

Vervormingen TR7 op overgang zoutdak en Bunter



Auteurs: 5.1.2.e
Review: 5.1.2.e

Version: Final

Date: 1 september 2021



Samenvatting

De 9 5/8" last cemented casing van put TR-7 vertoont doglegs (lokale verbuigingen) vermoedelijk door kleine lokale verschuivingen van aardlagen, die bij verdere vervorming denkbaar problemen geven met het plaatsen van een mechanische plug beneden deze verbuiging. Dit doordat de doorgang voor (lange of stijve) tools en mechanische pluggen beperkt wordt. De ernstigste dogleg bevindt zich rond de overgang van het zoutdak naar de Bunterformatie (een kleisteenformatie). Uit een vergelijking van nieuwe (juli 2020 en 2014) en oorspronkelijke (boring) inclinaties (1991 en 1982), leken TR7 en TR4 een behoorlijke verandering (afname) van inclinaties te geven. Geïntegreerd over de onderste 200 meter leverde dit een horizontale verplaatsing op van bijna 10 meter op de schoen onderin het zoutdak voor beide putten. Een van de mogelijke verklaringen was een verhoogde mobiliteit van het zout (veel lagere kruipweerstand dan verwacht voor haliet). Een tweede mogelijkheid was een slechte dieptebepaling (dieptecorrectie op basis van trekspanning in de wireline) van de log, bij de boring of bij de recente meting. Omdat er twee putten de afwijking vertoonde is besloten direct te onderzoeken of het zoutdak veel mobieler kon zijn dan aangenomen in eerdere studies, en dit de casings kan beschadigen.

Na deze studie zijn herhaalde wireline metingen gedaan op TR-7 en is gebleken dat de inclinatie (op een kort stuk rond de doglegs na) identiek was aan die van de boring. De eerdere interpretatie door service providers is vermoedelijk slordig geweest. Toch is het goed om deze studie gedocumenteerd te hebben, daar deze feitelijk ook uitsluit dat het zoutdak circa 10 meter horizontaal verplaatst is. Daarmee sluiten we ook uit dat de meest recente inclinatiemeting (interpretatie) fout was (of naar een gewenst resultaat toegerekend)

De productie- en injectieverbuigingen van TR7 zijn inmiddels verwijderd en Nedmag is voornemens deze put te zijner tijd te abandonneren, daar de put geen economische waarde meer heeft, zeer waarschijnlijk ook niet benodigd is om pekelf af te laten (om het ondergronds pekelfvolume van het cavernecoluster te verminderen) en een nieuwe productiestring denkbaar beschadigt door de dogleg (bij inbrengen of door verdere vervorming), dan wel komt vast te zitten bij verdere vervorming, waardoor deze in een later stadium niet meer goed te verwijderen is voor het zetten van abandonmentpluggen in de casing halverwege het zoutdak.

De dogleg van de casing rond de overgang van de Bunter naar het Zechstein (IV) dak is tot zover alleen in put TR-7 geconstateerd, maar kan ook in andere putten hebben plaatsgevonden. Dit kan echter (behalve in extreme gevallen) niet geconstateerd worden zonder de tubingen te verwijderen, wat alleen bij groot onderhoud of (pre)abandonment gebeurt. TR-4 vertoonde de verbuiging (dogleg) niet rond de tijd dat de inclinatieverandering plaatsvond of leek plaats te vinden (2014).

Dit rapport dient om beter te begrijpen waarom de dakvervormingen plaatsvinden, en uiteraard ook om een voorspelling te maken over de toekomst voor bestaande (niet geabandonneerde of gesuspendeerde) putten en te boren putten (naar nieuwe cavernes).

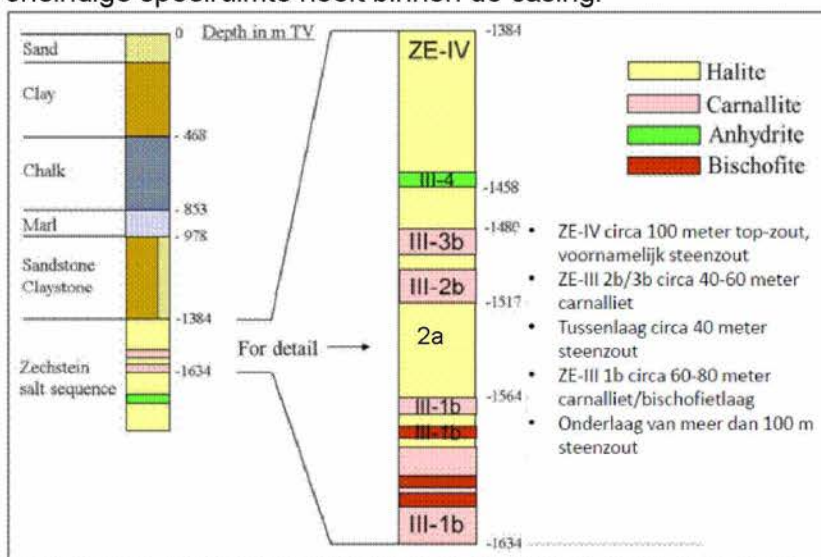
Inhoud

1	Inleiding.....	3
2	Afwijkingen in inclinatie in de tijd.....	5
3	Denkbare mobiliteit van het halietdak (ZE-IV).....	10
4	Doglegvervorming TR7 in de tijd.....	14
5	Conclusies.....	16

1 Inleiding

Na het verwijderen van door corrosie lekgeraakte tubingen in put TR-7 vertoonde een inspectie van de 9 5/8" casing verbuigingen (doglegs) in de casing ter hoogte van de bovenzijde van het zout en (kleinere) verbuigingen in de Bunter formatie. De verbuigingen maakten het onmogelijk om de put met de voorgenomen hercompletering met twee tubingen voor pekelpductie en gipsinjectie te completeren. Omdat er geen echte noodzaak was om de put van een nieuwe verbuiging te voorzien (de pekelp in de cavernes kan ook via andere putten worden afgelaten, daar TR-7 in een cluster van 9 putten zit: TR-1 t/m TR-8 en VE-4) en er een vrees bestond dat de verbuigingen door zoutkruip ernstiger zouden worden, was het plan de put te suspenderen met een mechanische plug. Na het zetten van zo'n plug kan de druk in TR-7 echter niet meer gemonitord worden. Te lang wachten met het zetten van zo'n plug kan echter een abandonment bemoeilijken omdat een plug niet meer door een ernstige dogleg past. Er bestaat ook nog een zeer geringe kans dat TR7 cavernes zich hydraulisch losmaakt van het cluster en dat de drukken oplopen tot boven de minimum spanningen in het zoutdak en een scheur kan ontstaan in het dak van de cavernes. Omdat TR7 zowel verbonden is met VE4 aan de westkant en met de andere cavernes aan de oostkant is deze kans klein. Wel kan de carnallietsectie (in de 2b/3b laag, zie Figuur 1) van TR-7 zijn verbinding verliezen met de bischofietsectie (1b). Indien de put nog open is, kan druk worden afgelaten indien noodzakelijk door productie via de casing. In overleg met SodM is besloten TR-7 verder te onderzoeken en te monitoren alvorens besluit te nemen over suspenderen met een plug.

Of (en hoe snel) de casingvervormingen erger worden in de tijd, en of deze ook bij andere putten kunnen plaatsvinden (of hebben plaatsgevonden) is een onderwerp van deze studie. Bij de meeste putten kan casingvervorming niet worden gemeten omdat er productie- en injectieverbuigingen in de put zitten, die niet eenvoudig kunnen worden getrokken en teruggeplaatst, doordat deze vaak door verbuiging of zoutomklemming vastzitten. Terugplaatsen vereist vaak een nieuwe boring door de halietlaag (2a) die de cavernedelen van de bischofietsectie (1b) en carnallietsectie (2b/3b) scheidt. Zie figuur 1 voor de laagopbouw en benamingen. Grote inclinatiewijzingen over langere stukken zoutdak kunnen ook via een tubing gemeten worden. En bij ernstige doglegs wordt ook vervorming van de tubing verwacht, die geen oneindige speelruimte heeft binnen de casing.

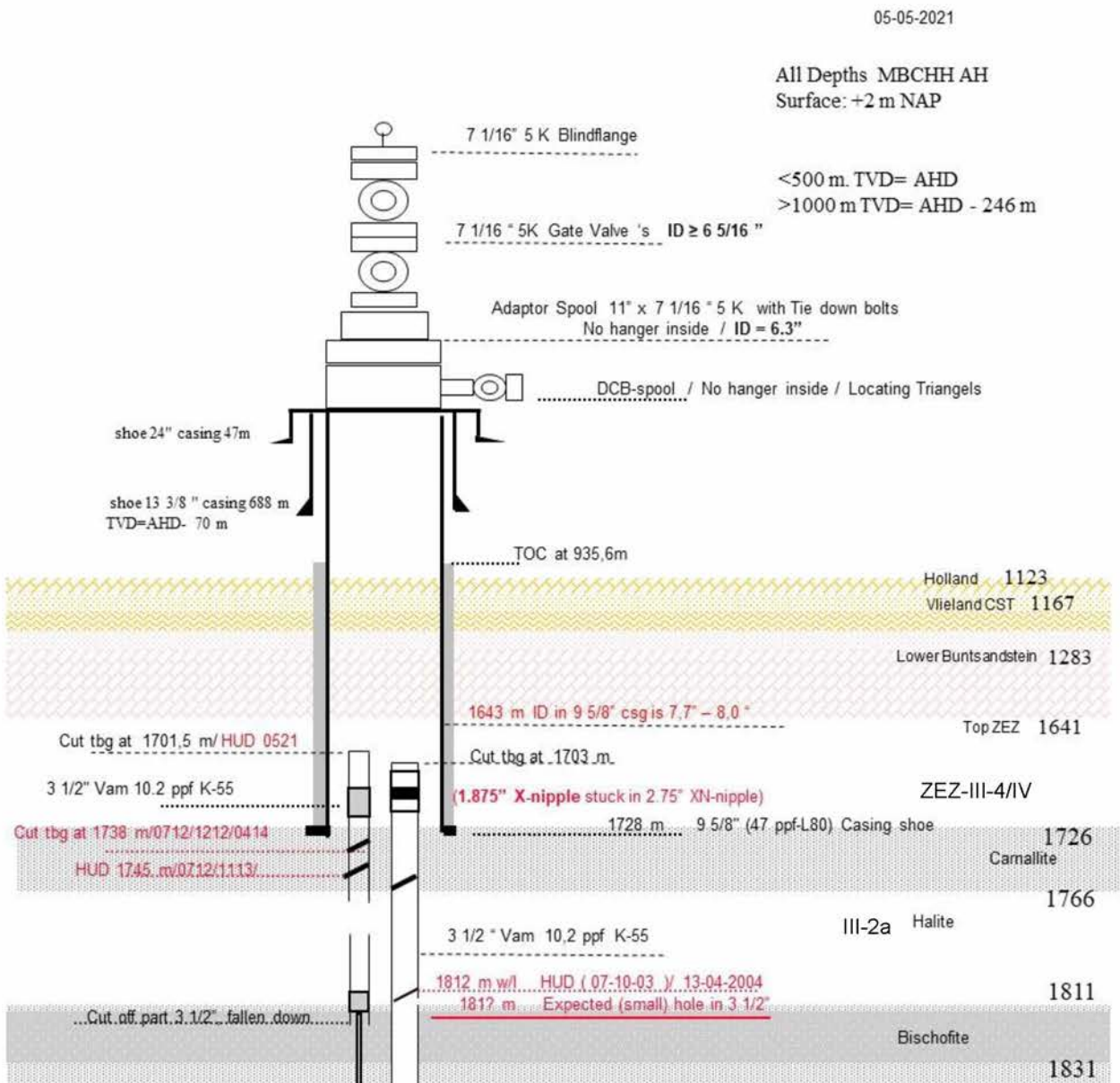


Figuur 1: Laagdiktes van de zouten en de ondiepere ondergrond. Per bron zijn er kleine verschillen in diktes en dieptes, onder andere door de vorm van het zoutkussen.

Grotere kruipvervormingen van het halietdak (ZE-IV), waarin de casingschoen normaal gesproken in geplaatst is, kunnen een knik dogleg verklaren tussen de halietlaag en de elastische Bunterlaag.

Vervorming door zoutkruip kan aangetoond worden door inclinaties te vergelijken tussen het jaar van boring (1982 voor TR-1 t/m 6; 1991 voor TR-7 en TR-8) en de meest recente of meest betrouwbare meting. Veel metingen zijn toevallig, "bijvangst" van een bedoelde meting, zoals een camerarun of caliperrun. Ze blijken vaak niet of slecht gekalibreerd op signaalwaarde (omrekening signaal in mV in hoekverdraaiing of nulpuntskalibratie) of op precieze diepte, bijvoorbeeld door de uitrekking van de kabel door wrijving niet goed te vertalen in werkelijke kabellengte. Ook een slecht centralisatie van de string kan een fout signaal geven. De meeste zoutkruip heeft plaatsgevonden na 1995 toen caveerneconvergentie deel werd van het winningsplan van Nedmag.

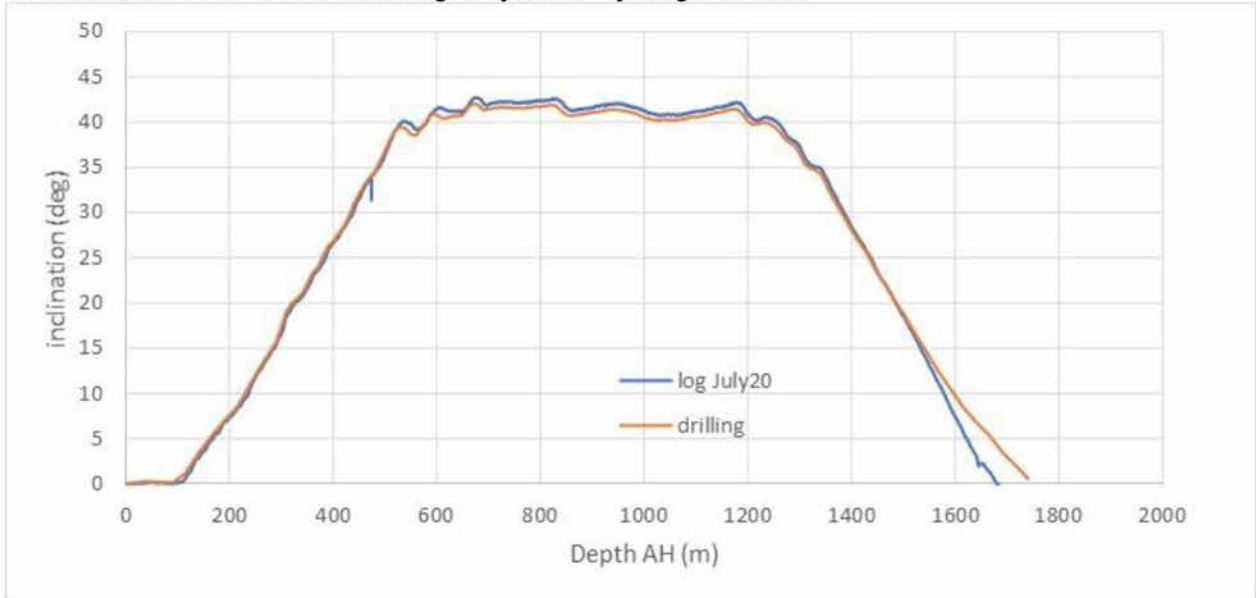
De huidige (2021) putsituatie is weergegeven in figuur 2.



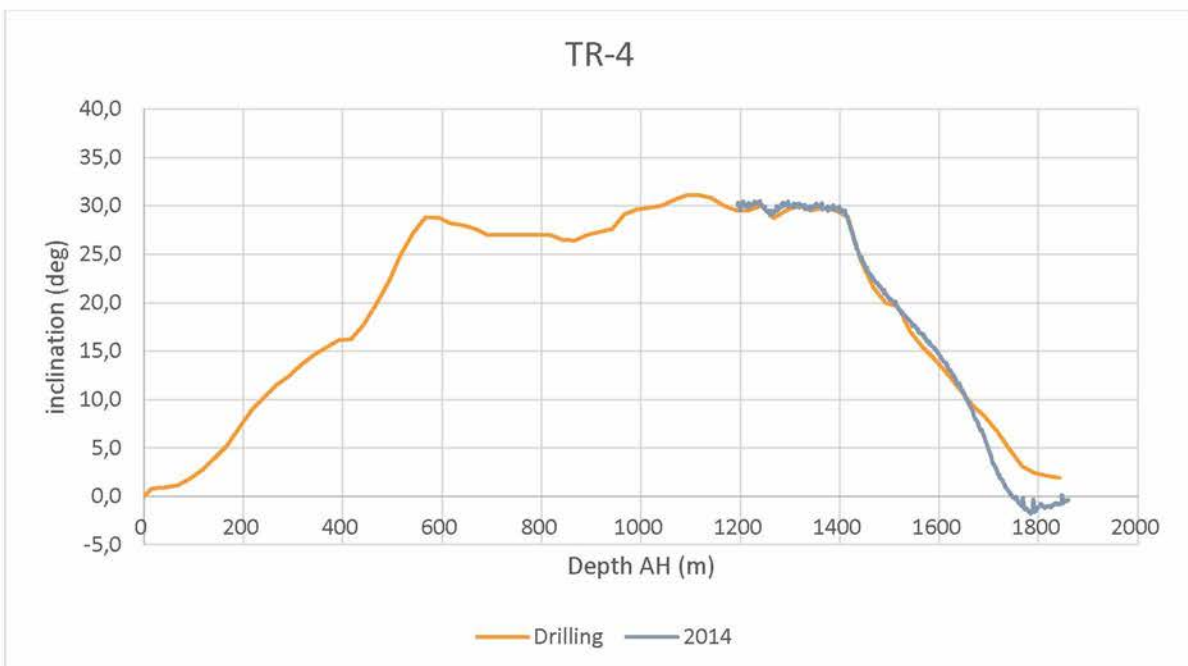
Figuur 2: Putschema TR-7 in 2021. De grootste dogleg zit op ongeveer 1641 m TVD

2 Afwijkingen in inclinatie in de tijd

Twee putten (TR-7 en TR-4) leken een duidelijke inclinatieverandering te hebben ondervonden in het onderste deel van de put, nadat recente logwaarden met de boor-log werden vergeleken. Figuren 3 en 4 geven een vergelijkbare afwijking van de inclinatie voor putten TR-7 en TR-4. Beide putten zijn gedeveerd geboord en hadden in het zoutdak oorspronkelijk nog een geringe inclinatie, die in de recente metingen lijken te zijn afgenomen.



Figuur 3: Inclinatieinterpretatie van TR-7 op juli 2020 en tijdens de boring in 1991.



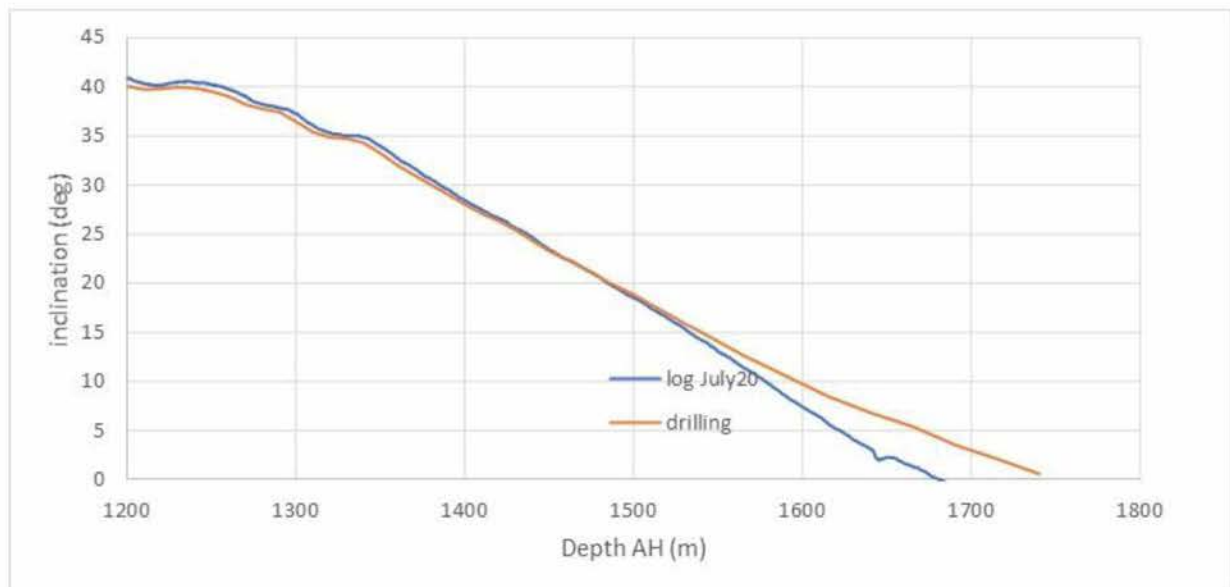
Figuur 4: Inclinatie-interpretatie van TR-4 in 2014 ten opzichte van de boring in 1982.

Een denkbare verklaring kon zijn dat het zoutdak (ZE-IV) veel mobieler is (minder kruipweerstand heeft) dan de halietlagen van ZE-III of zelfs ZE-II. Er zijn geen gegevens bekend van kruipproeven op het ZE-IV zout, doordat dit zout meestal niet gecored is. Men was niet geïnteresseerd in haliet (maar slechts in magnesiumzout) en tijdens het core-proces van

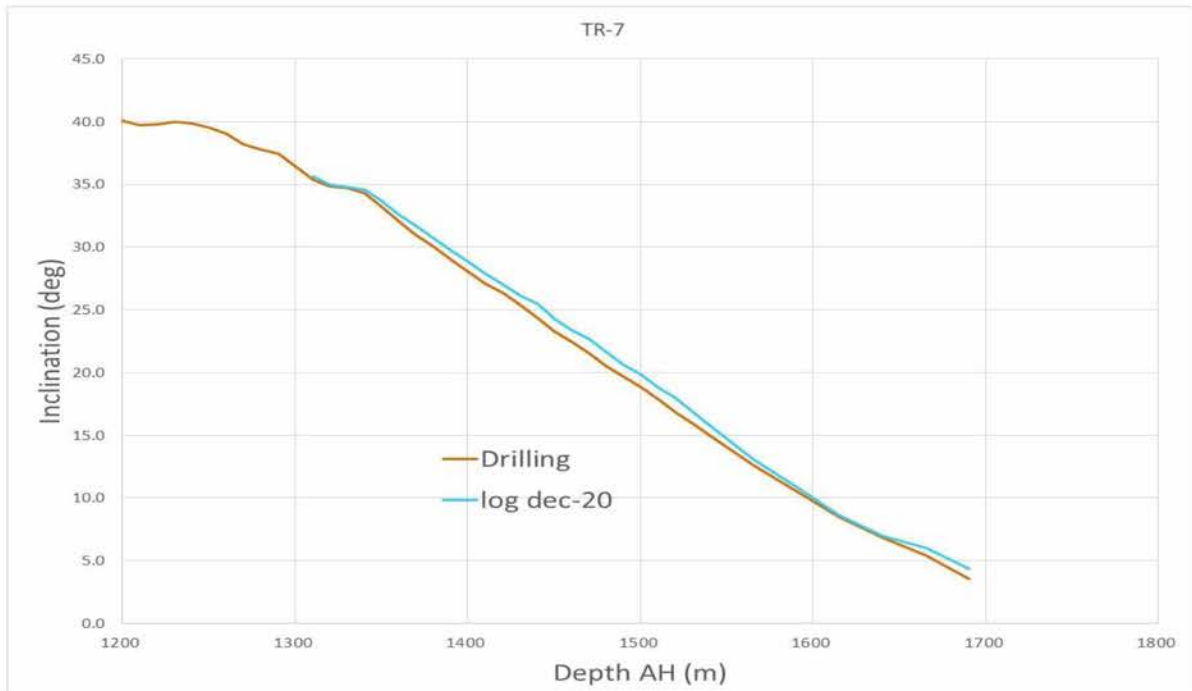
magnesiumzouten zat het zoutdak reeds achter de 10^{3/4}" of 9^{5/8}" casing. Er is wel haliet gecored van de ZE-III-2a tussenlaag en soms de ZE-III-4 halietlaag, net onder de casingschoen.

Omdat de zoutstroming grofweg plaatsvindt richting het hart van de cavernecluster, en de putten ook vandaar geboord zijn (WHC-2) zou de inclinatie minder moeten worden in de tijd. Dit gedrag lijken TR-4 (2014 meting) en TR-7 (juli 2020 meting) te vertonen. Omdat TR-4 op het diepste deel van het cluster ligt (en logging opwaarts gebeurt), zal de rand van de caverne (of het cluster) nooit ver weg van de TR-4 gelegen hebben, net als ook bij TR-8 overigens, die geen recente inclinatiemetingen heeft. Voor TR-7 is dat anders, want het loogfront is hier in opwaartse richting tot voorbij VE-4 gekomen, waardoor ook de zoutkruip richting het hart van het cluster niet altijd op dezelfde plek gelegen zal hebben. De vervorming van TR-4 zou dus erger moeten zijn dan van TR-7, maar er zijn geen recente data van TR-4. Dat TR-4 (uit 1982) ouder is dan TR-7 (1991), is nauwelijks van belang, daar 98% van de zoutkruip na het boren van TR-7 heeft plaatsgevonden (vanaf 1993 toen de squeeze-methode werd toegepast).

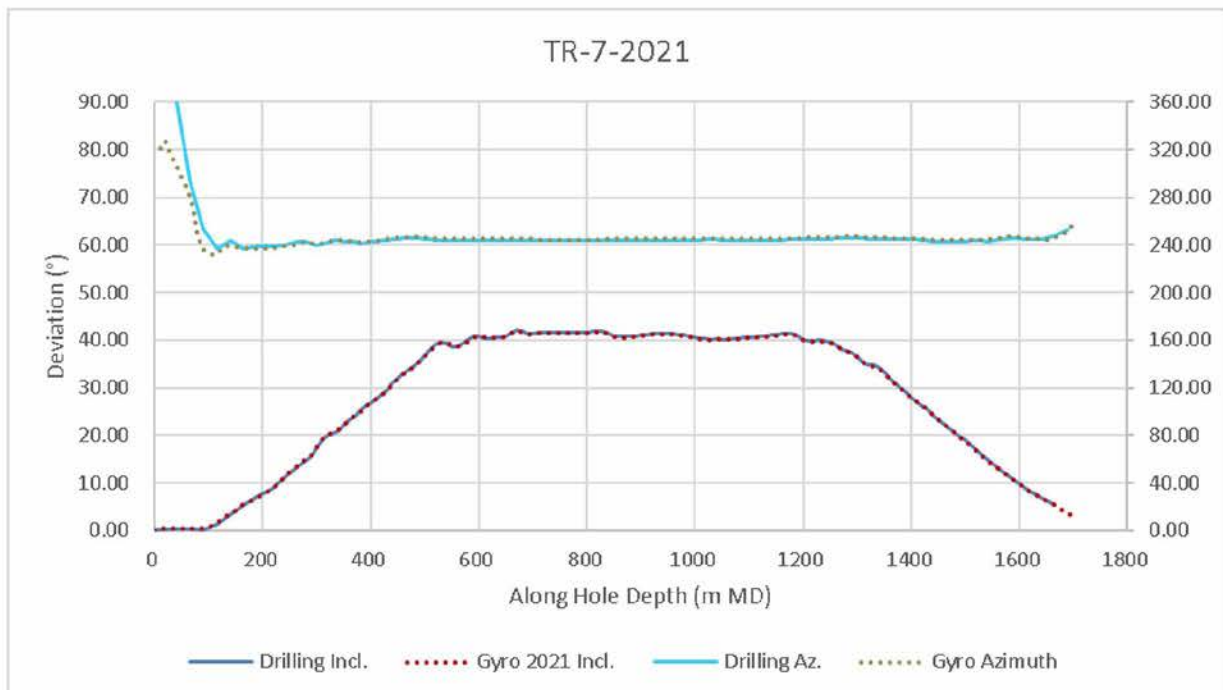
In november/december 2020 en in mei 2021 zijn er nieuwe inclinatiemetingen gedaan in TR-7, en deze geven nog nauwelijks inclinatieveranderingen in het zoutdak ten opzichte van de boring. De figuren 5 en 6 geven een iets verder ingezoomd beeld van de logresultaten van juli en december 2020 (geplot op een interval van 10 m). Figuur 7 geeft de mei 2021 meting. De kans dat de casing teruggebogen is naar zijn boor-inclinatie in die paar maanden is uit te sluiten, dus is de juli-2020-meting slecht gecalibreerd in diepte of signaal. Het is onwaarschijnlijk maar niet volledig uit te sluiten dat de meest recente meting minder representatief is dan de vorige. Wellicht moet in de toekomst (door Nedmag of de contractor) beter worden gekeken naar de kalibratie, ook die van de meetdiepte, op basis van bijvoorbeeld de casing-collar indicaties van een density log of de gamma-ray pieken die te matchen zijn met eerdere metingen. Metingen vanuit een tubing (ipv lege casing) zullen een matige gamma-ray weergave geven door de demping van staal en annulaire vloeistof.



Figuur 5: Inclinatie van TR-7 in juli 2020 ten opzichte van de boring in 1991.

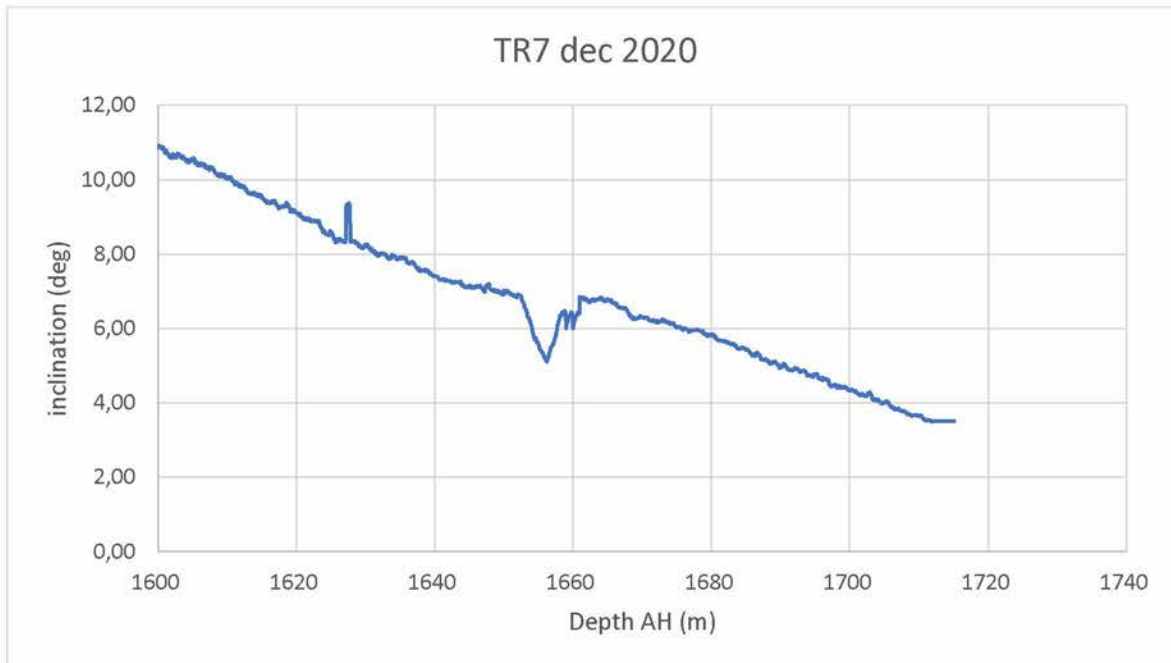


Figuur 6: Inclinatie van TR-7 in dec 2020 ten opzichte van de boring in 1991.



Figuur 7 Inclinatie (en azimuth) in TR-7 van mei 2021 vergeleken met boring (1991)

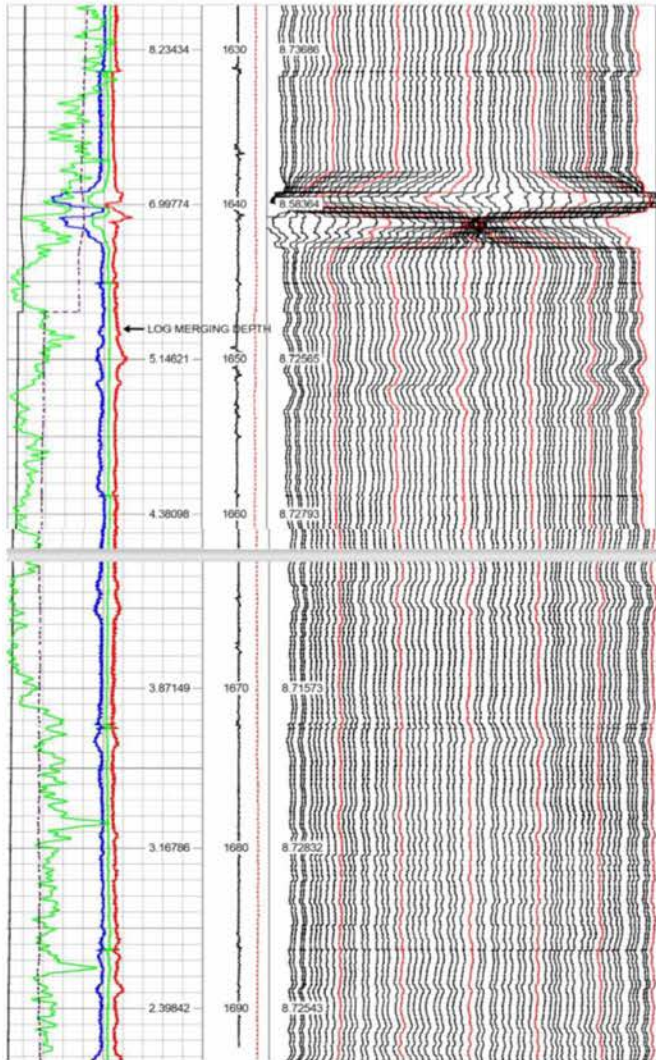
Figuur 8 toont de december 2020 meting met een interval van 7 cm (log-frequentie uit de LAS file). Hierop is een dip (vervorming) te zien op circa 1655 m AHD (CHH) met een lengte van circa 5 m. Deze inclinatie-log is echter met 15 m diepte verschoven om hem op de oorspronkelijke casing-inclinatie te passen (formeel allebei op CHH). Een eerdere caliperrun vertoont een verstoring in de casingdiameter op circa 1640 AHD, wat dus dezelfde diepte zal zijn, waar de oorspronkelijke boor-log een afwijking zal hebben vertoond of de correctie van drillfloor naar CHH niet goed gebeurd is.



Figuur 8: Inclinatie van TR-7 in dec 2020. De spike rond 1625 m lijkt een meetverstoring. Die rond 1650 lijkt een lokale dogleg van circa 5 meter lengte aan de bovenzijde van het ZE-IV. De inclinatie na deze afwijking lijkt systematisch een halve graad te hoog te liggen (maar wel in de geboorde inclinatieafbouw).

De plaatselijke inclinatie daling is op 1640 m (1655 m in Figuur 8) maximaal 2 graden over 5 meter en geeft een verschuiving (loodrecht op de casing) van 10-15 cm (over 5 meter), een vergelijkbare lengte als Figuur 9 aangeeft als gebied met verstoorde diameter (radius).

De inclinatie na de verstoring lijkt systematisch een halve graad te hoog te liggen (maar wel in de geboorde inclinatieafbouw). Dit kan een meetfout zijn (een dragforce van de dogleg zelf).



Figuur 9: Casing-deformatie (multifinger caliper) op de (geschatte) overgang van Bunter naar Zechstein salt op 1640 m, waarschijnlijk op dezelfde diepte van de inclination verstoring van Fig. 8

Op basis van Figuur 9, met vervorming en gamma-waardes (de linker licht groene lijn) lijkt de vervorming van TR-7 samen te vallen met de overgang van zout naar Bunter. Hogere gamma-waardes wijzen in de Bunter op een kleigehalte (kalium), maar kunnen in een zoutomgeving theoretisch ook kaliumzouten zijn. In zuiver haliet is de gammawaarde laag, maar het ZE-IV zout bevat relatief veel klei, zoals beneden 1670 m te zien is. De sectie 1650-1670 lijkt relatief zuiver zout. De gamma-ray beneden 1670 m en boven 1640 m is vergelijkbaar, waardoor het niet valt te zeggen of er een harde overgang is tussen de Bunter (zouthoudend kleisteen) en het haliet (kleihoudend zoutsteen).

De vervorming van TR-7 zou een beperkte reactivatie van een (kleine) fault kunnen zijn, die toevallig TR-7 bij de laagovergang kruist, maar ook een sliplaag (van 2-5 m dikte) die een bovengemiddeld aandeel carnalliet of klei bevat (met vloeistofoverdruk door insluiting door zoutlagen en dus een lage schuifweerstand). In zout ingesloten kleilagen kunnen mobiel zijn, indien de vloeistofdruk hoog is (en de effectieve spanning laag), doordat de vloeistof nooit heeft kunnen afstromen door insluiting van het zout. Ook denkbaar is het dat het lekincident tijdelijk de vloeistofdruk in de Bunter heeft verhoogd en daarbij kleine breuken heeft geactiveerd (met geen of zeer lage seismiciteit). Monitoring van de casing van TR-7 in de tijd kan uitsluitsel geven of de vervorming langzaam toeneemt in de tijd (indien het kruip is) of met stappen vervormt (en wellicht de komende jaren stabiel). Zie ook hoofdstuk 4.

3 Denkbare mobiliteit van het halietdak (ZE-IV)

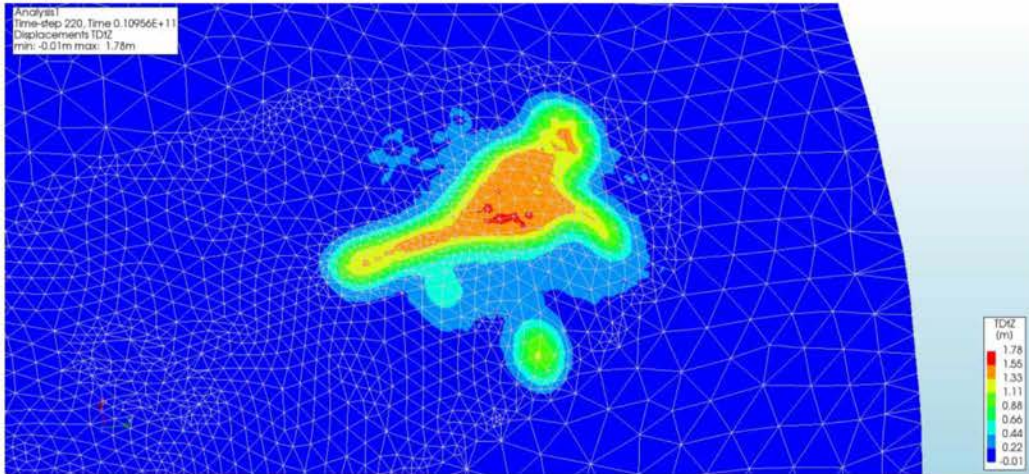
Er is getracht te berekenen wat de maximale verplaatsing van het zoutdak zou kunnen zijn, waarbij harde randvoorwaarden uit metingen blijven gelden. De bodemdaling (met een maximum van 50-60 cm medio 2020) is zo'n randvoorwaarde, net als de elastische stijfheid van gesteentes binnen een factor 3 (volgend uit correlaties met sonic velocities). De zoutkruip-eigenschappen zijn echter (zonder directe zoutkruipmetingen op core material) zeer variabel, zelfs voor haliet, binnen 3-4 ordes van grootte, afhankelijk van onzuiverheden, korrelgrootte, watergehalte, etc.

Een veel lagere (aangenomen) kruipweerstand van het ZE-IV-dak betekent dat er halietzout naar de holruimte in de ZE-III-2b/3b kan stromen. Deze extra zoutkruip moet in modellering gecompenseerd worden door een lagere kruipsnelheid van de ZE-II, ZE-III halietlagen en de carnalliet en bischofietlagen. Met name de ZE-III lagen (alle zouten) kunnen niet oneindig stijf en kruipresistent gemodelleerd worden, omdat ze dan het zoutdak gaan ondersteunen. Ze moeten dus op zijn minst licht door kruip meegeven.

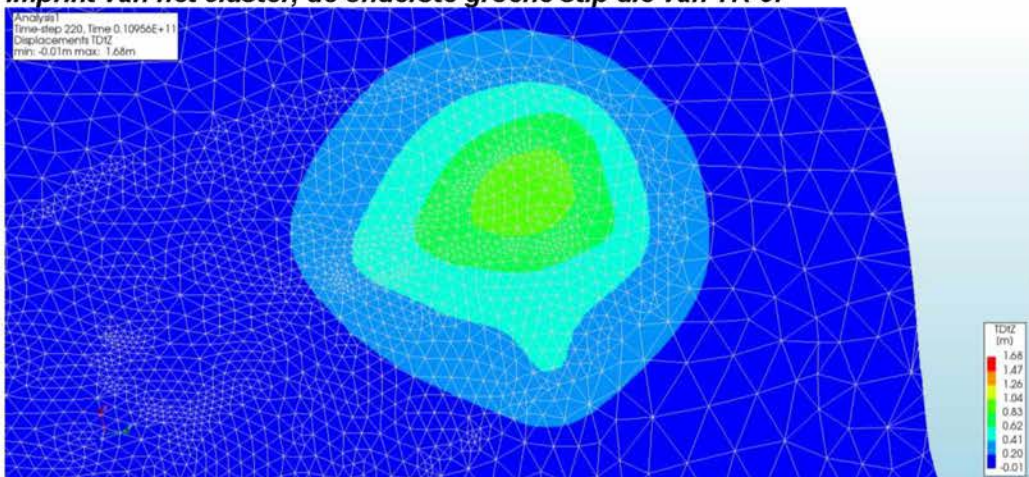
Er is gerekend met het eindige-elementen-model dat ook gebruikt is voor de bestudering van het lekkage-incident van 2018 (ref 1). Er is geen variatie gepleegd op de cavernevorm, omdat dat erg tijdrovend is en vermoedelijk niet veel bijdraagt in de onzekerheid. Er is met name gevarieerd in de materiaalparameters. Het drukregime is grofweg hetzelfde als in de studie uit 2018, met een kleine correctie voor de minder snel afnemende clusterdruk (door afgenomen pekelbehoefte in 2020) en de uitstel van de boringen van VE-5 en hoger. Put TR-9 is iets te groot gemodelleerd, omdat deze de verwachte situatie van 2025-2030 representeert en niet die van 2020.

Er zijn ongeveer 40 variaties gerund, waarbij de meeste uitkomsten een te lage of te hoge bodemdaling geven medio 2020 en buiten beschouwing gelaten zijn. Degene met de juiste bodemdaling en de ernstigste vervorming van het zoutdak is hieronder gepresenteerd, waarbij circa 50-60% van de caverneconvergentie is veroorzaakt door mobiliteit van het ZE-IV zoutdak (en de rest door met name bischofiet-toestroming en elastische response op de drukdaling). Het is een erg onwaarschijnlijk scenario, maar legt de horizontale zoutdakvervorming op circa 1 meter, en dan ook nog eens bij de rand van het breedste deel van het cluster en dus niet ter hoogte van TR-7 (maar denkbaar wel TR-4). Een verplaatsing van 7-9 meter, zoals berekend uit de inclinatieveranderingen, zoals oorspronkelijk "gemeten", lijkt dus volkomen onmogelijk, uitgaande dat het ZE-IV zoutdak (iig ter hoogte van TR-7 en TR-4) grotendeels intact is (en de put zich niet in de wand van een onbedoelde caverne in het halietzoutdak bevindt).

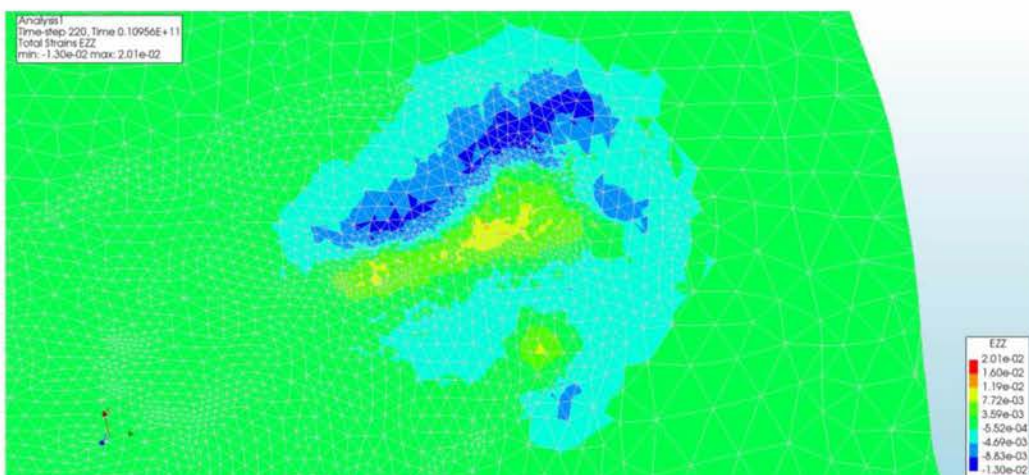
Figuur 10 toont de neerwaartse beweging van de onderkant van het halietdak (de bovenzijde van de carnallietlaag) met een verplaatsing van tot 1.7 meter. De onderzijde Bunter zakt nog circa 1 meter (Figuur 11), waarbij het zout boven het cluster (met de meeste casings) tot circa 1% extensie vertoont, zie Figuur 12.



Figuur 10: Neerwaartse beweging base ZE-IV (top ZE-III-2b/3b) (tot 1.7 m). Het oranje deel is een imprint van het cluster, de onderste groene stip die van TR-9.



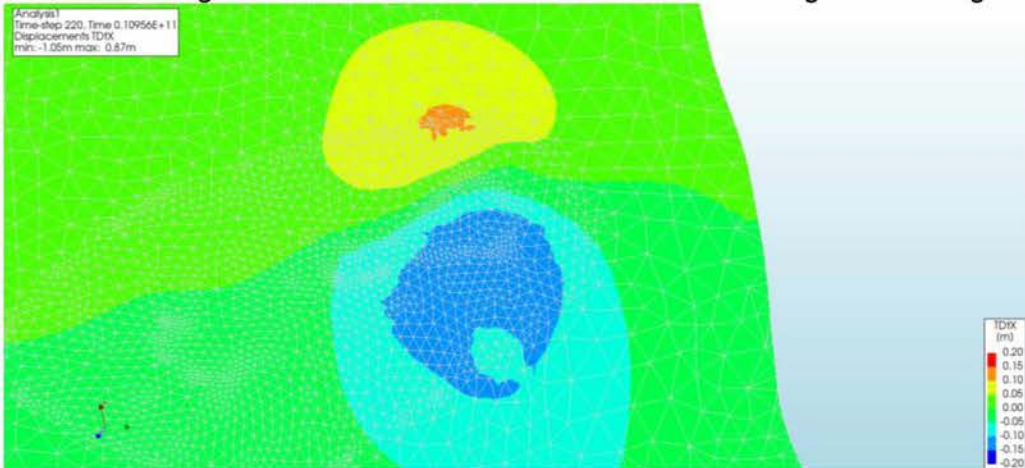
Figuur 11: Neerwaartse beweging base Bunter (top ZE-IV) (tot 0.9 m)



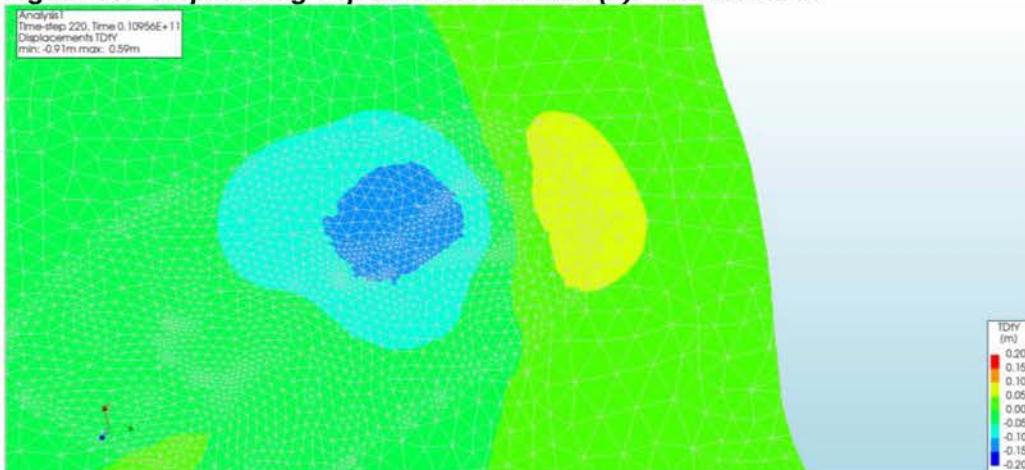
Figuur 12: Verticale rek ZE-IV: 1% extensie (geel) boven cluster tot 1% contractie (blauw)

De horizontale verplaatsingen van de Top-ZE-IV (top halietdak) is circa 20 cm (Figuur 13 en 14), waar de Base-ZE-IV (top ZE-III-3b) circa 1 meter verplaatst als maximum, zie figuur 15 en 16. De verplaatsingen zijn opgesplitst in West-Oost (Y) en Noord-zuid (X), waardoor de resultante maximale horizontale verplaatsing iets (20-40%) groter kan zijn.

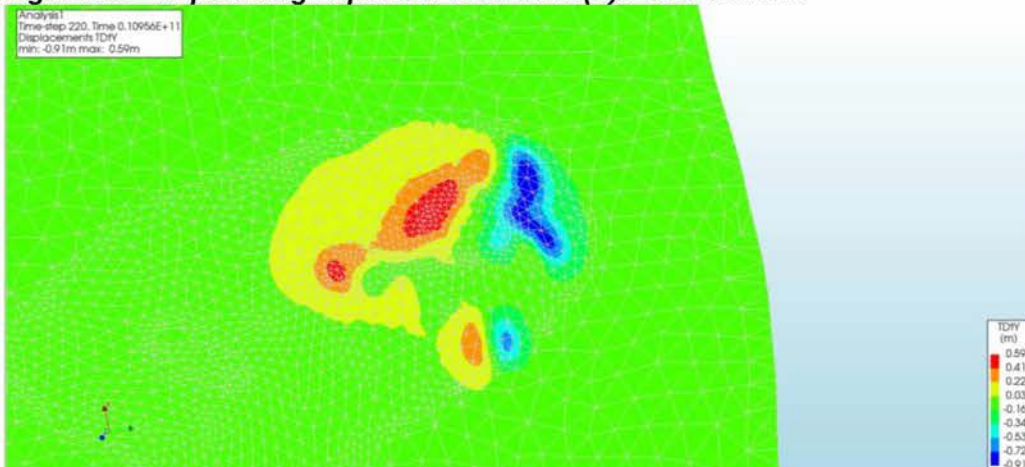
De maximale horizontale verplaatsing van de ZE-III-1b is ook circa 1 m in deze berekening (figuur 17), waardoor de 1b (bischofiet) maar voor een beperkte fractie bijdraagt in de caverneconvergentie in deze simulaties. Dat is niet de ervaring die Nedmag heeft.



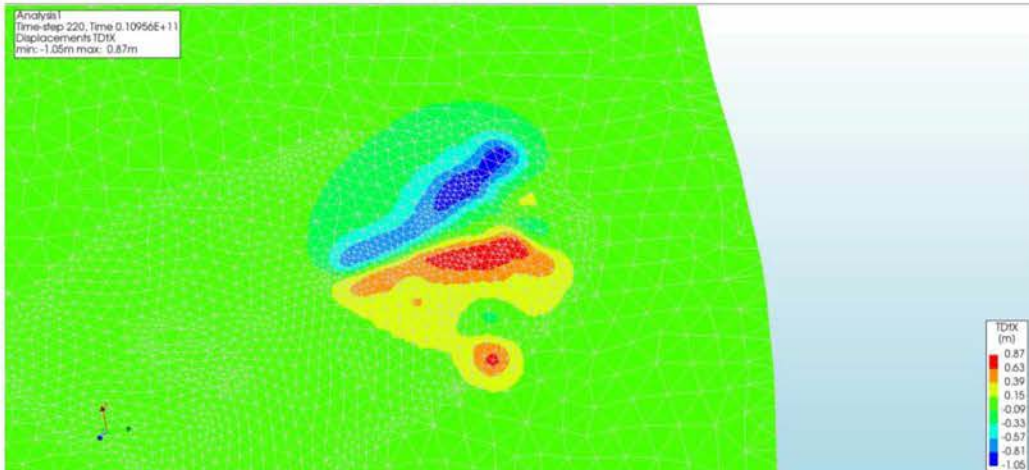
Figuur 13: Verplaatsing Top ZE-IV Noord-Zuid (X): -0.2 tot 0.2 m



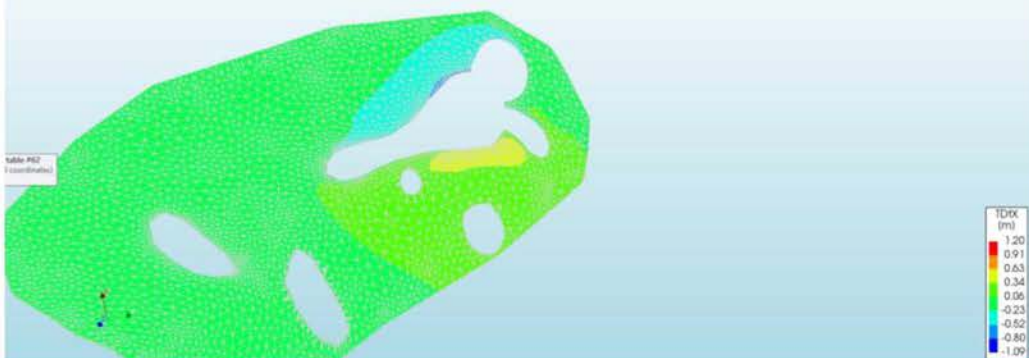
Figuur 14: Verplaatsing Top ZE-IV Oost-west (Y): -0.2 tot 0.2 m



Figuur 15: Verplaatsing Base ZE-IV Oost-west (Y): -0.9 m (blauw) tot 0.6 m (rood)

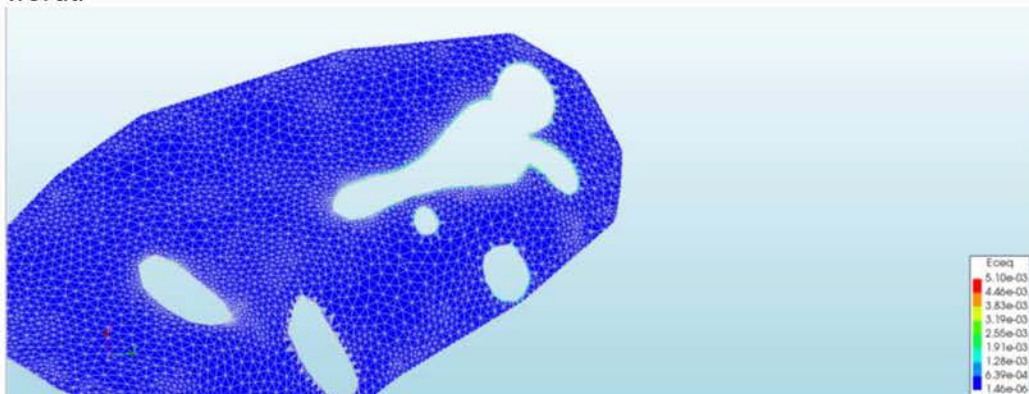


Figuur 16: Verplaatsing Base ZE-IV Noord-Zuid (X): -1.0 m (blauw) tot 0.9 m (rood)

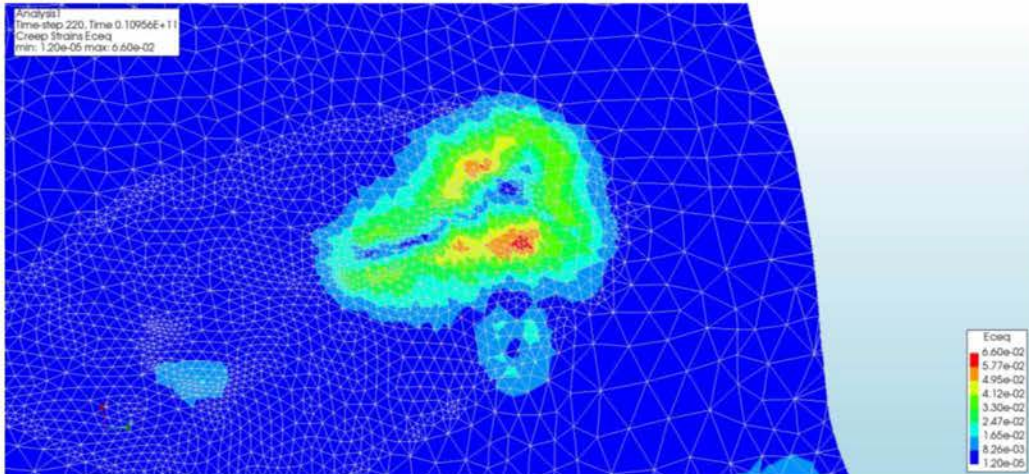


**Figuur 17: Verplaatsing mid ZE-III-1b Noord-Zuid (X): -1.0 m (blauw) tot 0.6 m (geel)
Het deel ZE-III-1b met grovere elementen is niet getoond. Openingen zijn cavernecoluster (boven) en
geprojecteerde cavernes (VE-5/6 en VE-7/8) links onderaan**

De kruiprek in de bischofietlaag is laag (circa 0.1%) (Figuur 18) en veel hoger in het zoutdak (tot 6%, Figuur 19) uiteraard ingegeven door de (extreme) keuze van parameters, die het haliet zoutdak vloeibaarder maken dan de ZE-III-1b laag (een mengeling van hoofdzakelijk bischofiet en carnalliet). Een dergelijk gedrag zou vermoedelijk de cavernconvergentie van de cavernes met een hoofdzakelijk 2b/3b sectie (VE-1 en VE-2) veel sneller maken dan in werkelijkheid gezien wordt.

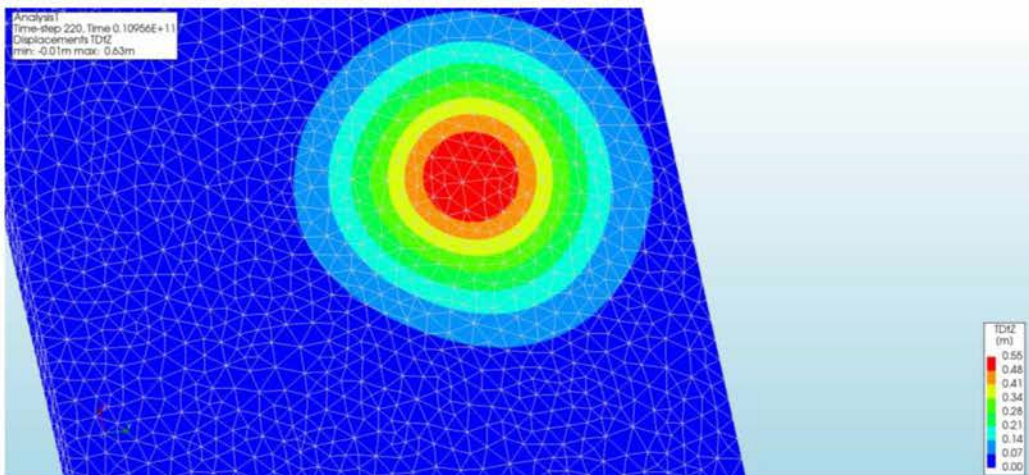


Figuur 18: kruiprek in (middelste) 1b (bischofiet)laag: tot 0.2%



Figuur 19: kruiprek (von Mises) in top ZE-IV: tot 6%

De bodemdaling medio 2020 is weergegeven in Figuur 20. De kom is iets scherper en iets dieper dan de gemeten kom, wat in theorie ongedaan gemaakt kan worden door de overburdenlagen iets stijver te maken (en zoutlagen iets vloeibaarder), maar dit verschil wordt te klein geacht om via iteratie te perfectioneren, daar het doel was de maximaal mogelijke zoutdakverplaatsingen te berekenen.



Figuur 20: bodemdaling (tot circa 60 cm) medio 2020, overeenkomend met de verwachte totale daling medio 2022.

De oorspronkelijke berekeningen uit 2018 (ref 1), met parameters die veel meer in de lijn der verwachtingen liggen dan deze studie, kunnen als referentie worden gebruikt, voor de base-case, die niet herhaald wordt in deze studie. Alleen de verschillen in gebruikte parameters zijn opgenomen in de appendix.

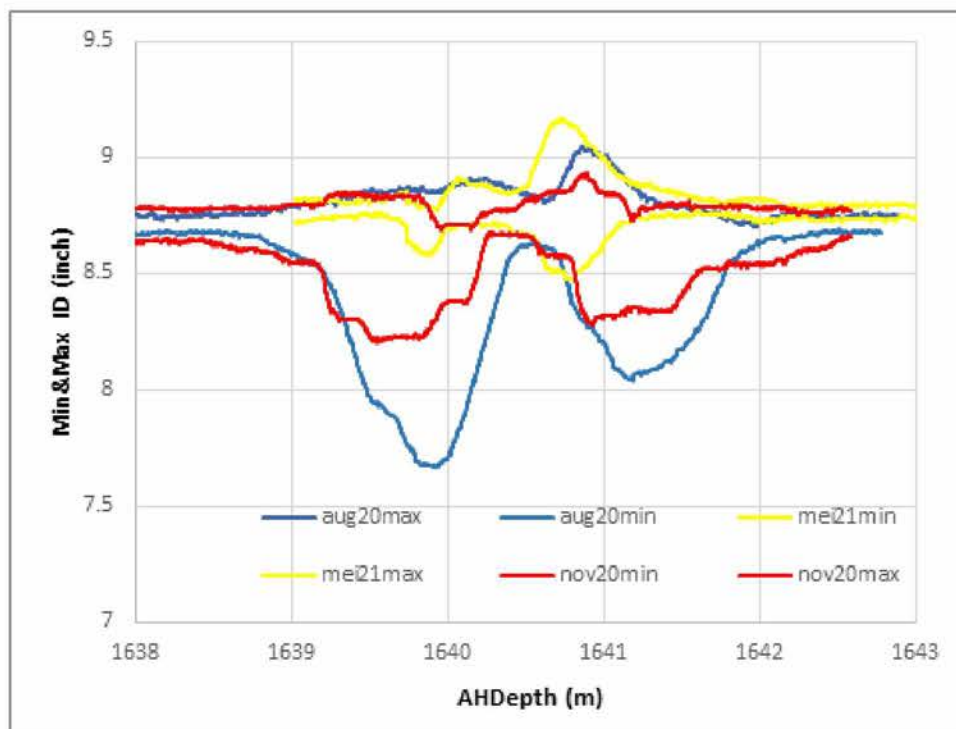
4 Doglegvervorming TR7 in de tijd

De grootste vervorming (dogleg) in TR7, die rond de overgang van zoutdak (ZE-IV) naar de Bunter zit, op circa 1640 m AHD, is opgenomen door multifinger calipers in augustus 2020, november 2020 en mei 2021. Nadere details over de metingen en andere dieptes zijn te vinden in Ref [2]. De hoop was dat de metingen (in relatief korte tijd) iets zouden laten zien van de (in)stabiliteit van de vervorming. Omdat de caliper tool niet altijd juist gecentraliseerd is, zeker in een bochtig stuk, kan de diameterreductie het best worden weergegeven door kleinste gemeten diameter, oftewel de laagste opgetelde vingerlengtes van twee tegenover elkaar gelegen vingers

(calipers). Een probleem hierbij is dat een vinger een maximale lengte heeft, waardoor de tool een geringere diameter kan aangeven, dan daadwerkelijk, als de tool tegen één kant van de casing aanligt. Deze maximale lengte is ook weer afhankelijk van de daadwerkelijk gebruikte tool, die per meting kan verschillen.

Figuur 21 laat zien dat de minimum diameter rond de dogleg van rond de 1640 m AHD toeneemt in tijd. Dat dit in werkelijkheid gebeurt (bijvoorbeeld door terugbuigen) is erg onwaarschijnlijk. De minimum diameter lijkt ook niet zwaar verminderd in de mei 2021 run (t.o.v. van nominaal), waardoor de diameter zelf niet zozeer een probleem vormt voor het passeren van tools, maar abrupte dubbele hoekverdraaiing (dogleg) die het passeren van stijve tools en pijpen moeilijk maakt op dit moment. Een snelle collapse door ovalisatie ligt ook niet voor de hand.

De meting zal medio 2022 nogmaals herhaald worden om te zien of de situatie verergert, maar de afgelopen metingen tonen dat het lastig zal worden om kleine veranderingen (of een trend) waar te nemen buiten de onzekerheidsmarge van de tools. Afhankelijk van de metingen en afhankelijk van het verbonden blijven van TR7 met de rest van het cluster (en de overgebleven volumes vrije pekkel) zal jaarlijks de plaatsing van een plug (en abandonment daarna) overwogen worden.



Figuur 21: minimum en maximum diameter (vingerlengte gesommeerd van twee vingers die exact tegenoverliggend zijn) zoals gemeten rond 1640 mAHD (top zoutdak) in aug20, nov20 en mei21.

De dogleg zelf (Figuur 8) geeft (bij integreren over inclinatieverandering over circa 5 m) een zijwaartse verplaatsing (offset) van 10-15 cm. Dit kan een sliplaag of een fault-activatie geweest zijn of een dunne carnallietlaag, die kruipt. Er zijn geen cores van dit gebied en een gamma-ray (of density) geeft geen uitsluitsel over het bestaan of ontbreken van dunne carnallietlagen binnen klei (kalium) houdende lagen. Zekerheid over wanneer de verplaatsing heeft plaatsgevonden en of dat geleidelijk over vele jaren of in korte tijd (secondes) is gebeurd, valt op dit moment niet te geven.

5 Conclusies

De vervorming van de casing van TR-7 is niet te wijten aan een hoge mobiliteit van het (gehele) ZE-IV zoutdak, zoals gesuggereerd door een inclinatiewijziging uit een meting (interpretatie) van juli 2020. Nieuwe metingen uit december 2020 en mei 2021 geven een vrijwel ongewijzigd beeld ten opzichte van de boring, met uitzondering van een verstoring rond de overgang van ZE-IV haliet naar Bunter Claystone. De inclinatiewijziging van TR-7 leek ondersteund door een inclinatiewijziging in TR-4, maar ook deze meting (interpretatie) moet in twijfel getrokken worden, met een geschatte horizontale verplaatsing van circa 8 meter ter hoogte van de casingschoen. Een verplaatsing tot 1 meter is technisch mogelijk door een onwaarschijnlijk hoge mobiliteit toe te kennen aan het zoutdak, binnen de randvoorwaarde van 50-60 cm bodemdaling (medio 2020). In dit geval treedt minstens 50% van de caveerneconvergentie op door mobiliteit van het zoutdak. Een verplaatsing van een orde van grootte hoger blijkt numeriek onmogelijk te bereiken.

De (grootste) vervorming van de TR-7 casing, vermoedelijk een afschuiving van 10-15 cm over een paar meter "dikte", moet dus aan een sliplaag (slappe kleilaag met vloeistofoverdruk of zeer dunne carnallietlaag) worden toegewezen, of een fault, die zich toevallig rond de overgang van de Bunter naar het zout bevindt.

Het is op dit moment niet aan te geven of de vervorming eenmalig was (bijvoorbeeld als gevolg van tijdelijke hogere drukken na het lekincident door fault of sliplaag activatie), of langzaam in de tijd, door kruip van een dunne carnallietlaag, die te dun of te onzuiver is om zich duidelijk in de gamma-log te onderscheiden van een kleihoudend haliet.

Monitoring van de vervorming lijkt een logische stap. De monitoring is dan met name relevant om het mechanisme van vervorming te begrijpen tijdens het verder aflaten van druk en volume in het cluster en hier mogelijk conclusies uit te trekken voor (risico's voor) andere putten, van welk de casing (door aanwezigheid tubingen) niet op (kleine) vervormingen kan worden gemonitord.

Referenties

[1] Fokker, P.A., Evaluatie oorzaak pekellekkage in Nedmag pekelcluster 20 april 2018 . WEP Juli 2018.

[2] Van de Stadt, M. TR-7 Wireline operation, Inclination and LCC Integrity Juli 2021

Appendix I Materiaal Parameters in deze studie en 2018 studie

De materiaal parameters die zijn gebruikt in de Finite Element berekening, die de hoogste vervorming gas van de Zechstein-IV, met een realistische bodemdalingskom zijn weergegeven in de onderstaande tabellen, deel van het input deck voor het Finite Element pakket Diana. De gebruikte eenheden zijn m, s, Pa, kg/m³.

De kruipformule (zonder temperatuursfunctie) luidt:

$$\dot{\epsilon}_{VM} = A \left(\frac{\sigma_{VM}}{\sigma_{ref}} \right)^n + B \left(\frac{\sigma_{VM}}{\sigma_{ref}} \right)^m$$

De tweede tak (meestal voor lineaire kruip, pressure dissolution creep) is in de relevante berekening niet gebruikt. De input moet als volgt gelezen worden, al onder:

	A	n	B	m	σ_{ref}
SECCRP	1.00000E-10	2.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00000E+06

De formule zegt in de praktijk, met de parameters boven, dat bij een differentiale (Von Mises) spanning van 3 MPa (3E6 Pa), de kruipsnelheid oploopt tot $1E-10 (3)^2 = 9E-10 \text{ s}^{-1} = 0.028 (2.8\%)$ per jaar.

De kruipsnelheid van bischofiet en carnalliet onder de dezelfde spanning is (ten opzichte van de 2018 studie in de rechterkolom) verlaagd met twee ordes van grootte (99% reductie), alsmede die van het halietformaties in de ZE-II en ZE-III (exclusief het kleine deel ZE-III4 dat in de studie deel uitmaakt van de ZE-IV formatie). De kruipsnelheid van het zoutdak (ZE-IV) zijn verhonderdvoudigd. De stijfheden van de overburdenlagen zijn ook licht aangepast om een betere match met de gemeten bodemdalingskom te krijgen.

De KT0 waarde is de geschatte initiële ratio van (totale) horizontale over verticale spanning in de steenlagen, waarbij de waarde "1" isotrope spanningen inhouden, zoals verwacht in zout (voorafgaand aan mijnbouw).

```

1 NAME "underburden"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
POISON 3.00000E-01
YOUNG 3.00000E+10
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.30000E+03
2 NAME "bischofite"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 5.00000E+08
POISON 3.00000E-01
DENSIT 1.70000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 5.00000E-15 1.60000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
3 NAME "HaliteZEIII"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 0.50000E+10
POISON 4.00000E-01
DENSIT 2.20000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 2.00000E-16 3.50000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
4 NAME "HaliteZEII"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 1.00000E+10
POISON 4.00000E-01
DENSIT 2.20000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 1.00000E-16 3.50000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
5 NAME "Bunter"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.50000E-01
POISON 3.00000E-01
YOUNG 2.00000E+10
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.30000E+03
6 NAME "Rot"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.00000E-01
POISON 3.00000E-01
YOUNG 20.00000E+09
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.25000E+03
7 NAME "ShallowOB"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.00000E-01
POISON 4.00000E-01
YOUNG 29.00000E+08
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.10000E+03
8 NAME "Cretaceous"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.00000E-01
POISON 3.00000E-01
YOUNG 17.00000E+09
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.10000E+03
9 NAME "carnallite2b3b"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 3.00000E+09
POISON 3.00000E-01
DENSIT 1.70000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 0.50000E-14 2.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
10 NAME "cavernbrine"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
POISON 4.50000E-01
YOUNG 3.00000E+04
DENSPC SATDEN
DENSIT 1.70000E+03
11 NAME "HaliteZEIV"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 0.30000E+10
POISON 4.50000E-01
DENSIT 2.20000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 5.00000E-10 3.50000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06

```

```

1 NAME "underburden"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
POISON 3.00000E-01
YOUNG 2.00000E+10
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.30000E+03
2 NAME "bischofite"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 5.00000E+08
POISON 3.00000E-01
DENSIT 1.70000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 5.00000E-13 1.60000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
3 NAME "HaliteZEIII"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 2.00000E+10
POISON 3.00000E-01
DENSIT 2.20000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 1.00000E-13 4.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
4 NAME "HaliteZEII"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 2.00000E+10
POISON 3.00000E-01
DENSIT 2.20000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 2.00000E-13 4.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
5 NAME "Bunter"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.50000E-01
POISON 3.00000E-01
YOUNG 1.20000E+10
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.30000E+03
6 NAME "Rot"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.00000E-01
POISON 3.00000E-01
YOUNG 9.00000E+09
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.25000E+03
7 NAME "ShallowOB"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.00000E-01
POISON 4.00000E-01
YOUNG 5.00000E+08
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.10000E+03
8 NAME "Cretaceous"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 7.00000E-01
POISON 3.00000E-01
YOUNG 5.00000E+09
DENSPC SATDEN
DENSIT 2.10000E+03
9 NAME "carnallite2b3b"
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 3.00000E+09
POISON 3.00000E-01
DENSIT 1.70000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 5.00000E-13 2.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06
10 NAME "cavernbrine"
MCNAME SOLROC
MATMDL ELASTI
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
POISON 4.50000E-01
YOUNG 5.00000E+04
DENSPC SATDEN
DENSIT 1.70000E+03
# HaliteZE-IV identical to ZE-III in 2018 calculations
MCNAME SOLROC
MATMDL SALTCT
ASPECT INISTR
KTO 1.00000E+00
YOUNG 2.00000E+10
POISON 3.00000E-01
DENSIT 2.20000E+03
CREEP COMPLI
SECCRP 1.00000E-13 4.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+06

```