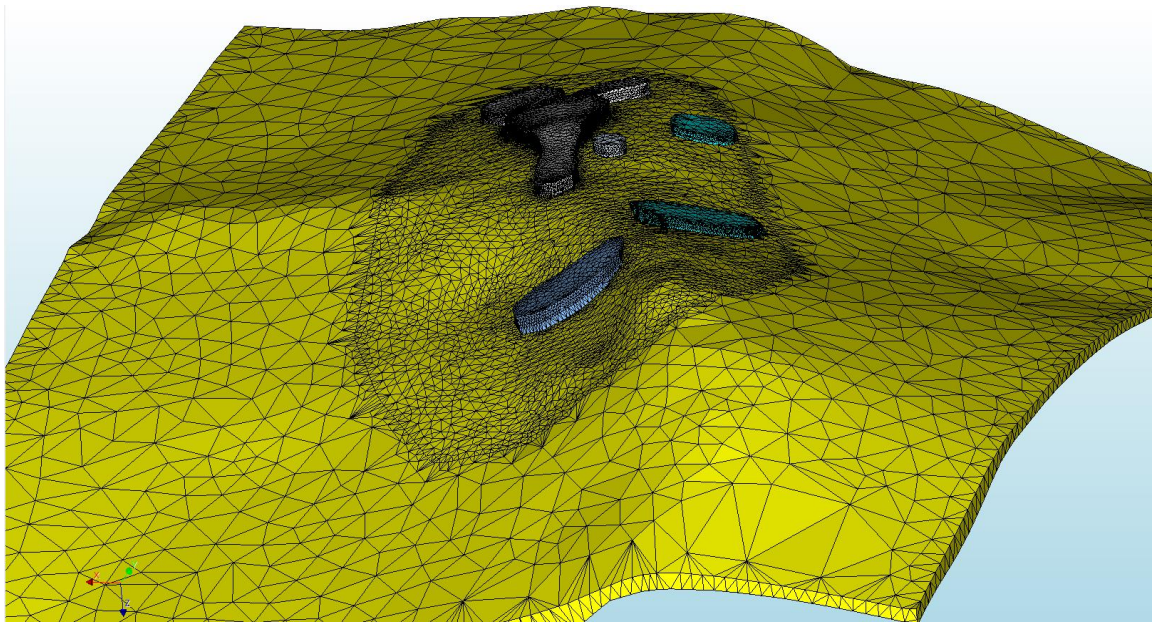
Figuur 20: Formaties in zijaanzicht (bird-eye view). Formaties boven het zout van top tot bodem: Top aarde (=Boven Noordzee), Beneden Noordzee, Boven- Midden- en Beneden- Cretaceous (Krijt), Rot, Trias (Bunter). De gele lagen zijn Zechstein-3 en -4 steenzout, groen carnalliet, met daaronder kastanjebruin bischofiet. De oranje laag is de Zechstein-2 steenzoutformatie en de paarse laag is de Zechstein-1 formatie, voornamelijk bestaande uit sulfaten en carbonaten.



Figuur 21: Top bischofiet met dieptecontouren en randen van cavernes en enkele winningsputten (well paths). rood: VE-4; blauw: TR4; wit TR-2; groen: TR-8; paars: TR-9; geel/groen: VE5-6



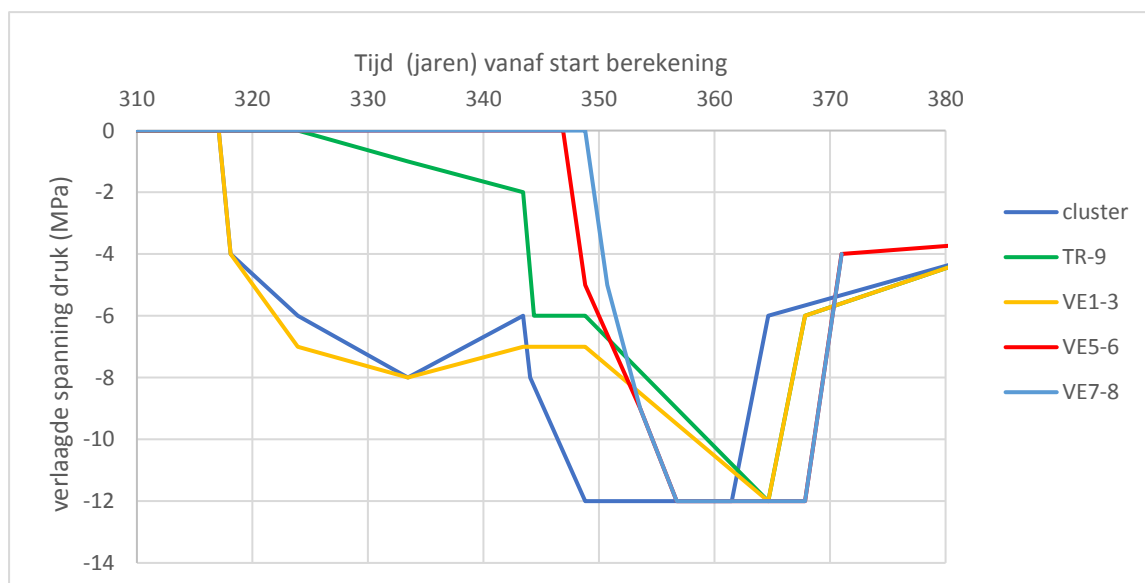
Figuur 22: Omtrek van de cavernerasters (meshes).



Figuur 23: cavernes bovenop de onderliggende steenzout formatie.

De cavernevormen hebben door logging en kruip gefluctueerd. De 2018 vorm is genomen voor bestaande cavernes. Het drukverloop per caveerne is in Figuur 24 weergegeven. Drukveranderingen starten in jaar 318 van de simulatie (in werkelijkheid het jaar 1993), waarbij de eerste 318 jaar gebruikt zijn om het model in evenwicht te brengen met de kussenvorm, zodat er geen onrealistische schuifspanningen in het zout meer aanwezig waren, die slechts het gevolg zijn van een numerieke spanningsinitialisatie.

De drukpiek bij jaar 343 is de drukpiek van het TR-cluster (donkerblauwe lijn), vlak voor de initiatie van de scheur in april 2018. De drukverlopen van de nieuw te boren bronnen zijn uiteraard schattingen, die door externe gevolgen, zoals het wachten op vergunningen of de pekelbehoefte in werkelijkheid anders kunnen zijn.

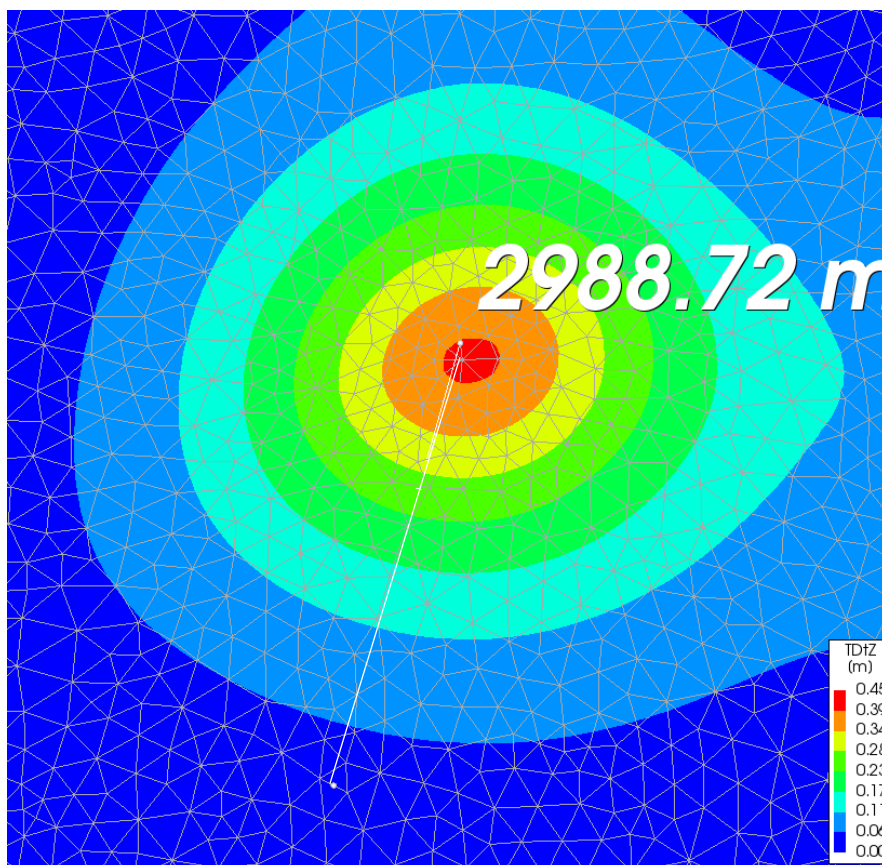


Figuur 24: Pekeldruk zoals gemodelleerd in de Eindige Elementen simulator.

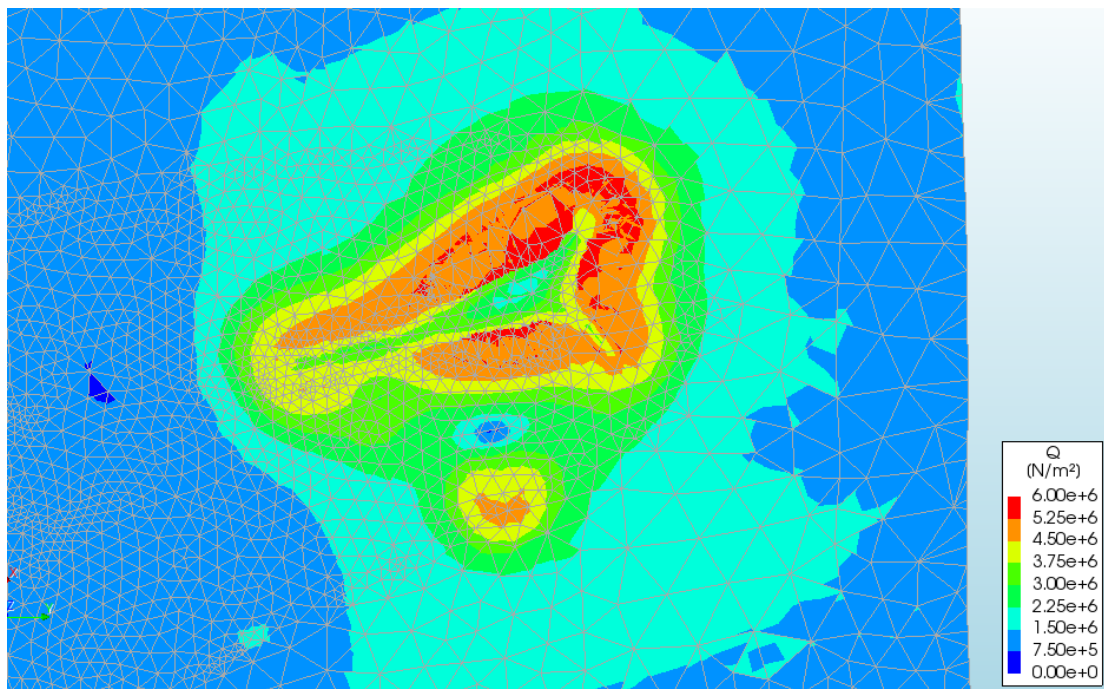
De resulterende 2018 bodemdalingskom is getoond in Figuur 25. Deze is in goede overeenstemming met de positie en vorm van de gemeten kom, met een 10% dalingscontour op circa 3 km van het diepste punt en een contour van 50% op circa 1,5 km.

3.1 Ontwikkeling schuifspanningen

De schuifspanningen (Von Mises spanningen) eind-2019 in het zoutdak (bij een pekelderdruk van 90 bar; circa 10 bar lager dan eind 2018) zijn getoond in Figuur 26. Figuur 27 toont de Von Mises spanningen in 2025 bij een cluster-pekeldruk van 120 bar beneden de initiële zoutspanningen, nu ook in combinatie met spanningsveranderingen rond VE5-6 en VE7-8. De kruiprekken in het steenzout blijven klein (<2.5%) zelfs na het verlaten van het cluster (figuur 28). De rekken in de steenzoutlaag tussen de bischofiet en carnallietlaag zijn iets hoger (figuur 29). Deze laag zal de eerste barrière vormen voor de nieuwe cavernes, waar geen loging van de carnallietlaag daarboven voorzien is.

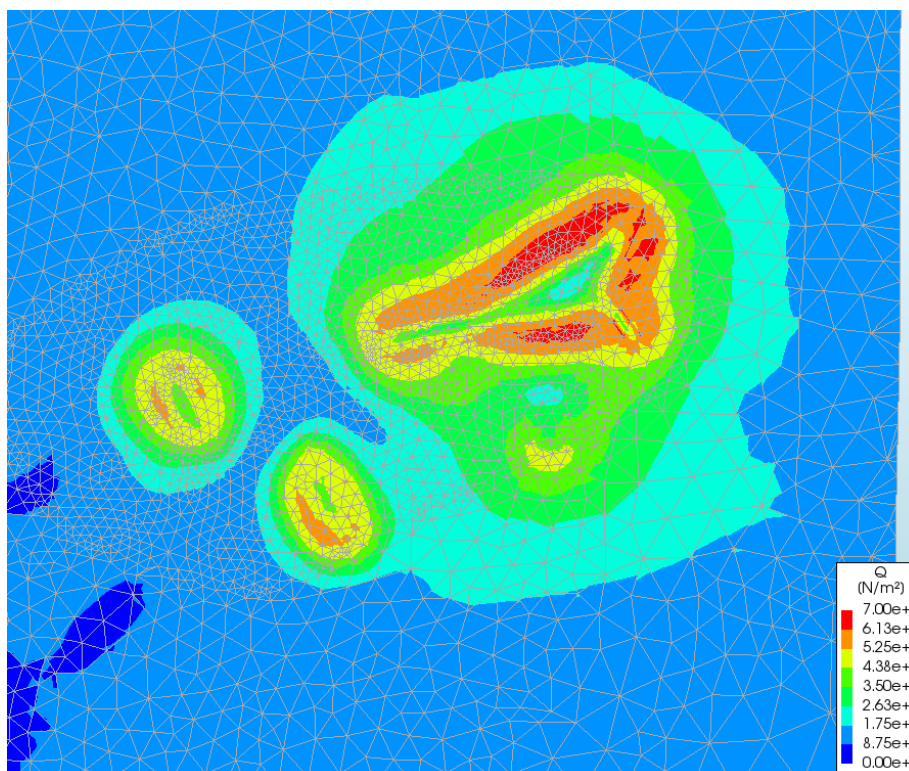


Figuur 25: Bodemdaling 2018 met lengte-lijn om de afstand tussen de maximum bodemdaling en de 10% contour aan te geven. Bij een maximum van 45 cm is dit de 4,5 cm lijn.

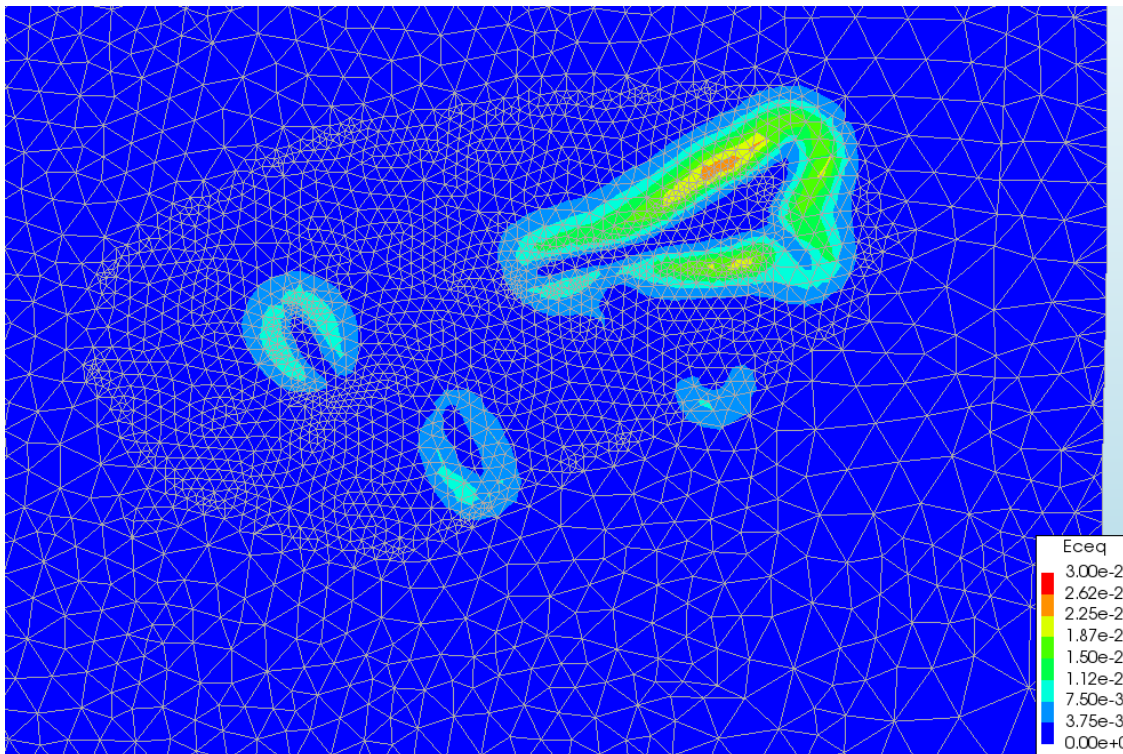


Figuur 26: Von Mises spanningen in het steenzout dak (0-60 bar) bij een pekeldruk van 90 bar onder de initiële zoutspanningen, medio 2019

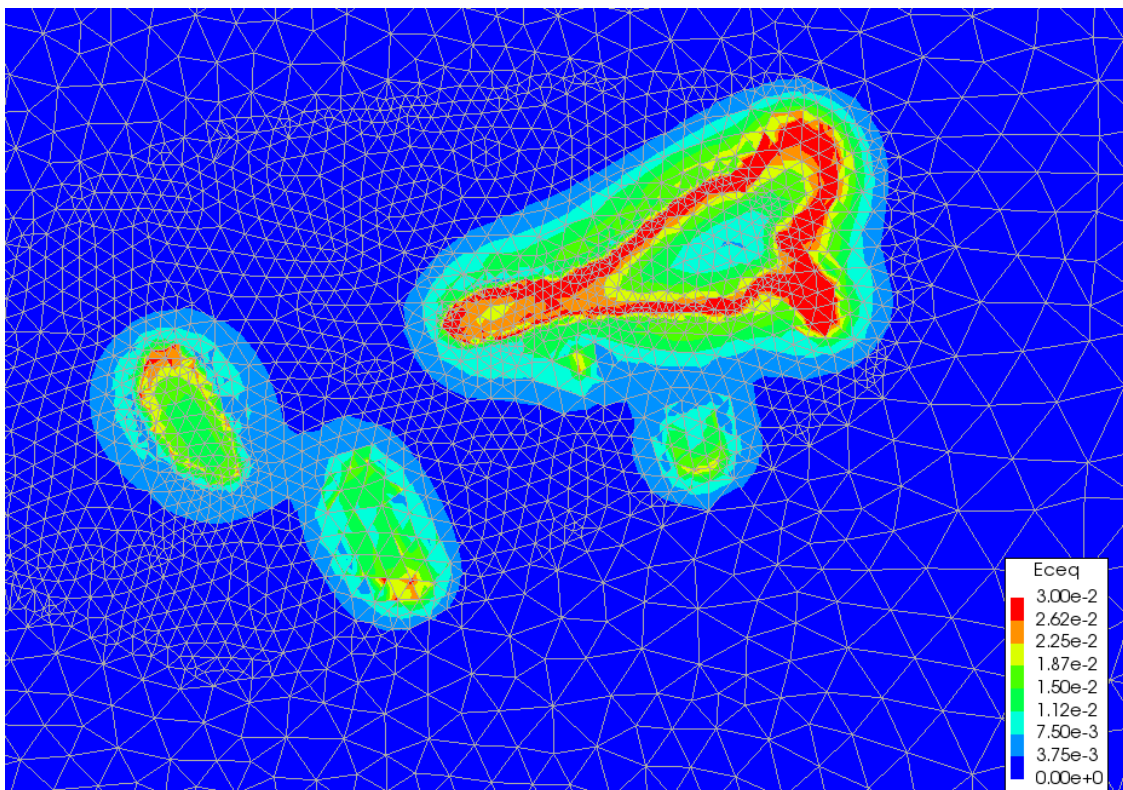
De lage schuifspanningen in combinatie met de beperkte rekken, zullen niet leiden tot verhoogde dilatantie en permeabiliteit. Opslagcavernes, bijvoorbeeld voor gasopslag, hebben in de regel hogere spanningen en rekken en ontwikkelen zover bekend geen relevante lekpaden via het zout.



Figuur 27: Von Mises spanningen in zoutdak (0-70 bar) bij 120 bar drukdaling in het cluster medio 2025 met 80 bar drukdaling in de cavernes VE5-6 en VE7-8.



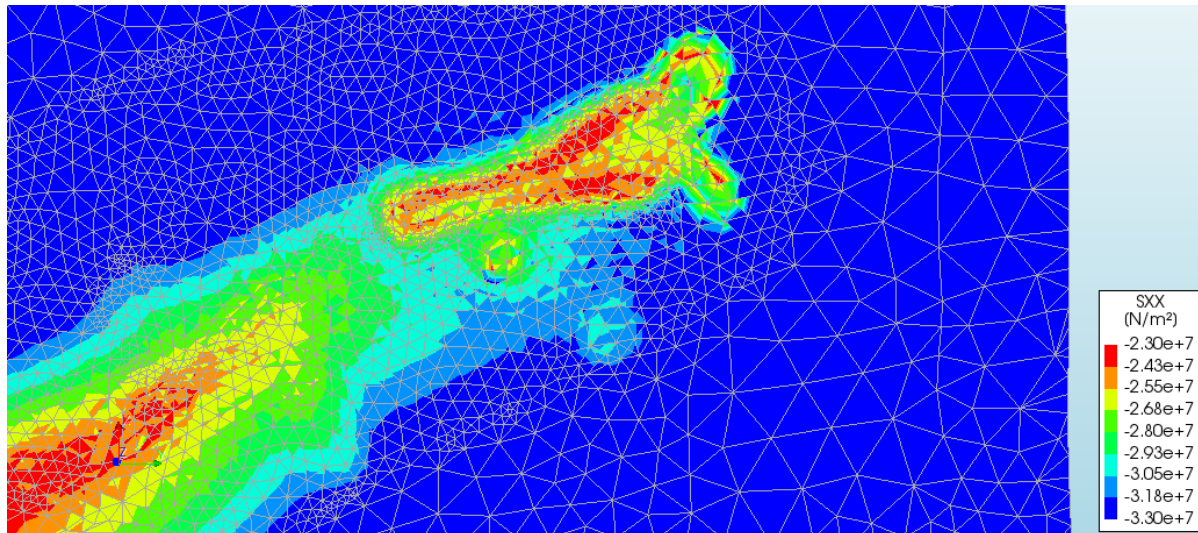
Figuur 28: Kruiprek in steenzoutdak in een post-abandonment fase (2045)



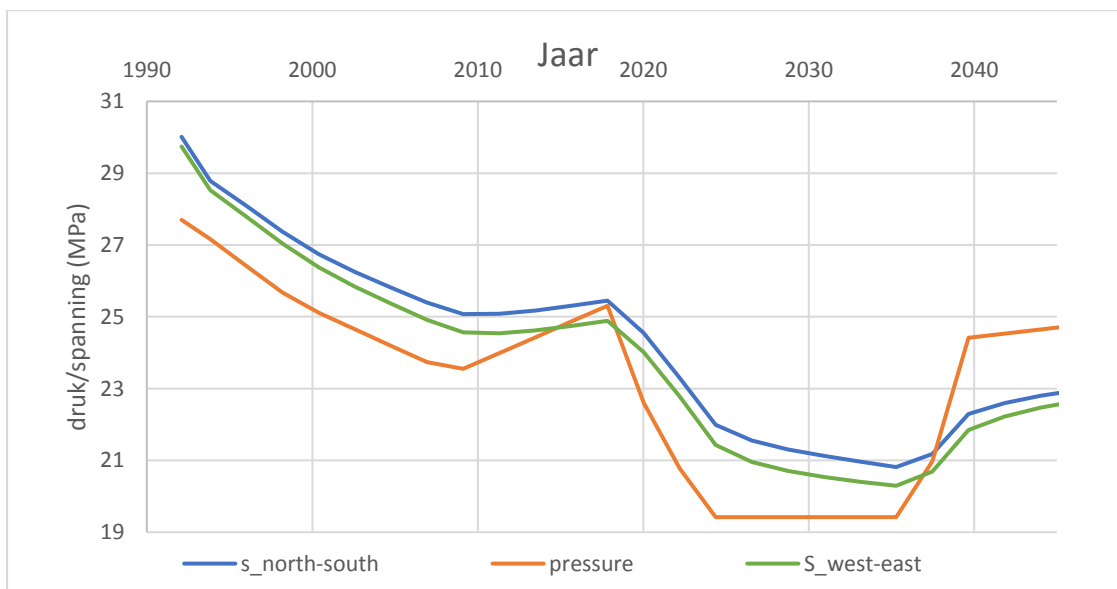
Figuur 29: Kruiprek in de steenzout tussenlaag (0-3%) in de post-abandonment fase (2045)

3.2 Kans op scheurvorming voor het steenzout dak

Vergelijkbaar met de axi-symmetrische modellering, laat de 3D modellering voorafgaand aan het incident van april 2018 een spanningsdaling zien van 60 bar; zie Figuur 30. Figuur 31 toont de druk- en spannings-evolutie, voor een (enigszins willekeurig) element in het zoutdak boven het cluster. Te zien is dat de vloeistofdruk hoger is dan de zoutspanning vlak voor het incident, maar dat dit na abandonnering ook weer zal gebeuren.



Figuur 30: Horizontale (Noord-zuid) spanningen net voor april 2018 bij het zoutdak. In het midden van het rode gebied in het midden is de zoutspanning 240 bar, een daling van circa 60 bar ten opzichte van de omgeving.



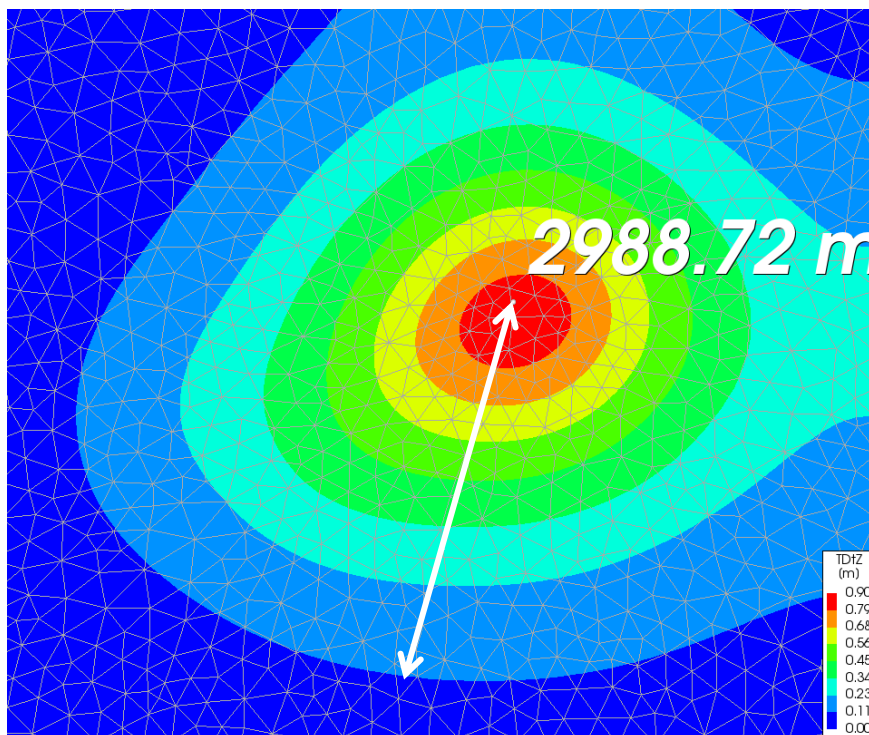
Figuur 31: Oost-west en Noord-zuid spanning (positief voor druk) en pekeldruk evolutie voor het zoutdak, waarbij de pekeldruk de minimumspanningen in het zoutdak overschrijdt in 2018. Voor het ontwikkelen van een scheur is het noodzakelijk dat de vloeistofdruk de zoutspanning overschrijdt.

Nadat door zoutkruip het meeste van de vrije pekeldruk (pekeldruk niet ingesloten in precipitaat) via Nedmag's winningsputten naar maaiveld is verdrongen, en na verdere oplosmijnbouw in de nieuwe en niet tot het cluster behorende cavernes, is de bodemdaling circa 90 cm (Figuur 32).

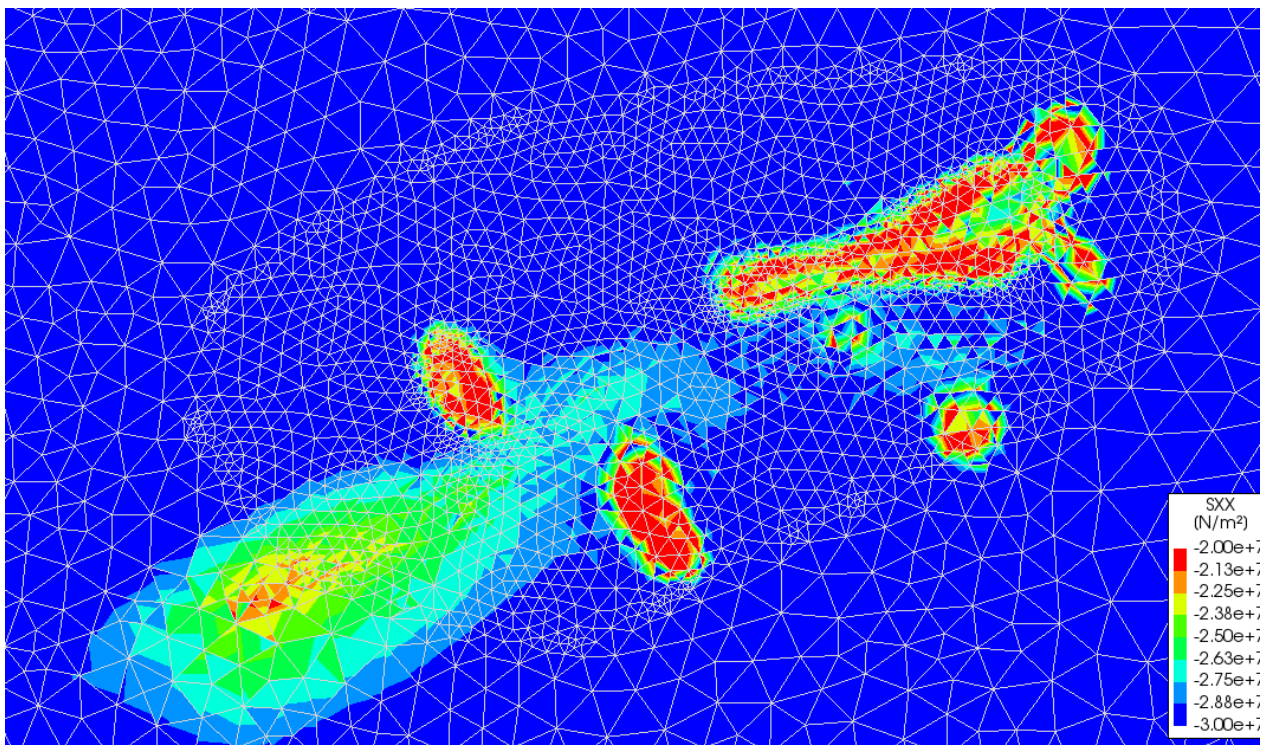
Een realistisch moment is het jaar 2045, zoals aangenomen door Nedmag in hun planning. De voorspelde bodemdaling op een kaart van Veendam en omgeving is getoond in Figuur 35.

Wanneer het cluster is ingesloten na abandonneren bij een bodemdaling van 90 cm en na een langere periode (11 jaar) bij 120 bar druk onder de initiële spanning, zullen de drukken weer stijgen als gevolg van kruip. De convergentie zal worden teruggebracht tot minder dan $2 \text{ m}^3/\text{h}$ bij 120 bar druk beneden de initiële spanningen. Het op druk komen met 30 bar zal vermoedelijk 1-4 jaar duren, afhankelijk van een systeemstijfheid die nog niet bekend is, maar tegen de tijd van afsluiting nauwkeurig gemeten kan worden. De drukken in deze simulatie zijn opgelegd en niet het gevolg van de convergentie. De onnauwkeurigheid is echter voornamelijk een kwestie van tijdschaal. De horizontale spanningen zijn gedaald met 90 bar (Fig. 33), waar de simulatie een onderdruk van 60 bar aanhoudt. Deze druk is vermoedelijk te hoog en zal tot hernieuwde scheurvorming leiden.

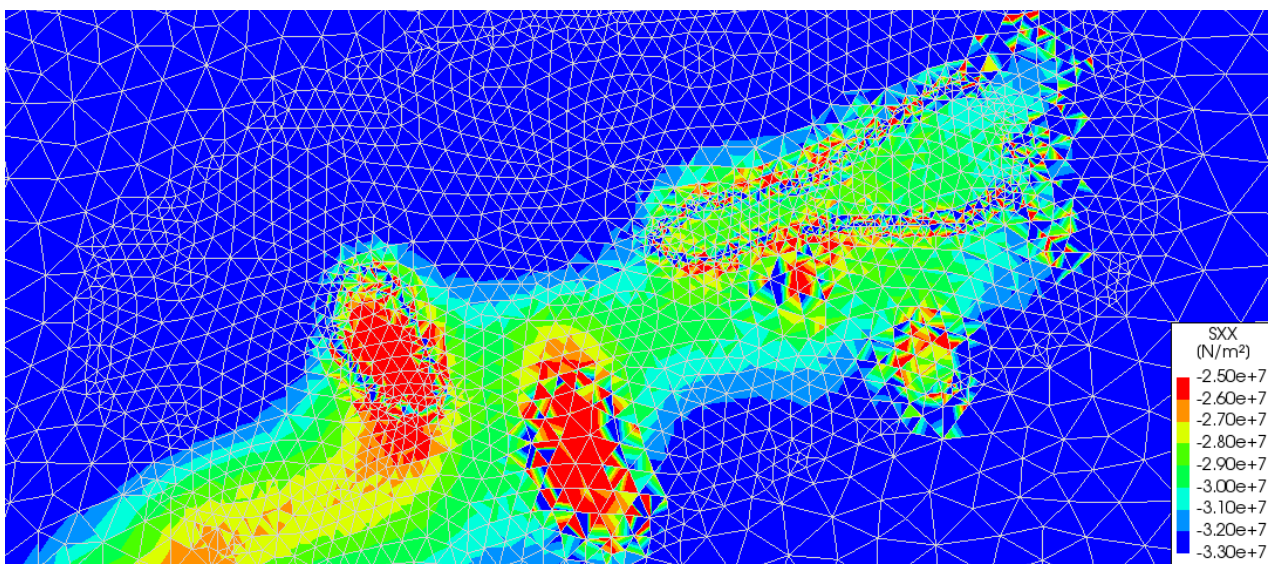
Wanneer er gekeken wordt naar de spanningsreductie van het tussendak (Figuur 34), wordt een gereduceerd effect waargenomen ten opzichte van het steenzoutdak boven de carnallietlaag. Dit is gevolg van het gereduceerde effect van de schildwerking van de elastische lagen, waardoor zoutkruip makkelijker de oorspronkelijke spanningen terugbrengt. Dit effect is met name relevant voor de cavernes die slechts in de bischofietlaag ontwikkeld worden.



Figuur 32: Bodemdaling 2045 met schaal 0-90 cm. De pijl geeft de afstand tussen de maximale bodemdaling en de 10% lijn, ongeveer 3 km. Het effect van VE5-6 en VE7-8 is zichtbaar door excentriciteit van de bodemdaling aan de linkeronderhoek.

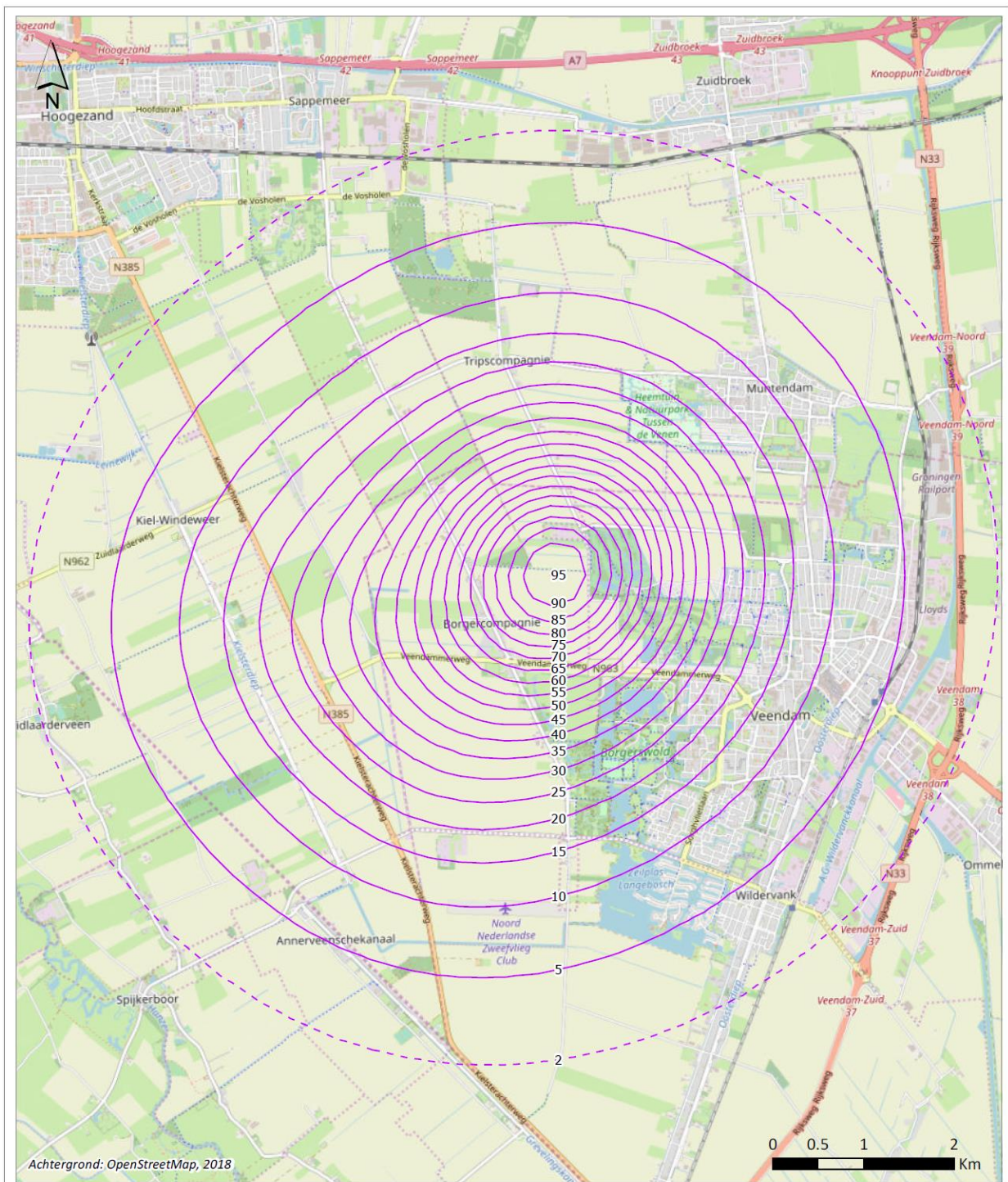


Figuur 33: Horizontale (Noord-zuid) spanningen in het steenzoutdak na 93 cm bodemdaling bij een clusterdruk van 60 bar beneden de initiële spanningen post-abandonnering. De zoutspanningen zijn op dit moment circa 90 bar gedaald ten opzichte van de initiële spanning, waardoor de kans bestaat dat er wederom een lekpad ontstaat. De nog te boren bronnen hebben op dit moment een drukdaling van 80 bar en hebben geen contact met het cluster.



Figuur 34: Horizontale spanningen in de steenzoutlaag tussen de bischofiet en carnallietlaag, die een geringere spanningsreductie lagen zien, die slechts relevant is voor de nieuw te boren bronnen, die geen open verbinding hebben met de carnallietlaag.

Beheersen van drukken in Nedmag cavernes tijdens de logings- en afbouwfase en een evaluatie van het cavernegedrag na cementeren van de bron (abandonneren)



Figuur 35 Conservatieve schatting van de bodemdaling medio 2045 met tot 95 cm bodemdaling, weergegeven in 5 cm intervallen van de contourlijnen. De stippellijn geeft de verwachte 2 cm contour aan.

4 Algemene conclusies van studie naar zoutspanningen

- De minimum spanningen in het steenzoutdak boven de Nedmag cavernes nemen af in de tijd, naar een niveau dat de pekeldrukken volgt in de tijd. De spanningen nemen echter maar zeer beperkt toe, indien de cavernedruk wordt verhoogd. De invloed is beperkt tot circa 300 m vanaf de cavernewand, waardoor de spanningsverlaging geen invloed heeft op verder weg gelegen cavernes zoals de nieuw te ontwikkelen cavernes of de bestaande caveerne TR9.
- De beste manier om scheurvorming te vermijden is om de cavernes een gestaag afnemende cavernedruk te geven met een geringe marge voor hogere drukken, nadat een caveerne langere tijd op lage druk heeft gestaan.
- Het te vroeg aannemen van een lage druk bij een nieuwe caveerne, zorgt dat deze te langzaam groeit, en daarmee te weinig contactoppervlak met bischofiet geeft, waardoor onnodig lang een oliedak nodig is en/of de pekeldruk onder de maat is. Daarom wordt aangeraden met een hogere pekeldruk te beginnen vanuit een nieuw geboorde winningsput.
- De druk dient langzaam verlaagd te worden zodra het berekende volume pekeldruk nabij 450,000 m³ komt (of het dubbele voor een voorzien cluster van twee bronnen), waarbij de druk naar 80-90 bar onder de initiële gesteentedruk dient te dalen, om hiermee het ondergrondse vrije pekeldruk te beperken tot maximaal 1,5 miljoen m³ per caveerne (TR-9 bijv.) of cluster van verbonden cavernes (zoals VE5-6 en VE-7 en -8)). Bij lage drukken en beperkte pekeldruk kan er zich nooit meer een incident voordoen op de schaal van april 2018.
- Voorgesteld wordt om de maximale cavernedruk maximaal 15 bar boven de laagste jaargemiddelde druk uit te laten stijgen en dit systeemtechnisch te borgen.
- Voor grote cavernes (>500.000 m³ vrije pekeldruk) is het vermoedelijk productietechnisch het handigst om twee bronnen als toegang te hebben (mini-cluster) om zo pekeldrukproductie en waterinjectie via een aparte bron te doen. Dit verlaagt de kans op verstoppingen en corrosie, verhoogt de kans op pekeldruk met een hoge concentratie magnesiumchloride. Daarnaast kan ten alle tijden druk worden afgelaten, als één put tijdelijk buiten gebruik is, bijvoorbeeld in afwachting of uitvoering van reparatiewerkzaamheden.

5 Het effect van post-abandonnering lekkage van cavernes door scheurvorming

Wanneer pekeldrukken de zoutspanningen overschrijden kan een scheur worden gecreëerd, die zorgt voor pekellekkage uit de caveerne. Vertakte scheuren of een permeatieproces (door microscheurtjes ofwel barstjes) zullen een langzame lekkage opleveren, die in balans staat met een geringe verkleining van de cavernes door kruip. Een enkele scheur kan echter niet uitgesloten worden, waardoor de caveerne kortstondige drukdalingen laat zien, gevolgd door een hersluiten van de scheur. Deze pulsiforme lekkages kunnen in theorie ook tot scheurvorming leiden boven het zout. Voorkomen moet worden dat deze tot in de zoetwaterlagen reiken (dus tot minder dan 250 m onder maaiveld reiken), om te voorkomen dat pekels of met de pekels meestromende dieselolie deze lagen vervuilen.

Tijdens het lekkage-incident dat begon op 20 april 2018, is een scheur ontstaan tussen het cavernecoluster en de bovenliggende gesteentes, waardoor 75 000 m³ pekels in twee dagen uitstroomde (en maximaal 25 000 m³ in de weken daarna).

Panterra (P. v.d. Hoek Okt 2018) heeft de scheurvorming na het incident gemodelleerd. De meest kritische periode zijn de eerste uren na het ontstaan van een scheur, waarbij de stroomsnelheden groot zijn, en de gesteentes boven het zout onvoldoende permeabiliteit (doorlatendheid) hebben om de pekels op te nemen. De scheur kan dan alleen maar langer of breder worden om het pekelsvolume op te nemen. Hoewel veel gegevens, zoals doorlatendheid, niet goed bekend zijn, is er op basis van gegevens uit de wijde omgeving toch een betrouwbaar model gemaakt, op basis waarvan het aannemelijk is dat de scheur in april 2018 de ondiepe lagen niet bereikt heeft, wat ondersteund wordt door het monitoren van diverse ondergrondse meetpunten op de aanwezigheid van magnesiumpekels of diesel.

Na de beëindiging van de pekelswinning, als de zoutkruip onvoldoende is om een bron in productie te houden (gedacht wordt aan circa 2 m³ per uur bij de laagst mogelijke cavernedruk), zal er een cementplug worden geplaatst, waardoor de caveerne langzaam weer in druk zal oplopen en denkbaar na enkele maanden of jaren een scheur zou kunnen ontstaan. Er is aangenomen dat er op dat moment in de betreffende caveerne of in het betreffende cavernecoluster nog slechts 100 000 m³ "vrije" bischofietische pekels aanwezig is plus de gebonden pekels plus de helft van de (moeilijker te winnen) vrije carnallietische pekels. Dat is significant minder dan de pekelsvolumes die tijdens het incident in het TR-coluster aanwezig waren (7,5 miljoen m³ pekels).

De werkelijke hoeveelheden en de stijfheid van het systeem (de hoeveel m³ die gepaard gaat met 1 bar drukdaling) kunnen pas bepaald worden als de caveerne eerst voldoende klein gemaakt is. Pas dan kan een drukproef gedaan worden, waarbij de stijfheid nauwkeurig bepaald wordt.

Panterra heeft op basis van de uitgangspunten berekeningen gemaakt van de scheurvorming na het verlaten van de cavernes, zowel voor de nieuwe cavernes als voor het huidige coluster en de bestaande niet aan het coluster zittende cavernes.

Met een analogie naar het clusterincident is aangenomen dat de druk bij een lek daalt met 30 bar, waarvan 10 bar in 30 minuten en een volgende 20 bar in 48 uur. Het elastisch volume is hier geschaald naar het overblijvend pekelsvolume.

De post-abandonment pekelsvolumes zijn weergegeven in tabel 1.

Beheersen van drukken in Nedmag cavernes tijdens de logings- en afbouwfase en een evaluatie van het cavernegedrag na cementeren van de bron (abandonneren)

| | free 2b/3b brine at time of abandonment | bound brine at time of abandonment | compressibility | outflow 1st half hour | outflow 0.5 - 48 hours |
|---------------------|---|------------------------------------|--|-----------------------|------------------------|
| | M(m ³) | M(m ³) | m ³ /bar per M(m ³) | m ³ | m ³ |
| Cluster | 0,495 | 3,76 | 1104 | 11039 | 22077 |
| TR-9 | 0 | 0,27 | 105 | 1048 | 2096 |
| VE-1 (no 1b cavern) | 0,025 | 0,12 | 38 | 379 | 758 |
| VE-2 | 0,02 | 0,16 | 89 | 892 | 1784 |
| VE-3 | 0,035 | 0,63 | 201 | 2007 | 4014 |
| VE-2 + -3 | 0,055 | 0,79 | 245 | 2453 | 4906 |
| VE-5 + -6 | 0 | 0,48 | 152 | 1516 | 3033 |
| VE-7 + -8 | 0 | 0,37 | 127 | 1271 | 2542 |

Tabel 1: pekelvolumes in de cavernes, stijfheden en uitstroming in geval van scheurvorming, na abandonment.

De uitstroomvolumes waren de invoer voor de scheur-propagatie studie voor de cavernes (clusters) als in Tabel 2:

- TR-cluster (TR-1 t/m 8 en VE-4)
- VE5-6 (ook conservatief representatief VE7-8 en TR-9)
- VE2-3 (aannemend dat deze ooit onderling verbonden raken, ook conservatief representatief voor VE-1, VE-2 en VE-3)

| | outflow 1st half hour | outflow 0.5- 48 h | Init. frac depth | viscosity brine | density brine |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|
| | m ³ | m ³ | | mPa.s | kg/l |
| cluster | 11000 | 22000 | top 3b | 3.1 | 1.3 |
| VE-5/-6 (also repr VE-7/-8 and TR-9) | 1500 | 3000 | top 1b | 5.7 | 1.35 |
| VE-2/3 | 2500 | 5000 | top 3b | 3.1 | 1.3 |

Tabel 2: Geschatte uitstroomvolumes post-abandonment voor de eerste 30 minuten (10 bar drukkaling) en vervolgens 47.5 uur (verdere 20 bar drukkaling).

De beste inschatting van het minimum spanningsprofiel is overgenomen van een eerdere studie (v.d Hoek; okt 2018), en is weergegeven in Figuur 36. Hierin is aangegeven dat de verwachting is dat kleien een hogere horizontale spanning hebben dan zanden. De zoutspanningen komen uit deze studie (met een reductie door spanningsrelaxatie).

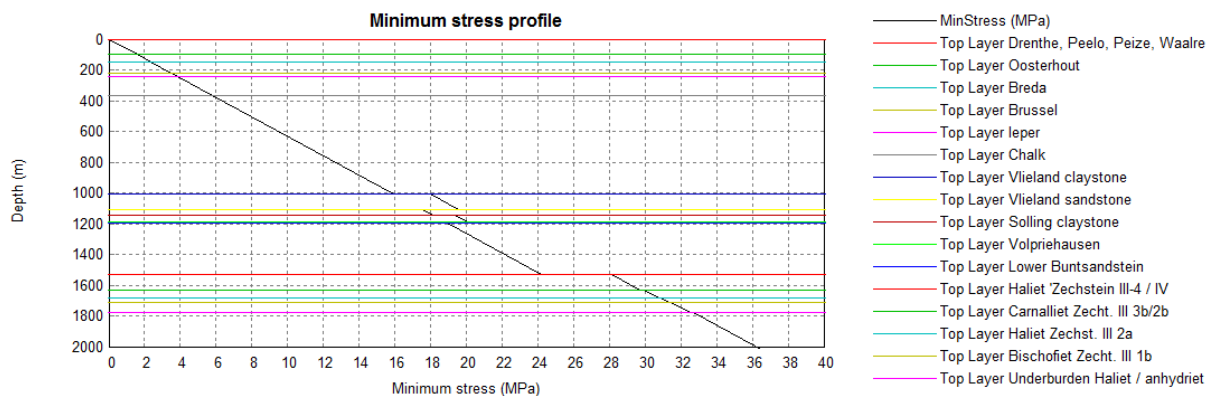


Fig. 36: minimum spanningsprofiel (diepte in meters) tegen spanning in MPa (1 MPa= 10 bar) samen met de geaagdheid in het model.

De doorlatendheid van het gros van de overliggende gesteentes is laag (0.1-10 mD), met positieve uitschieters in de Vlieland zanden en ondiepe zanden, Figuur 37. Voor de eerste 48 uur periode, kunnen zelfs de gesteentes met lage (1mD) permeabiliteit relevante hoeveelheden pekel opnemen, maar voor de eerste 30 minuten, zijn het alleen de permeabele zanden die dit doen.

Beheersen van drukken in Nedmag cavernes tijdens de logings- en afbouwfase en een evaluatie van het cavernegedrag na cementeren van de bron (abandonneren)

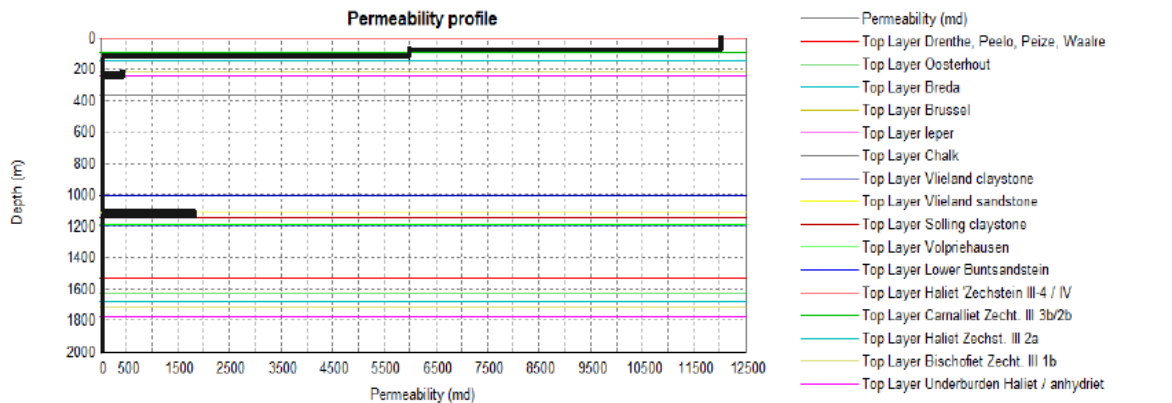


Fig. 37: Permeabiliteit (in mD) als functie van diepte en laag

De scheurgroei voor de post-abandonnering cluster is getoond in Figuur 38, waar het verwacht wordt dat de scheur tot de Vlieland zanden groeit in ongeveer 20 minuten en stopt met groeien onder de Vlieland Kleisteen. De navolgende lekkage over 48 uur met een sterk gereduceerde stroming verandert de scheurgrootte verder niet meer.

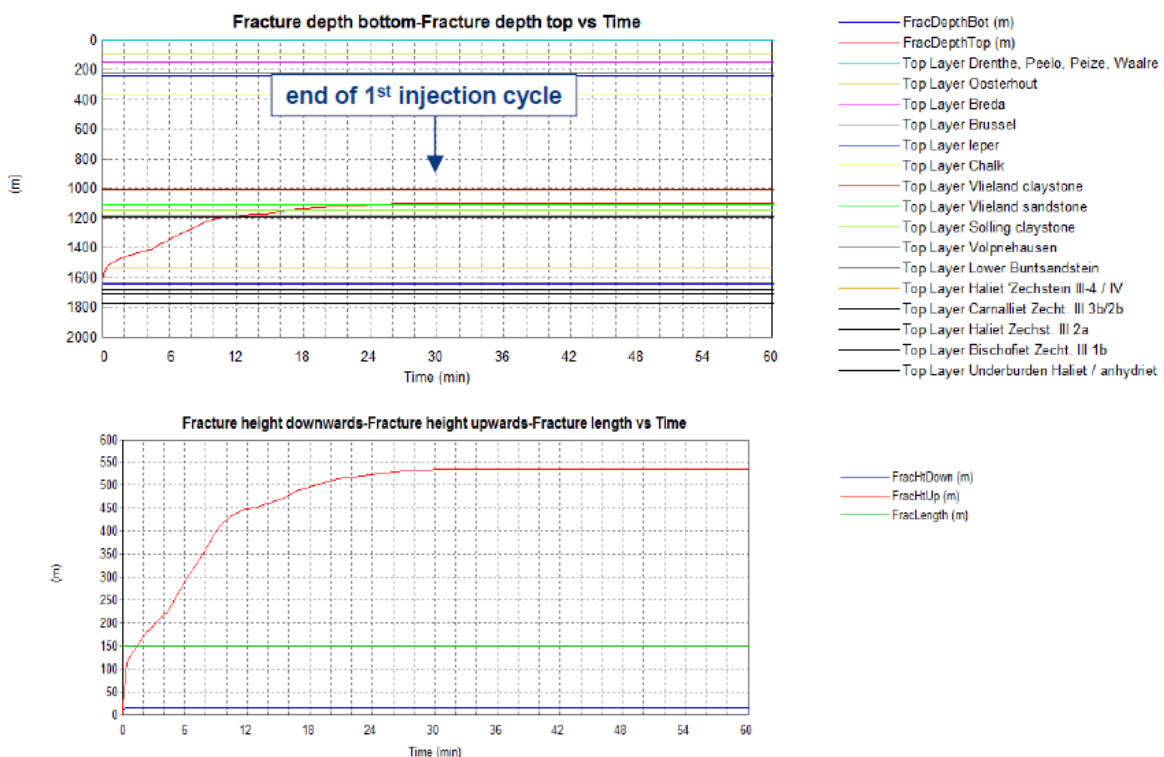


Fig. 38: Scheurgroei (in hoogte) voor het TR-cluster

Een vergelijkbare berekening is gemaakt voor cavernecoluster VE5-6, waar het totale pekervolume veel kleiner is dan in het TR-cluster, zie Figuur 39. In dit geval zijn de volumes te klein om een scheur tot de Vlieland zanden te genereren. Omdat VE5-6 alleen bischofitische pekkel zal bevatten (met een dichtheid tot 1,35 kg/l versus 1,30 kg/l voor carnallitische pekkel), zal de hogere dichtheid ook bijgedragen hebben bij het beperken van de scheurgroei.

Voor het (potentiële) cluster VE2-3, voorspellen de simulaties dat de scheur binnen de Bunter blijft, zie Fig 40.

De meest ongunstige lekkage voor nieuwe en huidige cavernes is veel kleiner dan tijdens het incident van april 2018. Het wordt echter geadviseerd dit soort berekeningen nogmaals te doen wanneer het definitief verlaten van cavernes wordt overwogen voor de korte termijn, waarbij meer bekend is over de overgebleven pekervolumes, de stijfheid van het systeem en waarbij mogelijk ook meer bekend is over de gesteentes boven het zout.

Gedetailleerde informatie over de scheurberekeningen is te vinden in de referentie van Panterra (V.d.Hoek nov 2018).

Het risico van breuk (fault) reactivatie door tijdelijke drukpieken in de gesteentes boven het zout zal ook veel kleiner zijn bij kleinere uitstroomvolumes. Deze risico's zijn besproken in de referentie van de Universiteit van Aachen, Urai (nov 2018).

Results after 1 hour of injection

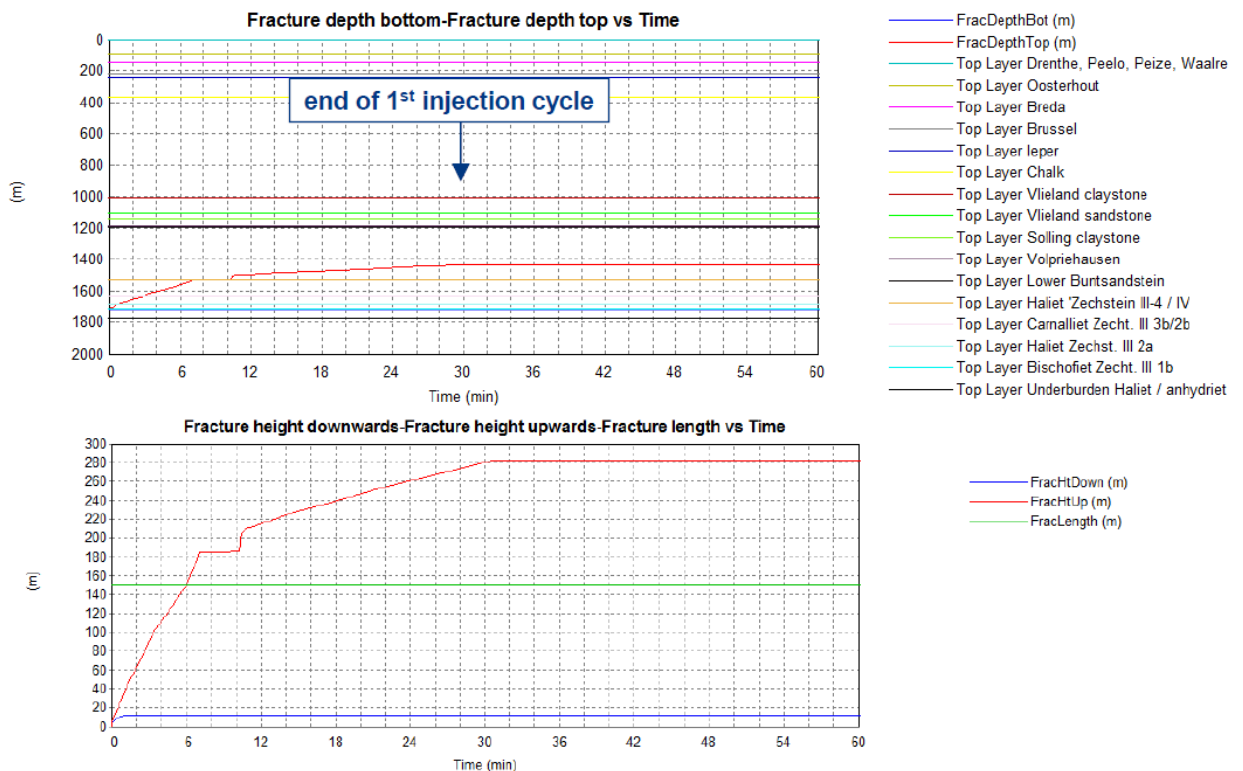


Fig. 39: Scheurgroei (in hoogte) voor VE5-6, waar de scheurpunt vermoedelijk beneden de Vlieland zanden blijft.

Beheersen van drukken in Nedmag cavernes tijdens de logings- en afbouwfase en een evaluatie van het cavernegedrag na cementeren van de bron (abandonneren)

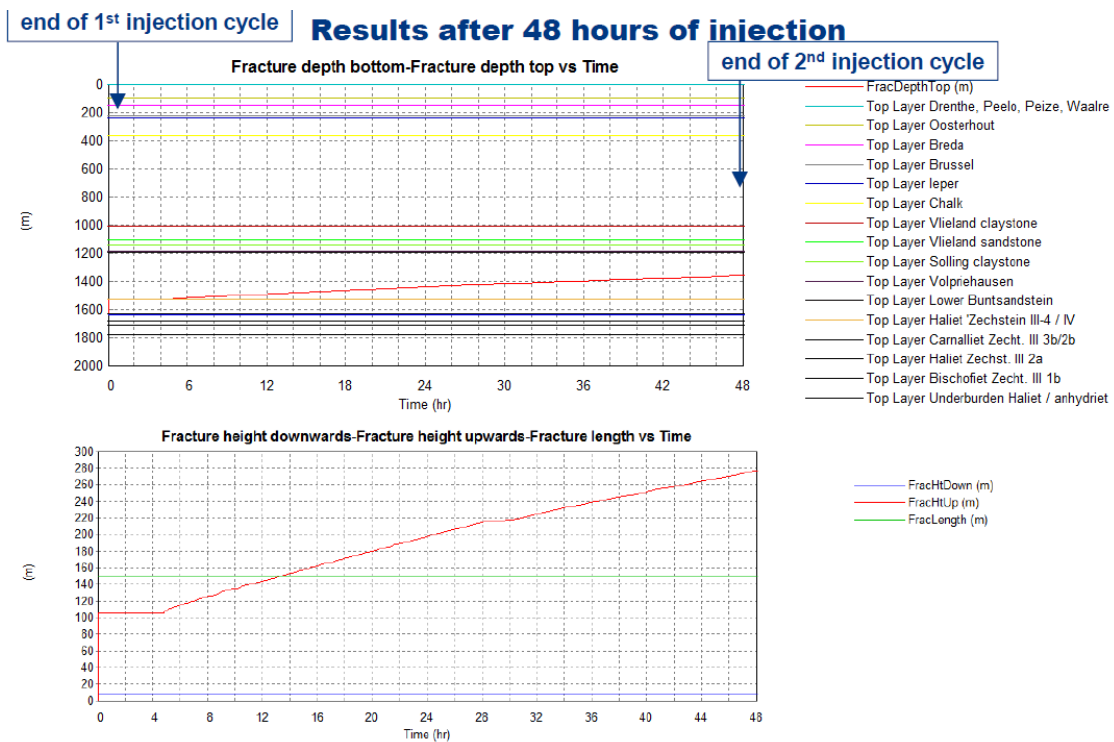


Fig. 40: Scheurgroei (in hoogte) voor VE2-3, waar de scheurpunt naar verwachting de Vlieland zanden niet bereikt.

6 Conclusies voor caveerne-integriteit door scheurvorming

De algemene lessen van deze studie zijn, dat spanningen rond zoutcavernes afnemen in de tijd, met name relevant voor cavernes met een grote diameter ten opzichte van de dikte van (steen-zout)buffer tussen de cavernes en de elastische gesteentes boven het zout. Zoutcavernes met een lage pekeldruk bouwen boogspanningen op rond de cavernes, die door zoutkruip langzaam worden overgedragen aan de elastische gesteentes. Dit proces is grotendeels onomkeerbaar, zodat de spanningen grotendeels niet terugkeren, als een hogere vloeistofdruk wordt aangehouden. Dit kan leiden tot een hogere pekeldruk in de caveerne dan de spanningen in het zout, en dit kan tot scheurvorming leiden, ook bij vloeistofdrukken die lager liggen dan drukken die vele jaren daarvoor wel gehouden konden worden. Dit mechanisme is de meest waarschijnlijke oorzaak van het lekkage-incident van 20 april 2018.

Numerieke simulaties zijn uitgevoerd, die inzicht geven in de spanningsontwikkeling rond het cavernecoluster en rond de losstaande en nog te ontwikkelen cavernes, waarbij het verleden is gekalibreerd met de bodemdalingssom (in tijd en vorm) en het ontstaan van de lekkage door overschrijding van de zoutspanning door de pekeldruk.

Door een strategie te hanteren van langzaam dalende pekeldrukken voor bestaande en nieuwe cavernes, kan een lekkage van pekeldruk door scheuren in het zout worden voorkomen, waarbij ook het ondergronds pekeldrukvolume wordt gereduceerd, zowel tijdens de fases van loging als in een afbouwfase (waarin het cluster zich nu bevindt).

De laatste fase van pekeldrukwinning zal (ook voor nieuwe cavernes) bestaan uit een periode van pekeldrukwinning bij lage drukken, zonder injectie van water, waarbij het pekeldrukvolume wordt gereduceerd tot een praktisch minimum, waarna de meeste overblijvende pekeldruk opgesloten zit in onoplosbaar materiaal, onopgelost zout en precipitaten (uitgekristalliseerde zouten, die onder in de caveerne zijn gevallen, maar wel porositeit hebben).

Op een gegeven moment (met een gesuggereerde 2 m³/h pekeldrukproductie bij de laagst mogelijke pekeldrukken) zullen de cavernes geabandonneerd moeten worden door de plaatsing van een cementplug in de (laatst overgebleven) winningsput, die toegang geeft tot de caveerne. De lage overgebleven toestroom van zouten (convergentie) zal dan toch de caveerne weer op druk brengen, waarna pekeldrukken op een gegeven moment de minimum zoutspanningen wederom zullen overschrijden. Het is ook mogelijk dat lekkage bij geringe drukopbouw zal plaatsvinden door micro-permeatie (via micro-scheurtjes op kristalniveau waarbij evenwicht tussen zoutkruip en lekkage bestaat), maar er wordt rekening gehouden met de mogelijkheid dat de lekkage pulsgewijs plaatsvindt, door de opening en sluiting van scheuren. In dit geval zullen grotere volumes pekeldruk in korte tijd naar de gesteentes boven het zout stromen, wat ook scheurvorming in deze gesteentes kan veroorzaken. Dit soort scheuren kan pekeldruk (met wellicht een aandeel diesel indien dit een weg vindt naar de scheur in het dak) naar ondiepere lagen stromen, waar de pekeldruk met hoge dichtheid bij normale stroming op grote diepte blijft.

Een studie door Panterra (v.d. Hoek, Nov 2018), toonde aan dat voor de huidige en toekomstige cavernes het onwaarschijnlijk is dat na abandonnering (en bij een zo klein als mogelijk gemaakt cavernecolustervolume) scheuren de Vlieland kleilagen (boven de Vlieland zandsteen) zullen passeren. Vervuiling van ondiepe zoetwaterlagen met magnesiumpekeldruk of diesel is daarmee erg onwaarschijnlijk. Dit ook in het licht dat zelfs bij de grote uitstroom van pekeldruk in april 2018 nadien geen sporen van magnesiumpekeldruk of diesel zijn aangetroffen in de diverse bemonsteringsputten en wateronttrekkingspunten in de omgeving.

Referenties

- Raith, A., Urai, J.L. (Dec 2016): *Squeeze mining-induced stress changes in the faulted overburden of the Veendam salt pillow.*
- Urai, J.L. (Nov 2018): *Nedmag Winningsplan 2018 Squeeze mining-induced stress changes in the faulted overburden of the Veendam Salt Pillow.*
- Urai, J.L. (1983): *Deformation of wet salt rock; thesis; university of Utrecht (Netherlands).*
- Urai, J.L. (1983): *Water assisted dynamic recrystallization and weakening in polycrystalline bischofite. Tectonophysics 96, 125–157.*
- Fokker, P.A. (1995): *The behaviour of salt and salt caverns. Dissertation, Delft University of Technology; Netherlands.*
- Hoek, P. v.d. (Oct 2018): *Analysis of VE/TR salt cavern cluster leakage incident of 20 April 2018. PanTerra Geoconsultants B.V.*
- Hoek, P. v.d. (Nov 2018): *Analysis of post abandonment leakage from caverns or cavern clusters PanTerra Geoconsultants B.V.*
- Fokker, P.A. (July 2018): *Evaluatie oorzaak pekellekkage in Nedmag pekcluster 20 april 2018 – update juli.*