



Structural
Geology -
Tectonics -
Geomechanics

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Nedmag Winningsplan 2018

Spanningsveranderingen,
veroorzaakt door *squeeze mining*,
in de aardlagen en breukzones boven het zout
van het Veendammer zoutkussen

Janos L. Urai

Structurele Geologie, Tektoniek en Geomechanica

RWTH Aachen Universiteit, Lochnerstrasse 4-20

D-52056 Aken, Duitsland

e-mail: j.urai@ged.rwth-aachen.de

www.ged.rwth-aachen.de

Alexander F. Raith

DEEP.KBB GmbH

<https://deep-kbb.de>

Eyhauser Allee 2a, 26160

Bad Zwischenahn, Duitsland

Aken, 10 november 2018

Dit is een Nederlandstalige publieksversie van het rapport "Nedmag Winningsplan 2018 Squeeze mining-induced stress changes in the faulted overburden of the Veendam salt pillow" van 10-11-2018. Deze Engelstalige versie is leidend.

Samenvatting

Het doel van dit project was de spanningsveranderingen te onderzoeken in de aardlagen en breukzones boven het Veendammer zoutkussen. Het betreft spanningsveranderingen door *squeeze mining* in een aantal nieuwe cavernes (VE-5, -6, -7 en -8) in combinatie met de spanningsveranderingen door Nedmags bestaande cavernes. Tevens onderzoeken we of bestaande breuken in de aardlagen boven het Veendammer zoutkussen hierdoor gereactiveerd kunnen worden. We bekijken de ontwikkelingen in de spanning gedurende 65 jaar en beschouwen deze twee situaties: (I) reactivering door spanningsveranderingen veroorzaakt door oplos-*squeeze mining*, met een intacte deklaag van steenzout (haliet) en hydrostatische poriëndruk in de aardlagen boven het zout; (II) reactivering door toename van de poriëndruk in de aardlagen boven het zout in het geval van een gescheurde deklaag van steenzout (halietdak) en de intrusie van pekkel onder hoge druk in de aardlagen boven het zout (het evenement van 20 april 2018, met snel drukverlies in Nedmags VE – TR cavernecoluster en de vorming van een grote, verticale, vloeistofgedreven scheur in de aardlagen boven het zout).

(I) In het geval van een intacte steenzouten deklaag

Hier bouwen we voort op een eerdere studie (Raith en Urai [2017]) waarin onderzoek werd gedaan naar mogelijke reactivering van breukzones door Nedmags *squeeze* oplosmijnbouw en de daardoor veranderende spanningsveranderingen boven de bestaande cavernes. Hiervoor gebruiken we geomechanische modellen en 3D seismische kartering van de breuken in de lagen boven het zout. Deze studie liet zien dat Nedmags huidige oplosmijnbouw in het grootste deel van deze lagen de schuifspanningen verlaagt naar mechanisch stabielere condities. Dit is in overeenstemming met de theorie en met eerdere simulaties. In een klein deel van deze lagen nemen de schuifspanningen toe, maar deze toename is klein en de schuifspanningen blijven waarschijnlijk ver verwijderd van het criterium voor breuk-activering. Om deze reden hebben we de reactivering van de bestaande, tektonisch inactieve breuken in de lagen boven het zout door deze spanningsveranderingen ingeschat als zeer onwaarschijnlijk.

Deze studie gebruikt soortgelijke eindige-element-geomechanische modellen om de bijkomende spanningsveranderingen te bestuderen die zijn veroorzaakt door *squeeze mining* in een tweede caverneveld (VE-5, -6, -7 en -8) in een aantal modellen, met een maximale bodemdaling van 95 centimeter op het diepste punt van de samengestelde bodemdalingssom. De studie is uitgevoerd in drie stappen.

Ten eerste is de initiële spanningstoestand (voor aanvang van de mijnbouw) in het tektonisch inactieve Veendammer zoutkussen en de aardlagen boven het zout bepaald. Hiervoor is een *plane strain* model gebouwd, gebaseerd op een 3D seismisch profiel en met vergelijkbare mechanische eigenschappen als de eerdere studie. Vervolgens hebben we 10 miljoen jaar geologische ontwikkeling gesimuleerd, totdat er een geologisch stabiele toestand was bereikt, waarbij de opwaartse kracht van het Veendammer zoutkussen in evenwicht was met het spanningsveld van de bovenliggende lagen. Omdat de horizontale spanningen in gesteentes boven het zout in het noorden van Nederland slecht bekend zijn, konden we op deze manier een beter initieel spanningsmodel krijgen dan modellen waarmee in eerdere studies en in de literatuur is gewerkt.

Als tweede is een set modellen met dezelfde stratigrafie en eigenschappen (maar met horizontale lagen) gebruikt om het door *squeeze mining* veroorzaakte verschil in het spanningsveld te bestuderen in een *plane strain*-model en in een axisymmetrisch model. Deze twee soorten model worden beiden vaak gebruikt om de deformatie van de lagen boven zoutcavernes te onderzoeken.

De resultaten van deze modelleringen laten zien dat de *plane strain* modellen in alle gevallen conservatief zijn. D.i.: als een bepaalde situatie in een *plane strain* model niet tot breuk-activering leidt, dan leidt deze in een axisymmetrisch model zeker niet tot breuk-activering. Om deze reden is het *plane strain*-model gebruikt voor verdere berekeningen.

Als derde hebben we *squeeze mining* van het bestaande caverneveld op ons *plane strain* initieel spanningsmodel gesuperponeerd vanaf de initieel geologisch stabiele situatie tot en met de huidige situatie. Dit had als doel om het effect van de mijnbouw van Nedmag op de initiële situatie te modelleren. De resultaten waren in kwalitatieve overeenstemming met de resultaten van de eerdere studie. Vervolgens hebben we een tweede (voor de toekomst geplande) fase van *squeeze mining* op de huidige cavernes en op een tweede caverneveld (VE-5, -6, -7 en -8) gesuperponeerd. Het door dit tweede caverneveld veroorzaakte spanningsveld heeft een vergelijkbare vorm als het eerste, maar is kleiner in omvang. Deze modellen reproduceerden de voorspelde bodemdaling van het gebied.

We hebben deze resultaten verder onderzocht door te berekenen hoever deze situatie af lag van de criteria voor reactivering van de lagen boven het zout: een maatstaf van hoeveel de spanning moet toenemen voordat een optimaal georiënteerde, cohesieloze breuk gereactiveerd wordt. Ook dit is een conservatieve benadering: de breuken boven het zout zijn meest waarschijnlijk niet optimaal georiënteerd voor reactivering. De resultaten laten zien dat zelfs in onze conservatieve modellen, deze afstand tot reactivering (berekende schuifspanning gedeeld door benodigde schuifspanning om de breuken te laten schuiven) overal in het model onder de 100% blijft. **Ergo: als de steenzouten deklaag intact is,**

is de reactivering van bestaande, tektonisch inactieve breuken in de lagen boven het zout door de spanningsveranderingen die zijn veroorzaakt door squeeze mining zeer onwaarschijnlijk.

Het is moeilijk in te schatten hoe deze krachten interacteren met de spanning die wordt veroorzaakt door gaswinning in de nabije Groningen en Annerveen gasvelden zonder data over die spanningen. De bodemdaling die wordt veroorzaakt door deze twee soorten mijnbouw kan duidelijk bij elkaar worden opgeteld, net als de spanningsveranderingen in de ondergrond. Bij gasproductie vinden de grote spanningsveranderingen en breuk-reactiveringen echter plaats in een reservoir onder het Zechsteinzout, en dus ver weg van de cavernes van Nedmag. Tot op heden is er, behalve de opgetelde bodemdaling in de buurt van Veendam, geen meetbaar effect van deze interacties waargenomen. Hoewel we niet in de positie zijn om uitspraken te doen over de spanning in de lagen boven het zout die worden veroorzaakt door gasproductie (dat is aan de NAM), is deze spanningsverandering ons inziens significant lager dan de spanningsverandering die wordt veroorzaakt door de oplosmijnbouw van Nedmag. Om deze reden heeft de gaswinning onder het Zechsteinzout waarschijnlijk geen invloed op onze conclusies.

(II) In het geval van een gebroken steenzouten deklaag

Hier kijken we naar de gebeurtenis van 20 april 2018, waarbij een snel drukverlies optrad in Nedmags TR cavernecluster. Dit verlies wijst erop dat er een verticale, vloeistofgedreven scheur in de aardlagen boven het zout is ontstaan. De gebeurtenis zelf valt samen in de tijd met een klein seismisch event dat is waargenomen door seismometers. Binnen de context van deze studie is de vraag of een dergelijke gebeurtenis tot breuk-reactivering zou kunnen leiden.

Als de afschuivingen (breuken) in de aardlagen boven het zout zo permeabel zouden zijn dat de vloeistof er in door zou dringen, laten simpele mechanische overwegingen zien dat de vloeistofdrukken in de breuk (deze zijn dan iets lager dan de minimale totale druk in de omliggende rots) potentieel hoog genoeg waren om reactivering van sommige van de bestaande breuken in deze lagen op te wekken. Dit had plaats kunnen vinden tijdens de uitbreiding van de scheur of tijdens de tragere binnendringing van vloeistof en druk via de scheurwanden naar grotere gesteentevolumes.

De afwezigheid van een grotere aardstok tijdens en na de gebeurtenis van april 2018 is echter consistent met het inzicht dat de breuken *niet permeabel genoeg* zijn om significant binnen te worden gedrongen door de vloeistof, aangezien ze voornamelijk laag-permeabele breukklei en tektonische aders bevatten. Dit inzicht is gebaseerd op de klei-rijke stratigrafie, veldonderzoek naar soortgelijke situaties, en de afwezigheid van indicaties van open scheuren in boringen in de buurt van Veendam. Er kan veilig worden aangenomen dat deze breukstructuren in de geologisch gebroken aardlagen boven het zout over het hele zoutkussen gelijk zijn. **Als er in de toekomst een lek in de steenzouten deklaag zou optreden, schatten we daarom het risico op een groter seismische gebeurtenis in als laag.**

Inleiding

Het doel van dit project was de spanningsveranderingen te onderzoeken in de aardlagen en breukzones boven het Veendammer zoutkussen. Het betreft spanningsveranderingen door *squeeze mining* in een aantal nieuwe cavernes (VE-5, -6, -7 en -8) in combinatie met de spanningsveranderingen die zijn veroorzaakt door Nedmags bestaande cavernes. Tevens onderzoeken we of bestaande breuken in de aardlagen boven het Veendammer zoutkussen hierdoor gereactiveerd kunnen worden. We bekijken de ontwikkelingen in de spanning gedurende 65 jaar en beschouwen twee situaties: (I) reactivering door spanningsveranderingen veroorzaakt door oplos-*squeeze mining*, met een intacte deklaag van steenzout (haliet) en hydrostatische poriëndruk in de aardlagen boven het zout; (II) reactivering door toename van de poriëndruk in de aardlagen boven het zout in het geval van een gescheurde deklaag van steenzout en de intrusie van pekkel onder hoge druk in de aardlagen boven het zout.

Deel 1: in het geval van een intacte steenzouten deklaag

Methode

De algemene aanpak in deze studie is vergelijkbaar met die van eerdere studies als Fokker et al. (1995), en dezelfde als die in ons vorige rapport (Raith en Urai [2017]). Om een simulatie te maken van de spanningsveranderingen in het Veendammer zoutkussen en de aardlagen erboven die zijn veroorzaakt door *squeeze mining* in een caverneveld, werd gebruik gemaakt van de eindige-elementenmethodesoftware 3DS Abaqus. Dit programma wordt veel toegepast in de bouw en in de materiaalwetenschappen en wordt beschouwd als een standaard binnen de industrie (<http://www.3ds.com/>). De resultaten zijn geëvalueerd aan de hand van een cohesieloos Mohr-Coulomb criterium voor de brosse aardlagen boven het zout. Dit is een erg conservatief criterium om te gebruiken bij het berekenen van de kans op breuk-activering. Als dit criterium wordt bereikt in een bepaald volume samenhangende rots kan reactivering pas optreden als er al een optimaal georiënteerde, cohesieloze breuk bestaat. Omdat hiervoor geen berekeningen van plasticiteit nodig waren konden we de eigenschappen van de aardlagen boven het zout elastisch houden.

De modellen werden in stappen opgebouwd. Als eerste werd een geostatische spanning vastgesteld, gevolgd door een fase waarin het model in geologische tijd tot evenwicht kon komen. Als derde werd de druk in het caverneveld dermate verlaagd dat er ongeveer 65 cm bodemdaling ontstond in het midden van de zakkingskom. Vervolgens superponeerden we op deze situatie, op basis van de geplande mijnbouw door Nedmag, een tweede fase van *squeeze mining* in de huidige cavernes en in een tweede caverneveld (VE-5, -6, -7 en -8). Tijdens deze twee stappen evalueerden we de spanningsontwikkeling die de *squeeze mining* veroorzaakte.

Opzet van het FE model

Het Veendammer zoutkussen heeft een ovale vorm met een as in de richting NE-ZW en een diameter van ongeveer 10 km (**fig. 1**). Het is omringd door *verschillende* zoutstructuren (d.w.z. bekkens, kussens of diapieren) (Strozyk et al., 2014). Het caverneveld van Veendam en Tripscompagnie ligt rond de top van het oostelijke deel van het kussen. De dertien bestaande putten zijn verdeeld over een gebied met een diameter van 2,5 km in de Zechstein-III 1b tot 3b K-Mg zoutlagen, in een zeer onregelmatig, gedeeltelijk verbonden cavernestelsel dat is ontstaan door oplosmijnbouw. De geologische evolutie en de structuur van het Veendammer kussen wordt in detail beschreven in recente publicaties als Raith et al. (2016), Raith et al. (2017), Raith (2017).

In ons eerste rapport bestudeerden we modellen met rotatiesymmetrie, om zo de spanning boven een cavernecuster te schatten. Hier bestuderen we twee cavernecusters, een situatie die niet goed kan worden bestudeerd in modellen met rotatiesymmetrie. Een volledig 3D-model was alleen een optie geweest als er nauwkeurige data beschikbaar waren over mechanische eigenschappen, initiële spanningen en de geometrie van de cavernes (Van der Zee et al. [2011]). In ons geval rechtvaardigen de beschikbare nauwkeurigheden deze inspanningen echter niet. We kozen voor een combinatie van 2D *plane strain* en axisymmetrische modellen om deze situatie te benaderen.

Als eerste hebben we de modellen van de initiële spanningstoestand (voor aanvang van de mijnbouw) in het tektonisch inactieve Veendammer zoutkussen en de aardlagen boven het zout verder ontwikkeld (**fig. 1**). Dit model bevat de geometrieën van zowel het bestaande als het toekomstige cavernecuster, maar deze zijn niet actief op dit moment. Het nieuwe *plane strain*-model is gebouwd met een geometrie gebaseerd op een 3D seismisch profiel, met gebruik van vergelijkbare mechanische eigenschappen als in de eerdere studie. Vervolgens hebben we 10 miljoen jaar geologische ontwikkeling gesimuleerd, totdat er een geologisch stabiele toestand was bereikt, waarbij de opwaartse kracht van het Veendammer zoutkussen in evenwicht was met het spanningsveld van de bovenliggende lagen. Omdat de horizontale spanningen in gesteentes boven het zout in het noorden van Nederland slecht bekend zijn, konden we op deze manier een beter initieel spanningsmodel krijgen dan de modellen waarmee in eerdere studies is gewerkt.

Als tweede gebruikten we een set *plane strain*-modellen en axisymmetrische modellen (**fig. 10 – 19**) met dezelfde stratigrafie maar met een horizontale laagopbouw, om de verschillen tussen de met beide modellen berekende spanningsvelden die zijn ontstaan door *squeeze mining* te verkennen. We gebruikten modellen met een centrale cave-

(fig. 10) en modellen met een aantal verdeelde cavernes (fig. 15). De cavernes bevinden zich in de kalium-magnesiumzoutlaag, die een stuk zachter is dan het omringende steenzout. Vervolgens superponeerden we *squeeze mining* van het eerste (bestaande) caverneveld op ons *plane strain*-model – dat gebaseerd is op het 3D seismisch profiel – vanaf de initiële geologisch stabiele situatie. Zoals we verwachtten kwamen de resultaten overeen met onze eerste studie. Als laatste superponeerden we een tweede fase *squeeze mining* in een tweede caverneveld op deze situatie (fig. 2 – 9). De modellen werden opgebouwd met hetzij 8-node bikwadratische *plane strain* vierhoekige (CPE8), hetzij 8-node bikwadratische axisymmetrische vierhoekige (CAX8) elementen.

Randvoorwaarden waren als volgt: (1) bodem van het model vastgezet in diepterichting (Y-as); (2) beide zijdes vastgezet in horizontale richting (X-as); (3) cavernewanden vastgezet in stap 1 en 2, drukgrens in stap 3; (4) zwaartekracht actief in het hele model; (5) initiële verticale spanningen werden berekend aan de hand van zwaartekracht en dichtheid. Initiële horizontale spanningen op basis van een horizontale tot verticale totale spanningsratio (Kh) waarbij 1.0 werd aangenomen als doelwaarde in het zout en 0.8 in de lagen erboven. Dit werd in de initiële heterogene spanningssituatie geëquilibreerd gedurende geologische tijd.

Lagen

Om de mechanische reactie van de lagen boven het zout op de convergentie van de cavernes te simuleren werd het model verdeeld in verschillende units met verschillende reologieën en mechanische eigenschappen (Fokker [1995]; Fokker en Visser [2014]) (fig. 1; Tabel 1). De Rotliegendelaag ligt onder het Zechsteinzout. In de Zechstein-steenzout-lagen zijn de onderbroken Anhydrietlagen en een kalium-magnesiumzoutlaag aanwezig als representatie van de zachtere ZIII 1b tot 3b lagen. De sedimenten boven het zout zijn vereenvoudigd meegenomen als een Triassische unit met daarboven de Onder en Boven Krijtlagen en de Tertiair-Kwartair sedimenten van de Upper North Sea Supergroup. Deze units zijn dikker in de bekken dan boven de kern van het kussen.

De reologie van het zout is elastisch plus kruip-volgens-een-machtswet (Tabel 1), de aardlagen boven het zout zijn gemodelleerd als elastisch. Aangezien het doel van deze studie is om duidelijk te maken of de spanningen in de aardlagen boven het zout het Mohr-Coulomb plasticiteit criterium kunnen bereiken tijdens elastische deformatie is het niet nodig om plasticiteit toe te voegen aan die aardlagen.

De reologie van zout

Onder de omstandigheden van *squeeze mining* vervormen evaporieten elastisch en door kruip, zonder dilatantie (Urai et al. [2008]). De plastische deformatie van evaporieten is omschreven als een combinatie van dislocatie kruip (volgens een machtswet) en (lineaire) vloeistof geassisteerde drukoplossing / neerslagkruip. Omdat *squeeze mining* leidt tot een geologisch snelle deformatie hebben we besloten om alleen kruip volgens een machtswet te gebruiken in ons model (Urai et al. [2008]). We concludeerden dat het meenemen van de zwakkere lineaire plastische kruip, hoewel mogelijk, geen significant effect zou hebben op de resultaten die relevant zijn voor dit rapport.

We kozen ervoor om de reologie van de gemengde kalium- en magnesiumzouten in de 1b-laag te beschrijven met eenzelfde spanningsexponent als steenzout, maar veel zachter dan steenzout, om zo een pakket van carnalliet, haliet (steen-zout) en bischofiet te simuleren (Tabel 1; Raith [2017]). Dit is wederom een vereenvoudigde weergave, maar aangezien de spanningswijzigingen in de aardlagen boven het zout plaatsvinden op een afstand van meer dan tien maal de dikte van een typische bischofietlaag, concludeerden we dat dit de resultaten die relevant zijn voor dit rapport niet significant zouden veranderen. Merk op dat we ter verbetering van onze vorige modellen een realistischere, zachtere kalium-magnesiumzout-reologie hebben gebruikt dan in de vorige studie (kruip factor = $1e-39$).

Tabel 1:

Naam	Diepte in het midden van het kussen (m)	Diepte in de bassins (m)	Dichtheid (kg/m ³)	Youngs Modulus (GPa)	Poisson ratio	Kruip vermenigvuldigings-factor	Kruip exponent
Kwartair + Tertiair	0 – 400	0 – 800	2000	1	0.38	–	–
Onder Krijt	400 – 900	800 – 1400	2300	10	0.18	–	–
Boven Krijt	900 – 1000	1400 – 1500	2350	15	0.23	–	–

Triassisch	1000 – 1400	1500 – 2100	2450	10	0.25	–	–
Steenzout	1400 – 3300	2100 – 3300	2040	30	0.25	1e-44	5
Kalium-magnesiumzout	1560 – 1630	2230 – 2260	2040	30	0.25	1e-39	5
Anhydriet	aders	aders	2600	30	0.25	1e-54	5
Rotliegend	3300 – 5000	3300 – 5000	2600	15	0.18	–	–

Resultaten van het model

Initiële spanning

Spanningen in de modellen werden berekend als totale spanningen, waarbij we uitgingen van gedraineerd gedrag en overall een hydrostatische poriëndruk van $SG = 1.0$. Voor de analyses van stabiliteit werden effectieve spanningen berekend met behulp van hydrostatische poriëndruk. De bovenste afbeeldingen in **fig. 2, 3 & 4** laten de ontwikkeling van spanning zien aan de hand van contouren van de minimale en maximale hoofdspanningen en schuifspanningen. Merk op dat de spanningscontouren in het beginmodel niet horizontaal zijn, zoals vaak wordt aangenomen. Dit heeft te maken met de herverdeling van spanning die nodig is voor een geologisch stabiele situatie boven het Veendammer kussen.

We merken hierbij op dat de huidige *in situ* spanningssituatie in de noordelijke Nederlanden over het algemeen niet goed bekend is door een gebrek aan betrouwbare metingen. Dit zorgt voor een zekere onzekerheid in de analyses van de ondergrond die de *verandering* in spanning berekenen. In deze studie, in tegenstelling tot andere studies, hebben we geprobeerd een initiële spanning vast te stellen die geologisch stabiel is, als eerste stap naar een oplossing voor dit probleem.

We merken ook op dat de meest waarschijnlijke oriëntatie van de initiële minimale hoofdspanning (de minimale horizontale spanning) in dit deel van Nederland NO-ZW is (Gent et al. [2009]). Deze oriëntatie is niet consistent met beweging van de bestaande breuken in de lagen boven het Veendammer zout, wat suggereert dat de initiële spanning niet optimaal is voor de reactivering van breuken. Dit is overeenkomstig de conclusies van recente studies dat de initiële spanningsstaat in de ondergrond van het Groningen Veld niet een kritieke spanning was. We zullen later in dit rapport op dit punt terugkomen.

Bodemdaling

De geometrie van de zakkingskom (**fig. 5**) lijkt op de resultaten van Fokker en Visser (2014). De verplaatsing is voornamelijk verticaal. In de lagen boven de Trias wordt zoals verwacht de zone van verticale beweging breder, waardoor een horizontale bewegingscomponent richting het centrum van het caverneveld ook significant is. Er werd in het model een berekening gemaakt van kleine, lokale horizontale rek in de gebieden boven de cavernes in de Trias laag. Merk ook op dat verticale verschuiving op het hoogste punt van het zout hoger is dan aan de oppervlakte, wat zorgt voor verticale spanning in de lagen boven het zout. Bodemdaling in het horizontaal gelaagde model is te zien in **fig. 13** en **fig. 18**. Merk op dat deze modellen om rekentechnische redenen niet allemaal zijn gerund tot een bodemdaling aan de oppervlakte van 65 cm was bereikt, maar dat de conclusie van de vergelijking hetzelfde is voor verschillende waarden van maximale bodemdaling omdat de lagen boven het zout elastisch zijn en de modellen zijn gemaakt om axisymmetrische modellen te vergelijken met *plane strain* modellen.

Modellen met horizontale lagen

In zowel de modellen met een enkele caveerne als de modellen met meerdere cavernes zijn de spanningspatronen in de aardlagen boven het zout vergelijkbaar in axisymmetrische en *plane strain*-modellen. De resultaten zijn te zien in een serie vergelijkingsdiagrammen in **fig. 10 – 19**. Er zijn twee zones te onderscheiden, die in detail zijn besproken in het vorige rapport. Zone I ligt direct boven de cavernes, terwijl zone II op 300 tot 1000 m afstand van de cavernes ligt.

Karakteristiek voor Zone I is een verlaging van differentiële spanning. In de Triassische laag wordt de verlaging van deze differentiële spanning ($s_1 - s_3$) voornamelijk veroorzaakt door een vermindering van de sub-verticale σ_1 hoofdspanning (**fig. 11**). De sub-horizontale σ_3 wordt ook verlaagd in dit gebied met kleinste waarden in het gebied tussen cavernes. In het Krijt wordt de lagere differentiële spanning vooral veroorzaakt door een toename van de horizontale σ_3 .

In Zone II kunnen hogere differentiële spanningen tot 1 MPa worden geobserveerd. De toename wordt veroorzaakt door een toename van verticale σ_1 spanning in dat gebied. **De resultaten van dit model laten duidelijk zien dat *plane strain*-modellen in alle gevallen conservatief zijn: als een situatie in een *plane strain*-model niet leidt tot breuk-reactivering, dan zal de situatie in een axisymmetrisch equivalent ook niet tot reactivering leiden.**

Plane strain-modellen gebaseerd op seismische profielen

Op basis van deze resultaten concludeerden we dat de *plane strain*-modellen (fig. 1) een redelijke en conservatieve basis bieden om de spanningen boven de twee cavernevelden mee te evalueren.

Eerst superponeerden we *squeeze mining* van het bestaande caverneveld op ons initiële *plane strain*-model, van de initiële, geologisch stabiele situatie tot en met de huidige situatie (“na 50 a” in fig. 2 – 9). De resultaten zijn overeenkomstig de uitkomsten van de eerste studie en met de geobserveerde bodemdaling. Daarna superponeerden we een tweede fase van *squeeze mining* op deze situatie in de huidige cavernes en in een tweede caverneveld (VE-5, -6, -7 en -8). Het spanningsveld dat wordt veroorzaakt door dit tweede caverneveld heeft een vergelijkbare vorm, maar is kleiner dan dat boven de bestaande cavernes. Deze modellen reproduceren het voorspelde profiel van de bodemdaling. **We evalueerden de resultaten door de afstand te berekenen tot het criterium voor breuk-reactivering in de aardlagen boven het zout: een maatstaf van hoe ver de spanning af is van de reactivering van een optimaal georiënteerde, cohesieloze breuk.** Dit is geïllustreerd in een Mohrdiagram in fig. 7 en 8.

Zoals verwacht laten de resultaten zien dat de schuifspanning in de aardlagen boven het zout afneemt in het gebied direct boven het zout en licht toeneemt ten oosten van het Ve-Tr caverneveld. We merken ook op dat de Von Mises-schuifspanning toeneemt in de steenzouten deklaag van de cavernes, en ook in het Anhydriet onder de cavernes (fig. 7 en 8). De nabijheid tot het criterium voor breuk-reactivering vermindert tot een meer stabiele configuratie boven de cavernes, en neemt in sommige gebieden licht toe, maar komt niet in de buurt van het (toch al conservatieve) criterium op welk punt dan ook in de aardlagen boven het zout.

Breuken in de aardlagen boven het zout

Als deel van een studie naar het risico van breuk-reactivering in de aardlagen boven het Veendammer kussen zijn de breuken in deze aardlagen in beeld gebracht. De resultaten hiervan zijn getoond in een vorig rapport en tevens in fig. 20. Hoewel de kwaliteit van het 3D seismische profiel redelijk is, kan alleen het algemene patroon van de breuken in beeld worden gebracht, indachtig de bekende problemen en beperkingen van het in beeld brengen van breuken. In de aardlagen boven het Veendammer kussen zijn twee dominante breukrichtingen aanwezig: NO-ZW breuken die parallel liggen aan de top, en N-Z breuken ten Noordoosten en Zuidwesten van het Veendammer kussen (fig. 20). Geen van deze breuken loopt door tot de oppervlakte, in overeenstemming met de afwezigheid van neo-tektonische activiteit in het gebied, en geen van deze breuken zijn optimaal georiënteerd voor reactivering in het huidige spanningsveld, aangezien de maximale horizontale spanning NW-ZO georiënteerd is.

Discussie

De modellen die hier worden gepresenteerd reproduceren de geobserveerde en voorspelde bodemdaling (fig. 21), maar zijn maar een subset van vele verschillende modellen (met verschillende cavernegroottes, drukgeschiedenissen, mechanische eigenschappen, etc.) die kunnen worden gebruikt om de geobserveerde bodemdaling en productie door de tijd heen aan elkaar te linken door te kiezen uit een verscheidenheid van mechanische eigenschappen en *belastingen*. In onze modellen is er geen poging gedaan om de historische cijfers te matchen met drukdata en oplosvolumes.

Vergeleken met de modellen die worden gebruikt in Fokker et al. (1995) en Raith (2017) hebben we een complexer cavernemodel gebruikt en hebben we geprobeerd een meer realistische initiële drukverdeling in het Veendammer kussen te berekenen. De initiële spanningen zijn stabiel in geologische tijd, zonder plasticiteit in de aardlagen boven het zout, consistent met de afwezigheid van neo-tektoniek en consistent met de schaarse data over LOT resultaten in het Bunter, die te zien zijn in fig. 22. Omdat de modellen overeenkomen met de gemeten bodemdaling en omdat de aardlagen boven het zout elastisch zijn, concluderen we dat verschillende uitvoeringen van dit model gelijksoortige spanningsveranderingen in de aardlagen boven het zout zou produceren.

Gezien de deformaties in de aardlagen boven het zout is het duidelijk dat de aanwezigheid van een serie cavernes leidt tot interacterende spanningsvelden in de aardlagen boven het zout (fig. 4, fig. 9). In de ondiepere Krijtlagen zijn lagere differentiële spanningen voornamelijk veroorzaakt door horizontale inkorting en daarmee hogere horizontale spanningen. Kleine toenames in differentiële spanning kunnen alleen worden geobserveerd boven de randen van de cavernes. Hier wordt de horizontale spanning verlaagd door horizontale uitrekking doordat zout richting de cavernes stroomt.

Indachtig dat zowel *plane strain*-modellen als het cohesieloze Mohr-Coulomb criterium voor breuk-reactivering conservatief zijn (aangenomen dat optimaal georiënteerde breuken overal aanwezig zijn), beoordeelden we de spanningsveranderingen in de aardlagen boven het zout. De resultaten zijn te zien in fig. 7, 8 en 9. **In een deel van de aardlagen maakt *squeeze mining* de spanning in de aardlagen boven het zout stabiel. In andere delen wordt de afstand tot het criterium voor breuk-reactivering iets kleiner, maar is de verhouding tussen aanwezige spanningen en voor reactivering van breuken benodigde spanningen nog steeds veel lager dan 100%.**

Interactie met spanning veroorzaakt door gaswinning (“gestapelde mijnbouw”)

Interactie met spanningen die worden veroorzaakt door gaswinning is moeilijk in te schatten zonder data over de spanningen die worden veroorzaakt door gasproductie in de nabijgelegen Groningen en Annervleen velden. Bodemdaling die wordt veroorzaakt door de twee soorten mijnbouw is duidelijk cumulatief, net als spanningsveranderingen in de ondergrond. Bij de gasproductie vinden de grote spanningsveranderingen en breuk-reactivering echter plaats onder het Zechsteinzout. Deze spanningsveranderingen op de diepte van het gasreservoir zijn waarschijnlijk minder intens in het Veendamgebied dan in het midden van het Groningen gasveld omdat de Veendammer cavernes zich tussen de Groningen en Annervleen velden bevinden, en de gepubliceerde kaarten laten geen significante samenkomst van gas onder de Veendammer cavernes zien. Spanningen in de lagen boven het zout veranderen naar verwachting veel minder door gaswinning, en bovendien geleidelijker, dan door *squeeze mining* door de afwezigheid van veranderingen in lokale poriëndruk en door de onkoppelende werking van de tussengelegen zoutlaag, maar deze effecten zijn nog niet gekwantificeerd.

Omdat het Veendammer kussen zich boven een slenk (depressie) bevindt die tussen de gas-reservoirs van het Groningen en het Annervleen veld ligt, met hun respectievelijke zakkingskommen, is er boven Nedmag's cavernes een mogelijk 'rand'-effect van een toename in spanning in de aardlagen boven het Groningen veld die wordt veroorzaakt door gaswinning. Die toename zou interactie kunnen hebben met de spanningen in de bovenliggende aardlagen die zijn veroorzaakt door oplosmijnbouw. Aan de andere kant zijn er door *squeeze mining* ook erg kleine spanningsveranderingen (<0.5 MPa) teweeggebracht in het (1000 meter dieper liggende) Rotliegendesreservoir, ondanks de aanwezigheid van het Zechsteinzout, maar onze modellen zijn niet gekalibreerd om hier nauwkeurige schattingen van te geven.

Tot op heden is er geen enkel meetbaar effect van de interactie tussen deze twee soorten mijnbouw, behalve de gecombineerde bodemdaling in het gebied rondom Veendam. Hoewel we niet in de positie zijn om de spanningsveranderingen in de aardlagen boven het zout te kwantificeren die zijn veroorzaakt door gaswinning – dat is de expertise van de NAM – zijn deze ons inziens een stuk lager dan de veranderingen die worden veroorzaakt door oplosmijnbouw. Om die reden heeft de aanwezigheid van gaswinning onder het Zechsteinzout waarschijnlijk geen consequenties voor onze conclusies.

Conclusie

De resultaten laten zien dat zelfs voor conservatieve modellen, er in de boven het zout gelegen aardlagen voldoende afstand tot het criterium voor breuk-reactivering blijft. **Hieruit concluderen we dat als de steenzouten deklaag intact is, de reactivering van bestaande, tektonisch inactieve breuken in de aardlagen boven het zout door spanningsveranderingen die zijn veroorzaakt door oplosmijnbouw bijzonder onwaarschijnlijk is.**

Deel 2: het geval van een defect in de steenzouten deklaag

Hier beschouwen we het recente lek van 20 april 2018, met snel drukverlies in Nedmags TR caverneccluster door het ontstaan van een grote, verticale, vloeistofgedreven scheur in de lagen boven Nedmags cavernes (Van den Hoek [2018]). De gebeurtenis valt in tijd samen met een klein seismisch event van minder dan $M_w=0.5$ in de nabijheid van het pekerveld dat in verband zou kunnen staan met de groei van de scheur. In de context van deze studie is de relevante vraag of een dergelijke gebeurtenis kan leiden tot breuk-reactivering in de aardlagen boven het zout. Omdat de vloeistofdruk in de aardlagen boven het zout in dit geval een stuk hoger kan worden dan hydrostatisch (tot en met de minimum hoofdspanning) en omdat beweging van breuken wordt gecontroleerd door effectieve spanning, is dit geval anders dan het geval dat we hebben besproken in deel 1 van dit rapport.

We namen de trend van cavernedrukken en spanningen in het Zechsteinzout en in de aardlagen boven het zout, en vergeleken deze met de data in **fig. 3**, waarop een contourplot te zien is van de minimale hoofdspanning in het model. Op **fig. 23** is een contourplot te zien van de verandering in minimale hoofdspanning tussen het initiële en het uiteindelijke ("65a") stadium.

Dit laat zien dat boven de cavernes de minimumspanning in de steenzouten deklaag lokaal afneemt met ongeveer 4 MPa, het initiële verschil tussen cavernedruk en minimumspanning in de steenzouten deklaag (**fig. 22**). De druk die in dit geval in de cavernes aanwezig is, is daarmee vergelijkbaar met de minimale hoofddruk in de steenzouten deklaag. De richtingen van de minimale hoofdspanning in de steenzouten deklaag boven de cavernes variëren aanzienlijk (**fig. 9**) en de Von Mises-spanning in de steenzouten deklaag is toegenomen tot een paar MPa, wat leidt tot enige zoutstroming. Dit wil zeggen dat onze modellen ook de voorwaarden voor de stroming van cavernevloeistof door de steenzouten deklaag reproduceren.

Een gedetailleerdere analyse hiervan staat in een apart rapport (Fokker, 2018, ref. [11] NEDMAG Winningsplan). De cavernevloeistof die de aardlagen boven het zout binnendringt heeft dus een hogere druk dan de minimale hoofdspanning in de aardlagen boven het zout en creëert een sub-verticale scheur. Het pad hiervan kan bestaande breuklijnen doorsnijden, en zoals aangetoond door Van den Hoek (2018) kan de hoge vloeistofdruk in de scheur het omliggende gesteente tot meer dan 100m vanaf de scheurwand binnendringen, wat poriëndruk in een substantieel volume sterk doet toenemen. Op **fig. 24** en **fig. 25** is in een 3D Mohr diagram te zien welk effect dit heeft op de normale

breuken in de aardlagen boven het zout boven het lekpunt, voor zover die permeabel genoeg zijn om te worden gepenetreerd door de vloeistof.

Deze eenvoudige mechanische overwegingen laten zien dat de vloeistofdrukken in de scheur (die iets hoger zijn dan de minimale totale spanning in de omringende rotsen) potentieel hoog genoeg zijn om reactivering op te wekken in veel – maar niet alle – oriëntaties van bestaande breuken in de aardlagen boven het zout, direct tijdens het ontstaan en de groei van de scheur of tijdens de tragere poriëndrukpenetratie via de scheurwanden in grotere rotsvolumes. De afwezigheid van een grotere aardschok tijdens en na de gebeurtenis van 20 april 2018 is echter consistent met het inzicht dat de breuken *niet permeabel genoeg zijn* om significant binnengedrongen te worden door de vloeistof, aangezien ze vooral laag-permeabele klei-rijke gouge en tektonische aders bevatten. Dit is het gevolg van de klei-rijke stratigrafie en is aangetoond door veldstudies van analoge situaties, en door de afwezigheid van indicaties voor open breuken bij de uitvoering van boringen in de buurt. Sommige breuken in de aardlagen boven het zout zouden hebben kunnen bewegen door een non-seismische *verschuiving* tijdens de gebeurtenissen van 20 april 2018. We kunnen aannemen dat structuren in de geologisch gebroken aardlagen boven het zout vergelijkbaar zijn boven het hele Veendammer kussen, en de ervaring met de gebeurtenis van 20 April 2018 suggereren dat, hoewel deze gebeurtenis tot breuk-activering had kunnen leiden, er geen aardschok was, hetzij doordat er geen breuken zijn gereactiveerd, hetzij doordat beweging aseïsmisch was. **Dus kunnen we concluderen dat als in de toekomst een andere lek in de steenzouten deklaag plaatsvindt, de effecten op breuken vergelijkbaar zou zijn, en we schatten de kans op een grotere aardschok laag in.**

Bronnen

- Fokker, P.A. (1995). The behaviour of salt and salt caverns. Proefschrift, Technische Universiteit Delft.
- Fokker, P.A., Visser, J. (2014). Estimating the distribution of salt cavern squeeze using subsidence measurements, in: 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, Minneapolis, p. ARMA 14 – 7357.
- Fokker, P.A., Urai, J.L. and Steeneken, P.V. (1995). Production-induced convergence of solution mined caverns in magnesium salts and associated subsidence. In: Barends, Brouwer and Schröder (eds.): Land subsidence. Natural causes, measuring techniques, the Groningen gas field. Proceedings of the fifth international conference on land subsidence, Den Haag, Nederland, 16-20 Oct. 1995, p. 281-289.
- Raith, A.F., F. Strozyk, J. Visser, J.L. Urai (2016). Evolution of rheologically heterogeneous salt structures: a case study from the NE Netherlands. *Solid Earth* 7 (1), 67
- Raith, A.F. (2017). Internal deformation of salt bodies with large mechanical contrast: a case study of the Veendam salt Pillow, the Netherlands. PhD Thesis, RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2018-223888
- Raith, A.F., J.L. Urai, J. Visser (2017). Structural and microstructural analysis of K–Mg salt layers in the Zechstein 3 of the Veendam Pillow, NE Netherlands: development of a tectonic mélange during salt flow. *Netherlands Journal of Geosciences* 96 (4), 331-351
- Raith, Alexander F. and Janos L. Urai (2017). Squeeze mining- induced stress changes in the faulted overburden of the Veendam salt Pillow. Report to Nedmag Industries Mining & Manufacturing B.V., and in press, SaltMech IX conference.
- Schlöder, Z., Urai, J.L. (2005). Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle Triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands. *Int. J. Earth Sci.* 94, 941–955. doi:10.1007/s00531-005-0503-2
- Urai, J.L. (1983). Water assisted dynamic recrystallization and weakening in polycrystalline Bischofite. *Tectonophysics* 96, 125–157. doi:10.1016/0040-1951(83)90247-0
- Urai, J.L., Schlöder, Z., Spiers, C.J., Kukla, P.A. (2008). Flow and Transport Properties of Salt Rocks, in: *Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System*. pp. 277–290. doi:978-3-540-85085-4
- Van Eekelen, H.A., Urai, J.L., Hulsebos, T. (1981). Creep of Bischofite, in: *Proceedings, 1st Conference on the Mechanical Behaviour of Salt*. Pennsylvania.
- Van Gent, H., Back, S., Urai, J., Kukla, P. and Reicherter, K. (2009). Paleostresses of the Groningen area, the Netherlands: Results of a seismic based structural reconstruction. *Tectonophysics* 470(1-2): 147-161.
- Van der Zee, Wouter, Cem Ozan, Martin Brudy, Marc Holland (2011). 3D Geomechanical Modeling of Complex Salt Structures. 2011 Paper presented at: SIMULIA Customer Conference
- Strozyk, F., Urai, J.L., van Gent, H.W., de Keijzer, M., Kukla, P.A. (2014). Regional variations in the structure of the Permian Zechstein 3 intrasalt stringer in the northern Netherlands: 3D seismic interpretation and implications for salt tectonic evolution. *Interpretation* 2, SM101-SM117.
- Van den Hoek, P. (2018). Analysis of TR-2 salt cavern leakage incident of 20 April 2018 PanTerra Report for Nedmag.

Figuren

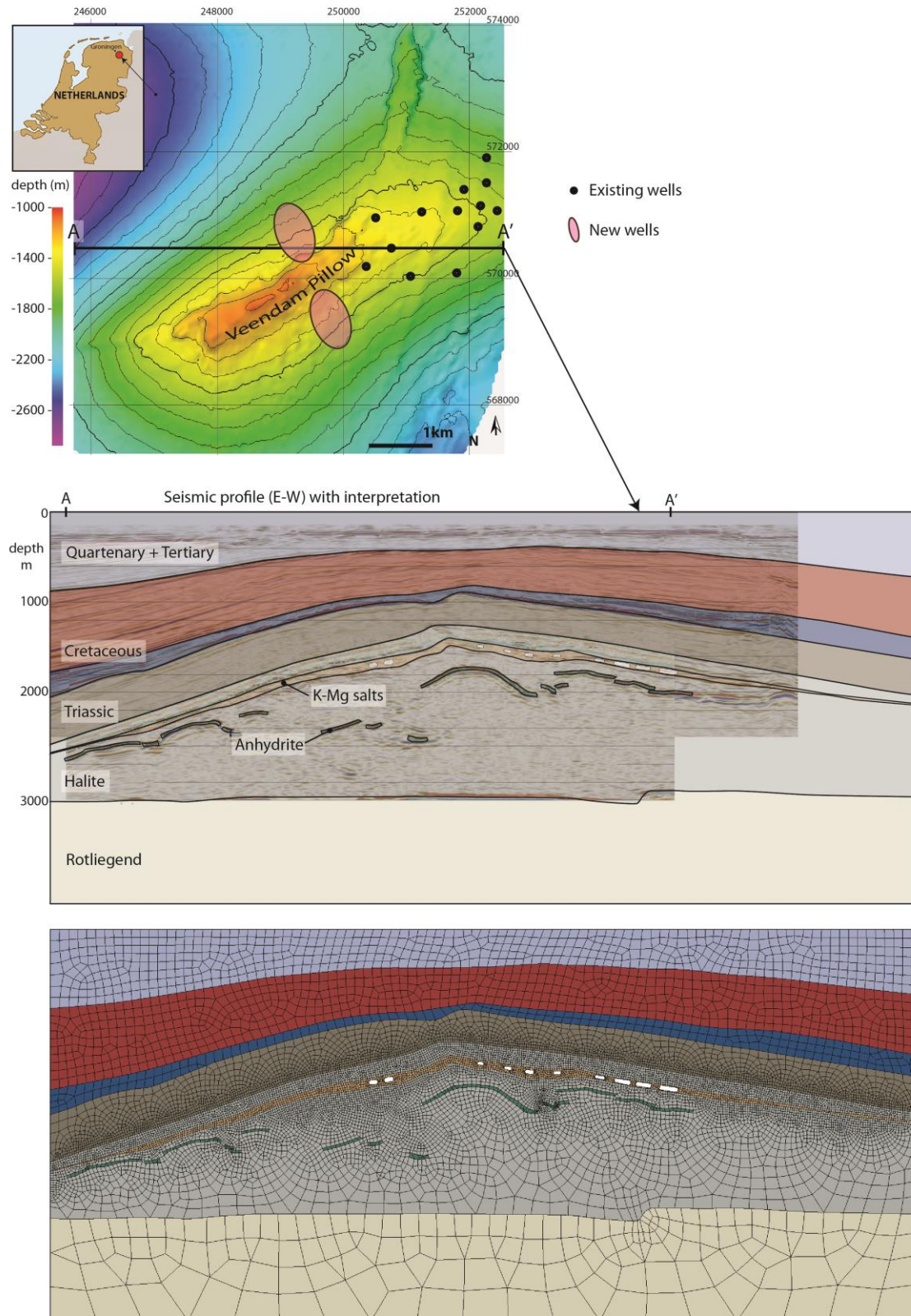


Fig. 1 – 3D seismische kaart van de diepte van de ZE III 1B-laag en de bestaande en nieuwe putlocaties. Geïnterpreteerd seismisch profiel langs de lijn zoals aangegeven (in de figuur). De verschillende gesteentepakketten die in de geomechanische modellen gebruikt worden zijn getoond, samen met het eindige-elementen-rooster dat op dit profiel is gebaseerd.

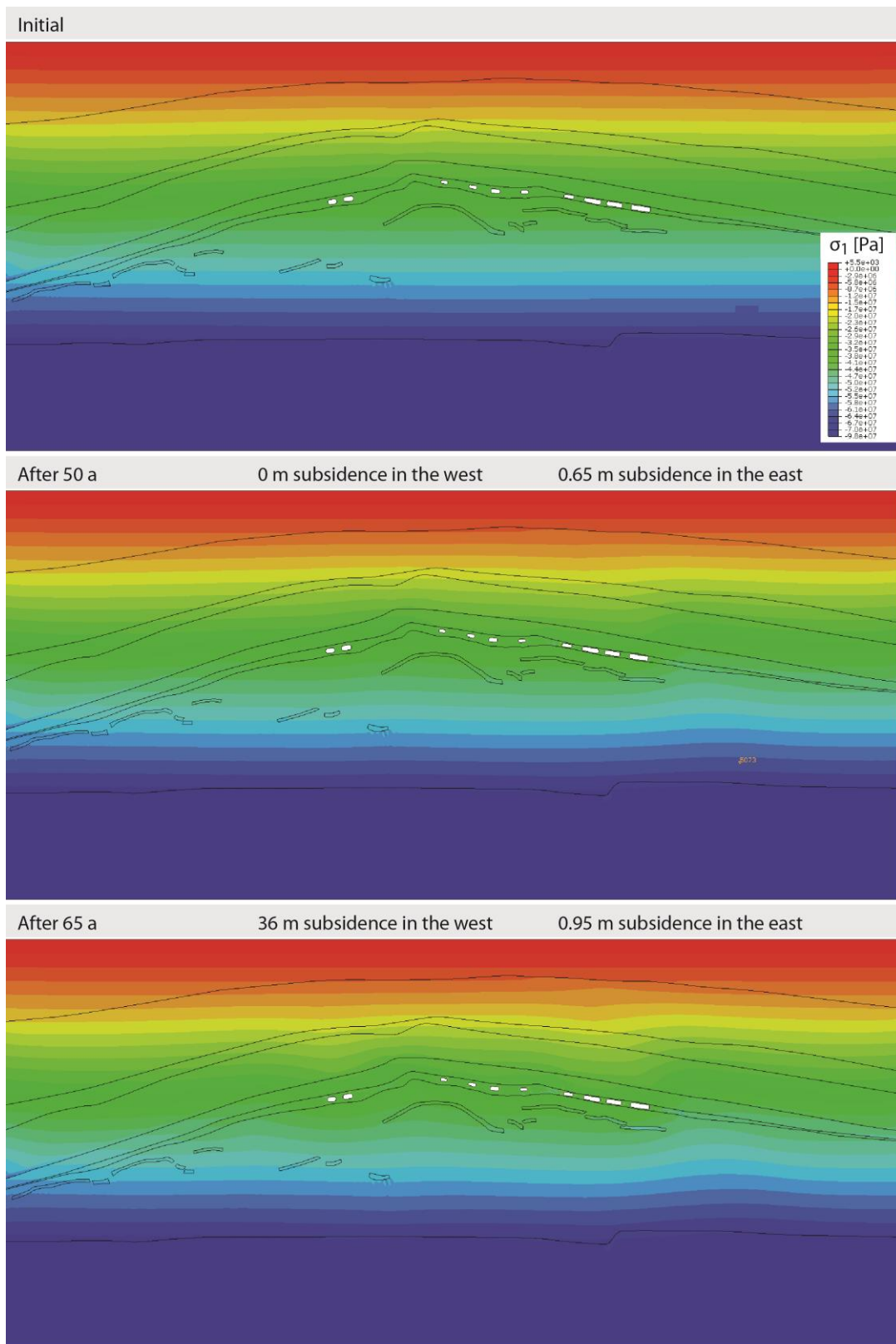


Fig. 2 – Maximale hoofdspanning in het model. Boven: initiële geologisch stabiele situatie; midden: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste cavernecuster; onder: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste en tweede cavernecuster. Merk op dat ABAQUS spanning positief weergeeft, terwijl in ondergrondstudies compressie vaak positief wordt weergegeven, wat leidt tot de ietwat verwarrende kleurenlegenda.

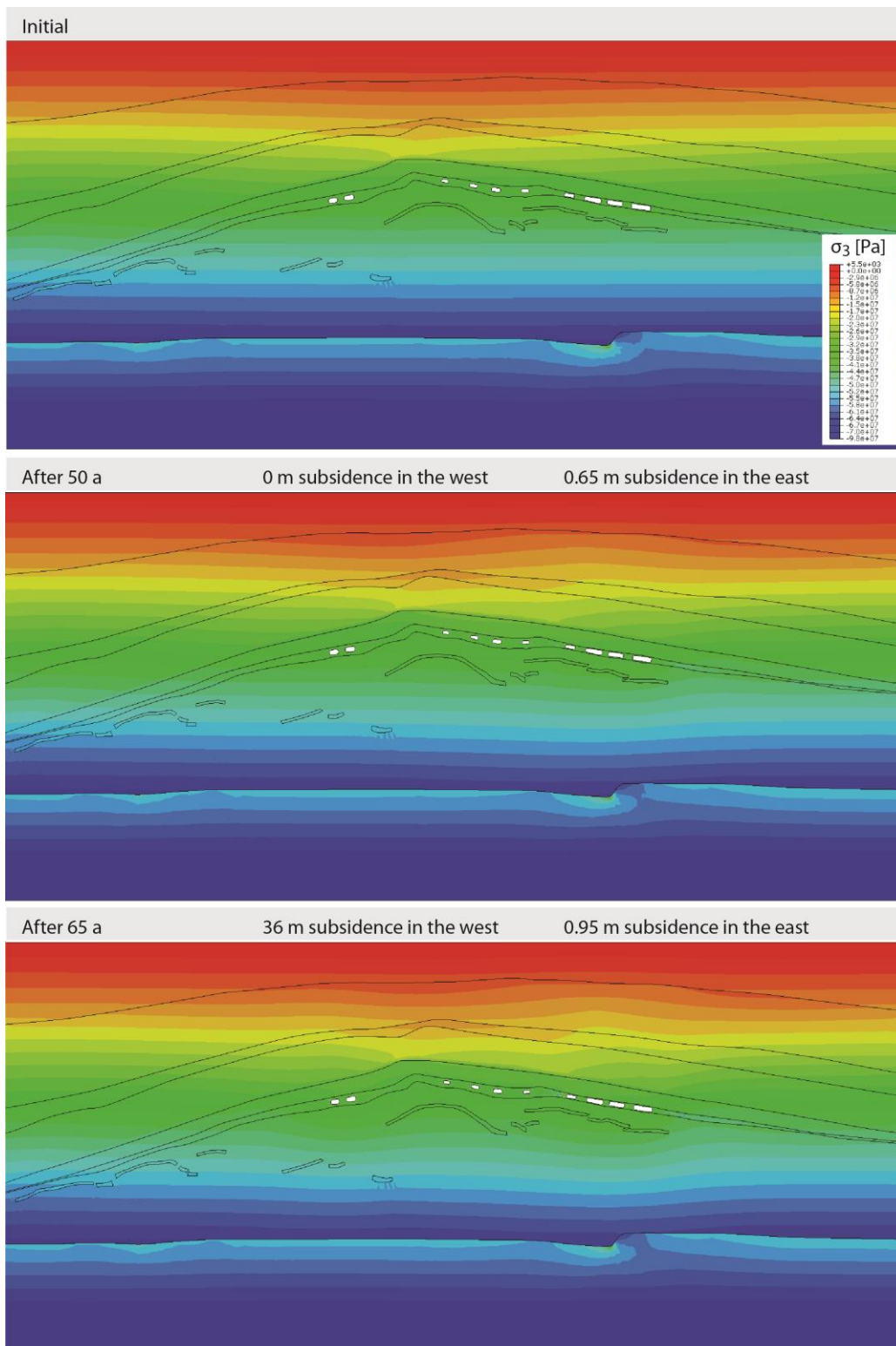


Fig. 3 – Minimale hoofdcompressiespanning in het model. Boven: initiële geologisch stabiele situatie (de curve van de contouren compenseren de stijfkracht van het Veendammer kussen); midden: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste cavernecoluster; onder: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste en tweede cavernecoluster. Merk op dat ABAQUS spanning positief weergeeft, terwijl in ondergrondstudies compressie vaak positief wordt weergegeven, wat leidt tot de ietwat verwarrende kleurenlegenda.

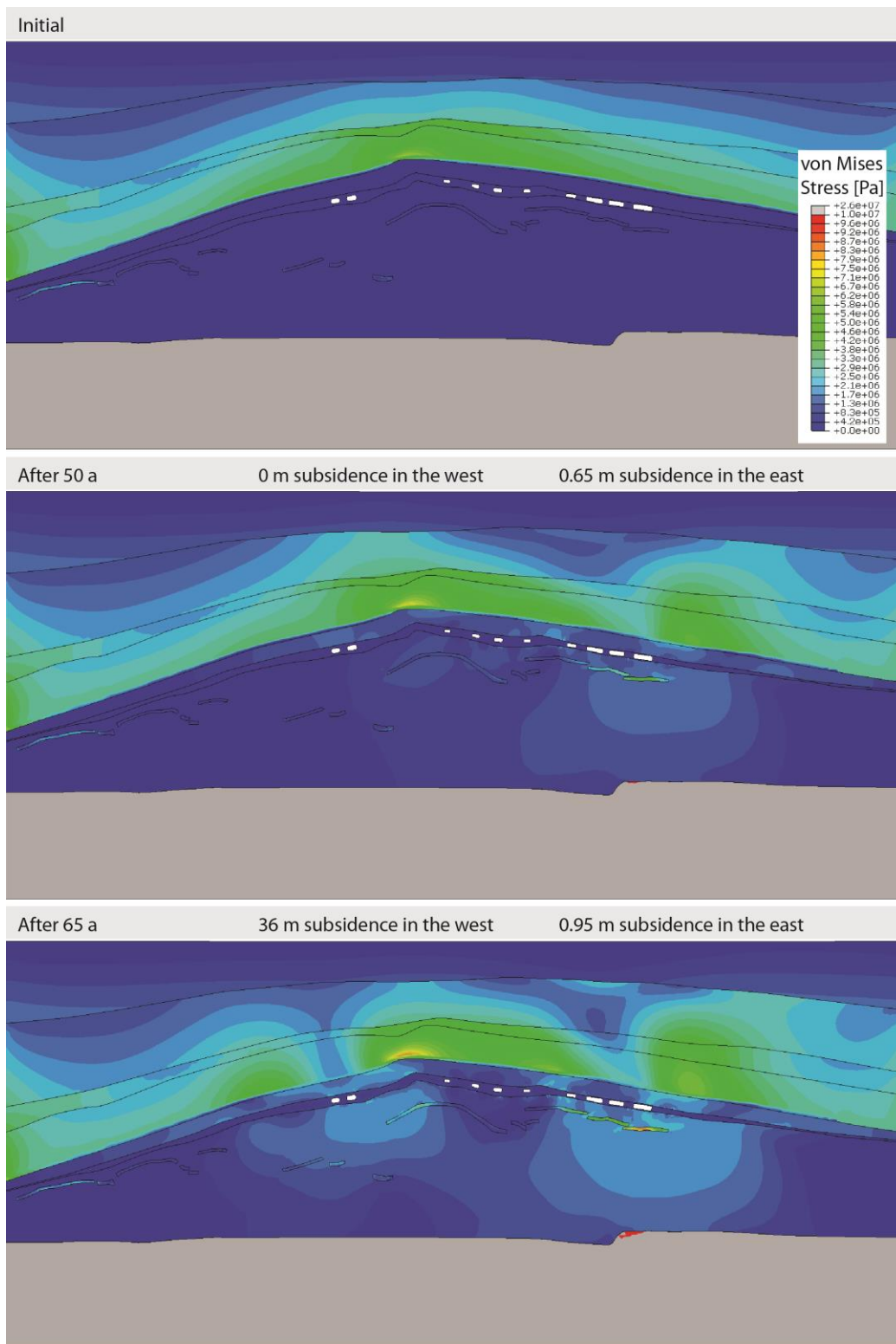


Fig. 4 – Von Mises spanning (schuifspanning) in het model. Boven: initiële geologisch stabiele situatie (de spanningen compenseren de opwaartse kracht van het Veendamse kussen); midden: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste cavernecoluster; onder: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste en tweede cavernecoluster. Let op de algehele afname van schuifspanning boven de squeeze mining cavernecolusters.

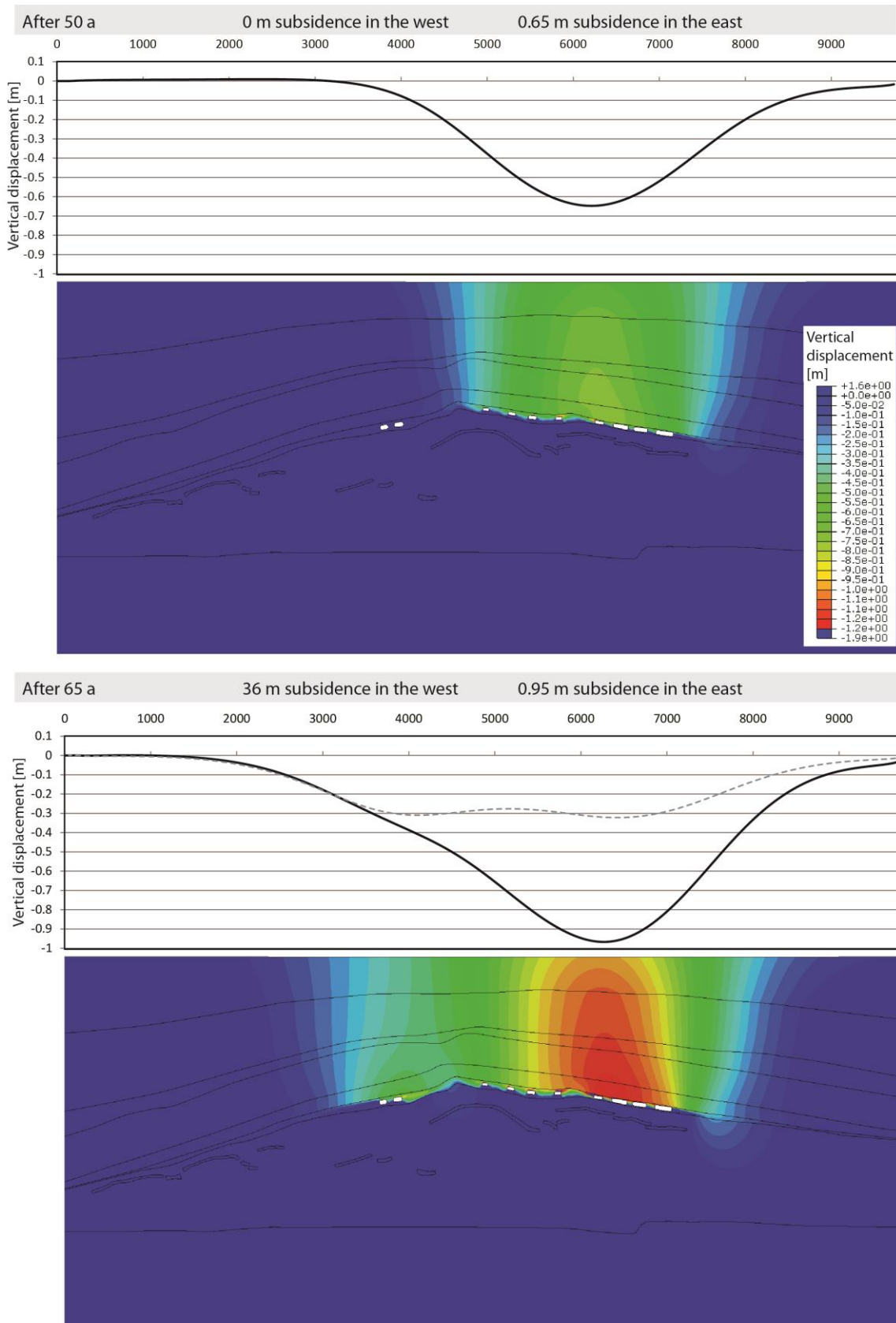


Fig. 5 – Verticale verschuiving en bodemdaling in het model. Boven: initiële geologisch stabiele situatie; midden: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste cavernecoluster; onder: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste en tweede cavernecoluster. De stippellijn toont de extra bodemdaling (50 tot 65a). Let op de interactie van de twee bodemdalingsprofielen in dit plane strain model. Merk op dat de extreme waarden in de kleurenlegenda verwijzen naar verplaatsingen van een paar knooppunten aan de randen van de cavernes.

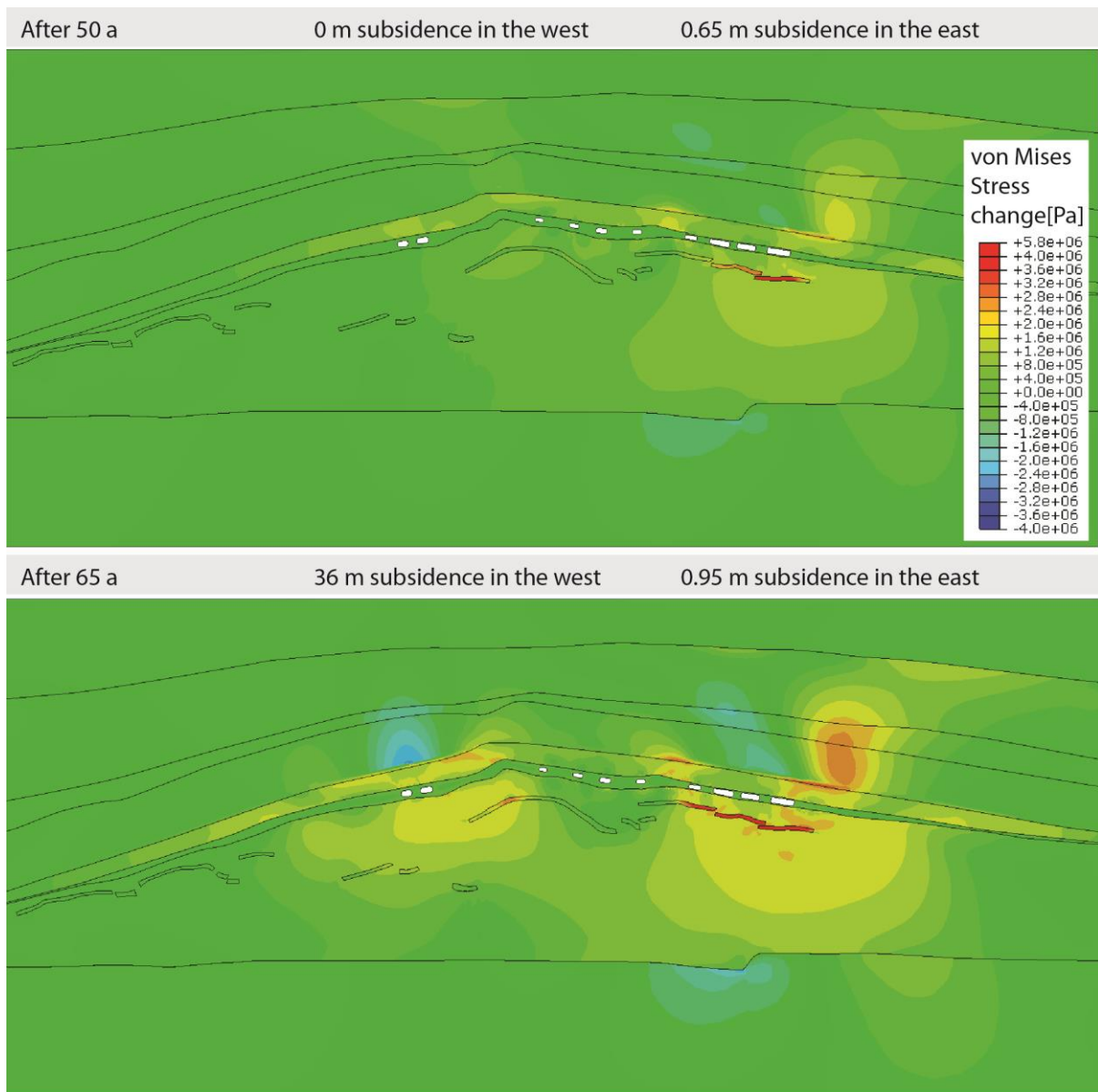


Fig. 6 – Verandering in de Von Mises-spanning (schuifspanning) in het model ten opzichte van het initiële geologisch stabiele model. Boven: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste caverneccluster; onder: na squeeze mining en bodemdaling in het eerste en tweede caverneccluster. Let op de algemene daling in schuifspanning in de aardlagen boven het zout boven de cavernecclusters.

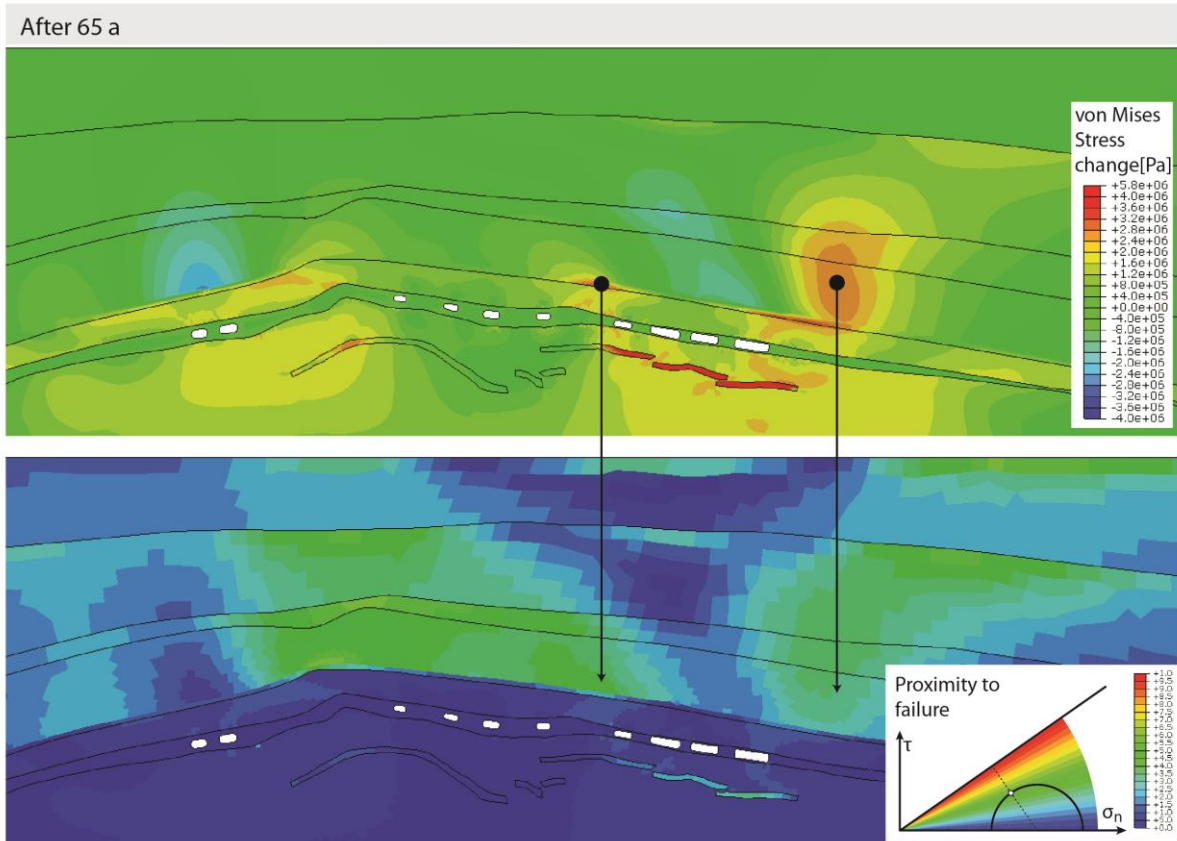


Fig. 7 – Contourplot van verandering in Von Mises-spanning (schuifspanning, net als in fig. 6) in het model ten opzichte van het initiële geologisch stabiele model, laatste stadium. De onderste grafiek laat de nabijheid tot het criterium voor breuk-reactivering zien. De stippen laten specifieke locaties in beide diagrammen zien.

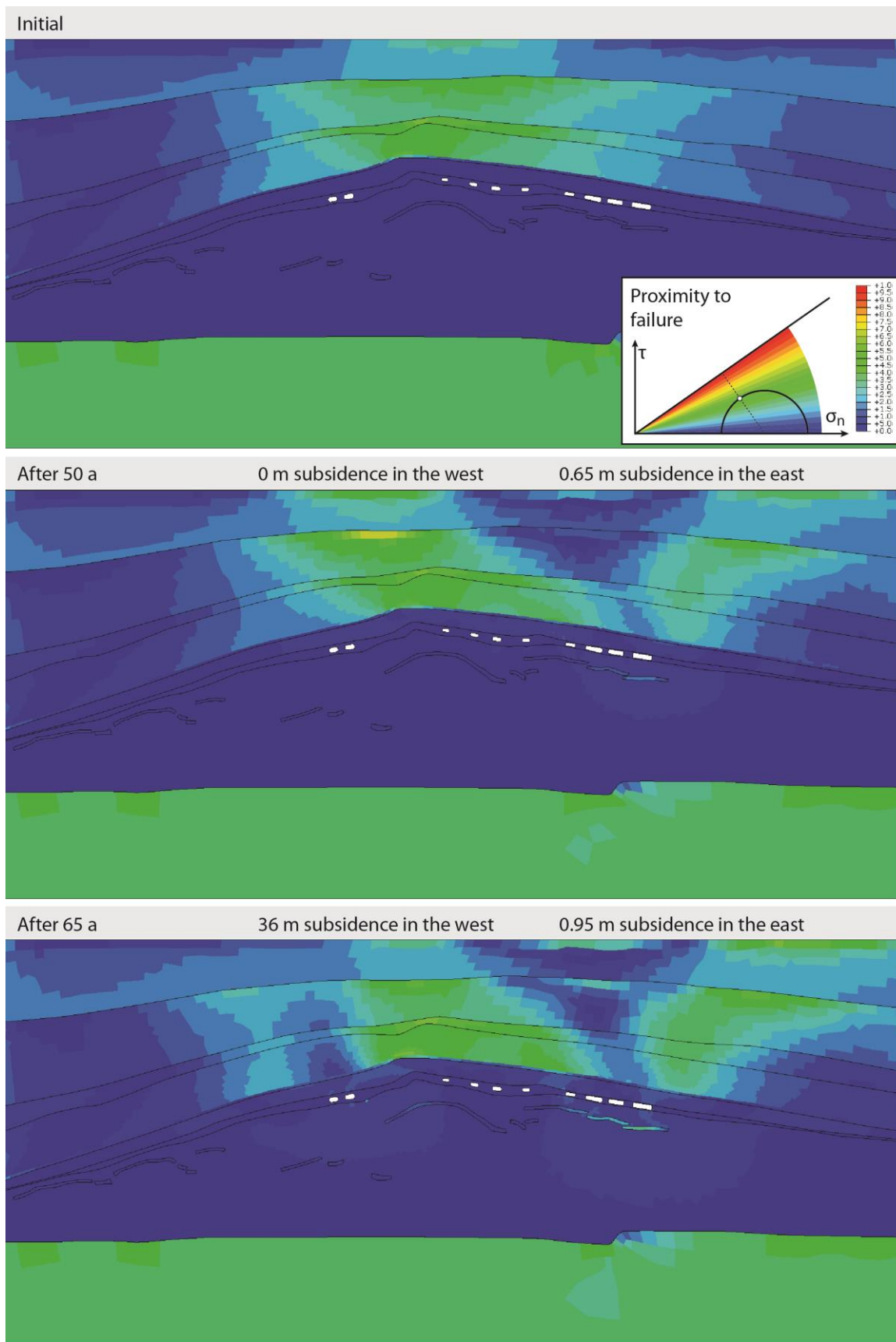


Fig. 8 – De ontwikkeling van de nabijheid tot het criterium voor breuk-reactivering. Plot is voor de rest hetzelfde als Fig. 7.

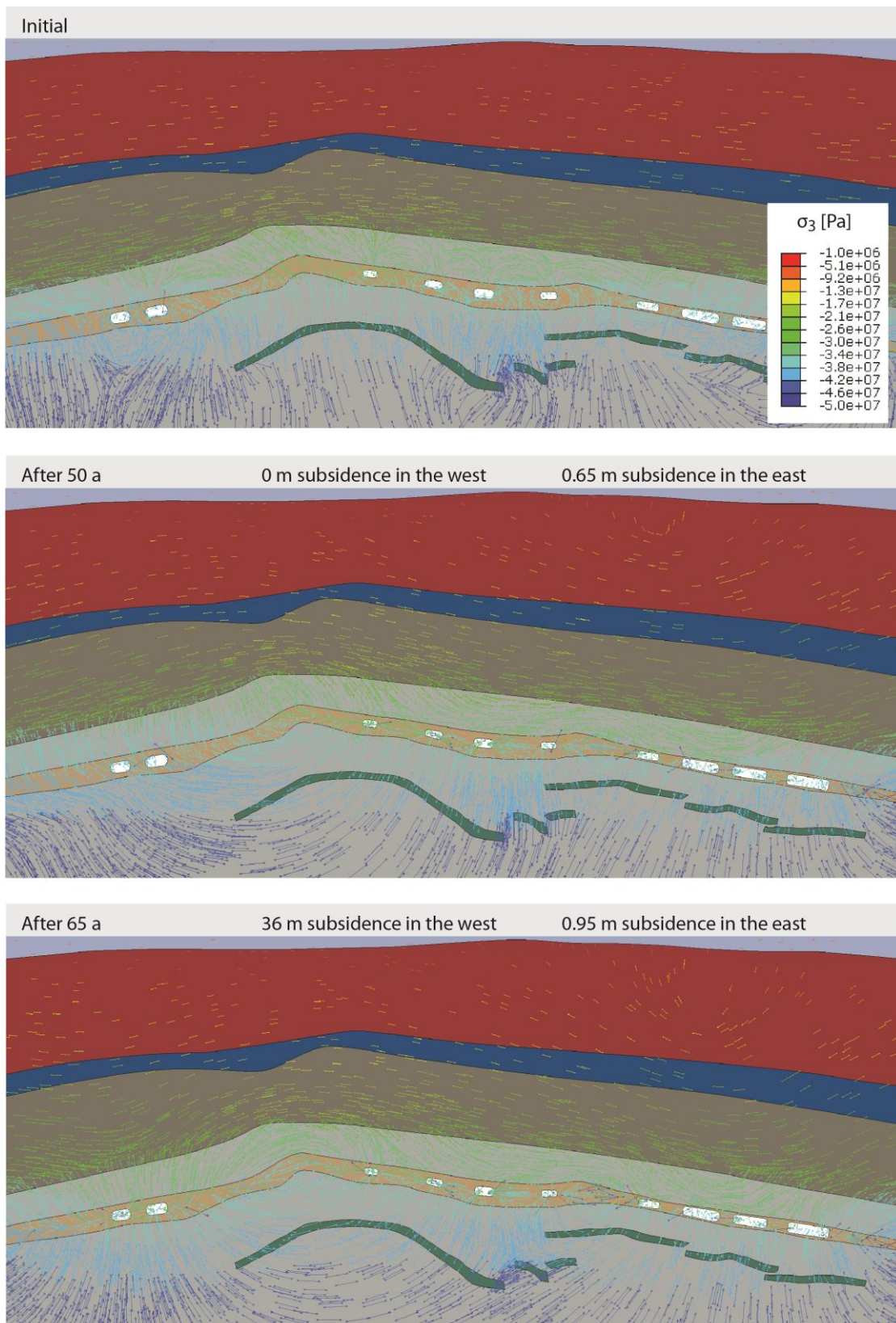


Fig. 9 – Vector plots van de minimale hoofdspansing die grootte en richting tonen in de initiële situatie en in de situatie na squeeze mining.

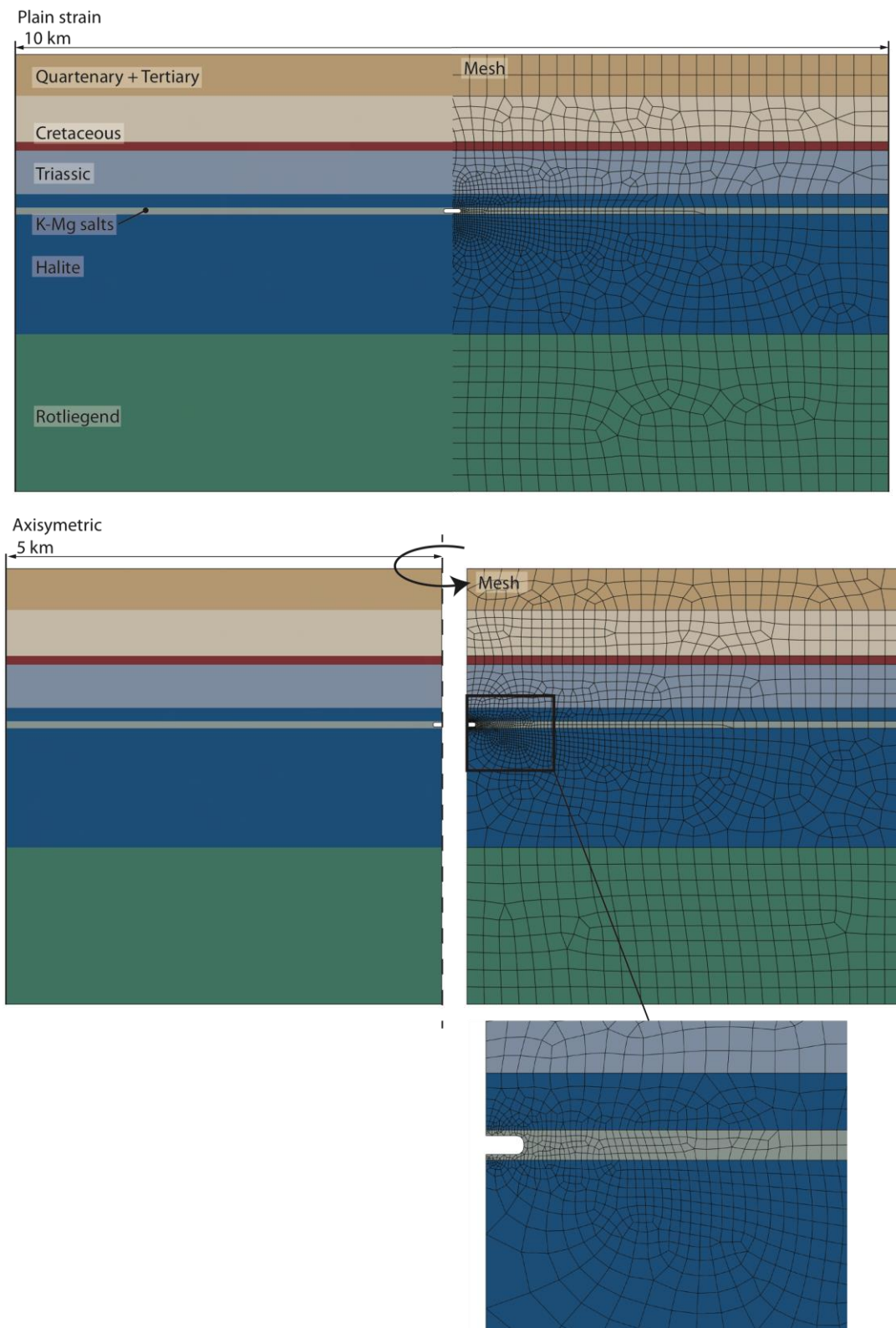


Fig. 10 – De twee modellen die zijn gebruikt om het verschil tussen plane strain en axisymmetrische modellen (enkele caveerne) te verkennen. Het eindige-elementenrooster, de diverse materiaalgroepen en de cavernes zijn te zien.

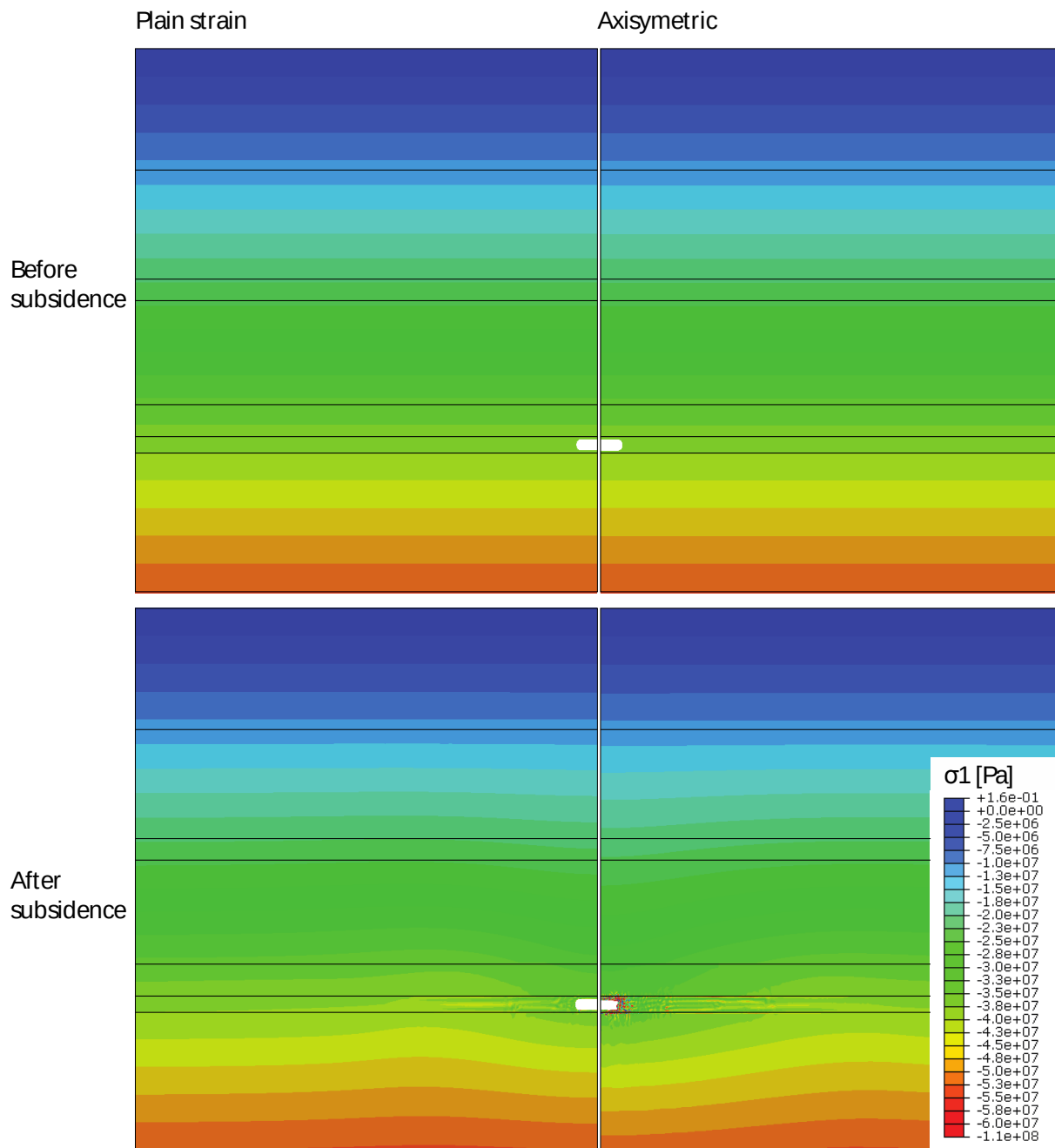


Fig. 11 – Een vergelijking van de maximale hoofdspinning tussen axisymmetrische en plane strain modellen, voor en na squeeze mining. Merk op dat ABAQUS compressiespanningen als negatief weergeeft.

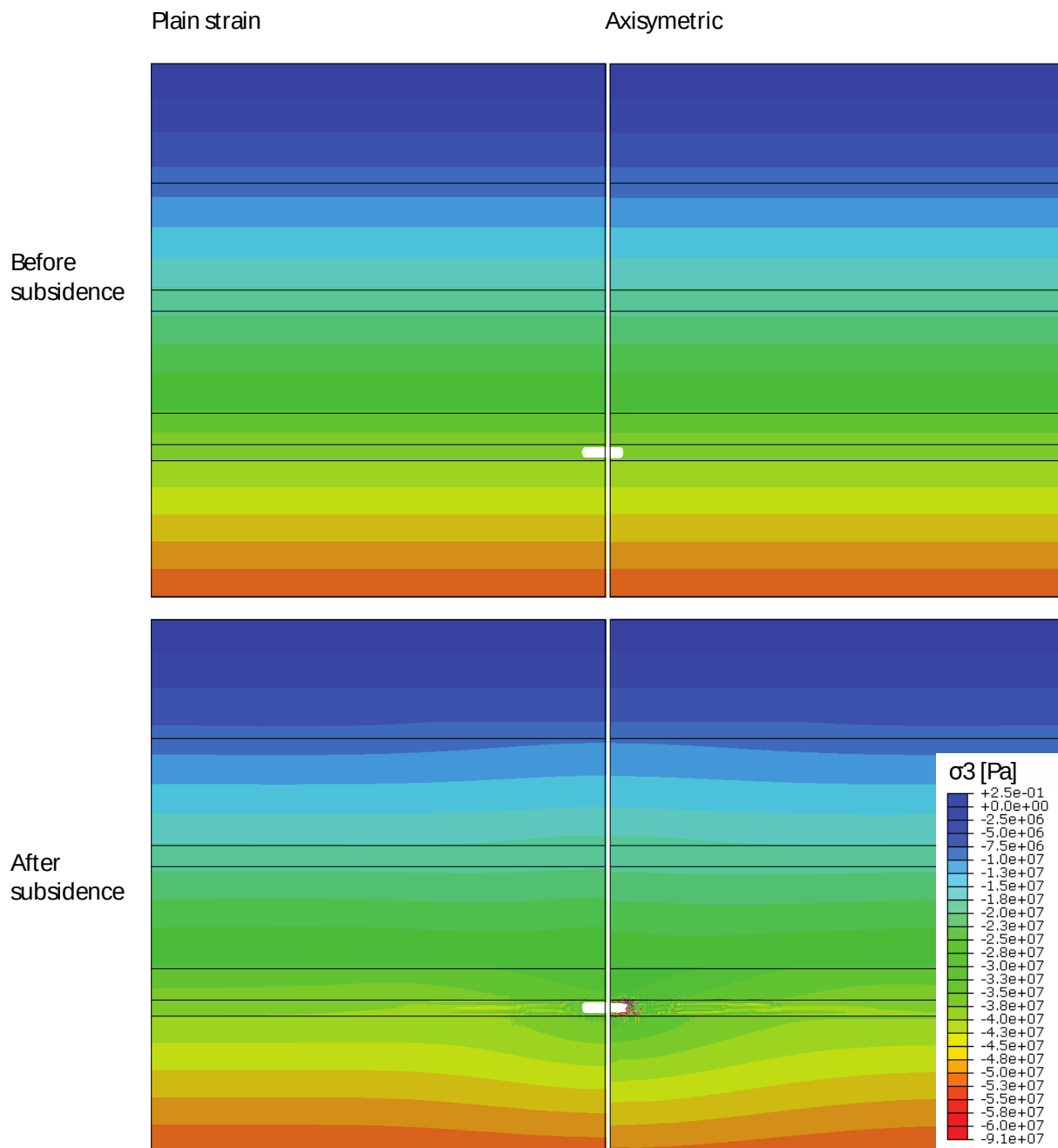
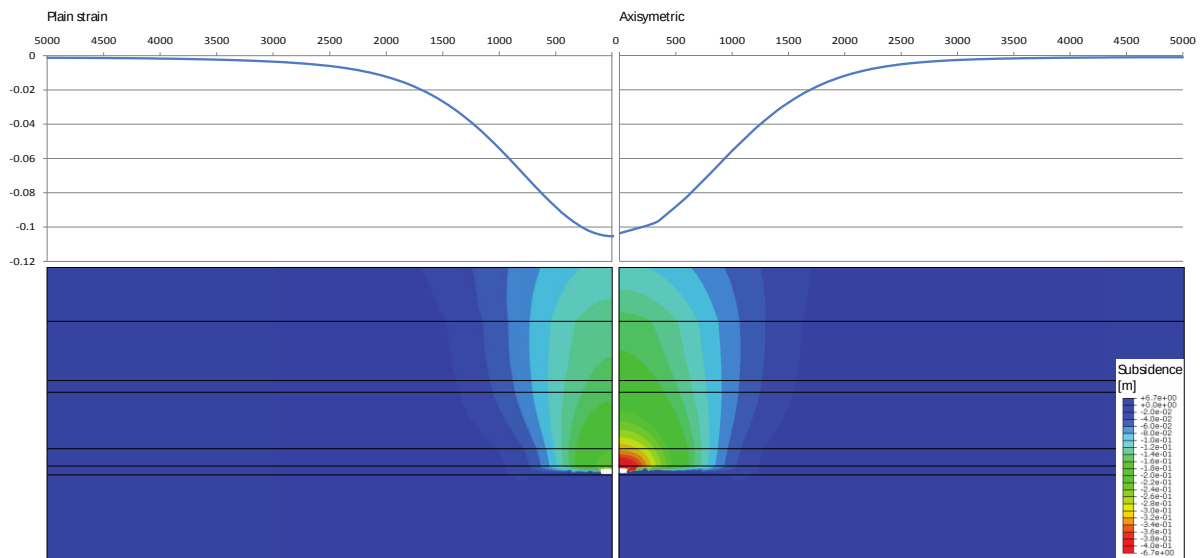


Fig. 12 – Een vergelijking van de minimale hoofdspansing tussen axisymmetrische en plane strain modellen, voor en na squeeze mining. Merk op dat ABAQUS compressiespanningen als negatief weergeeft.



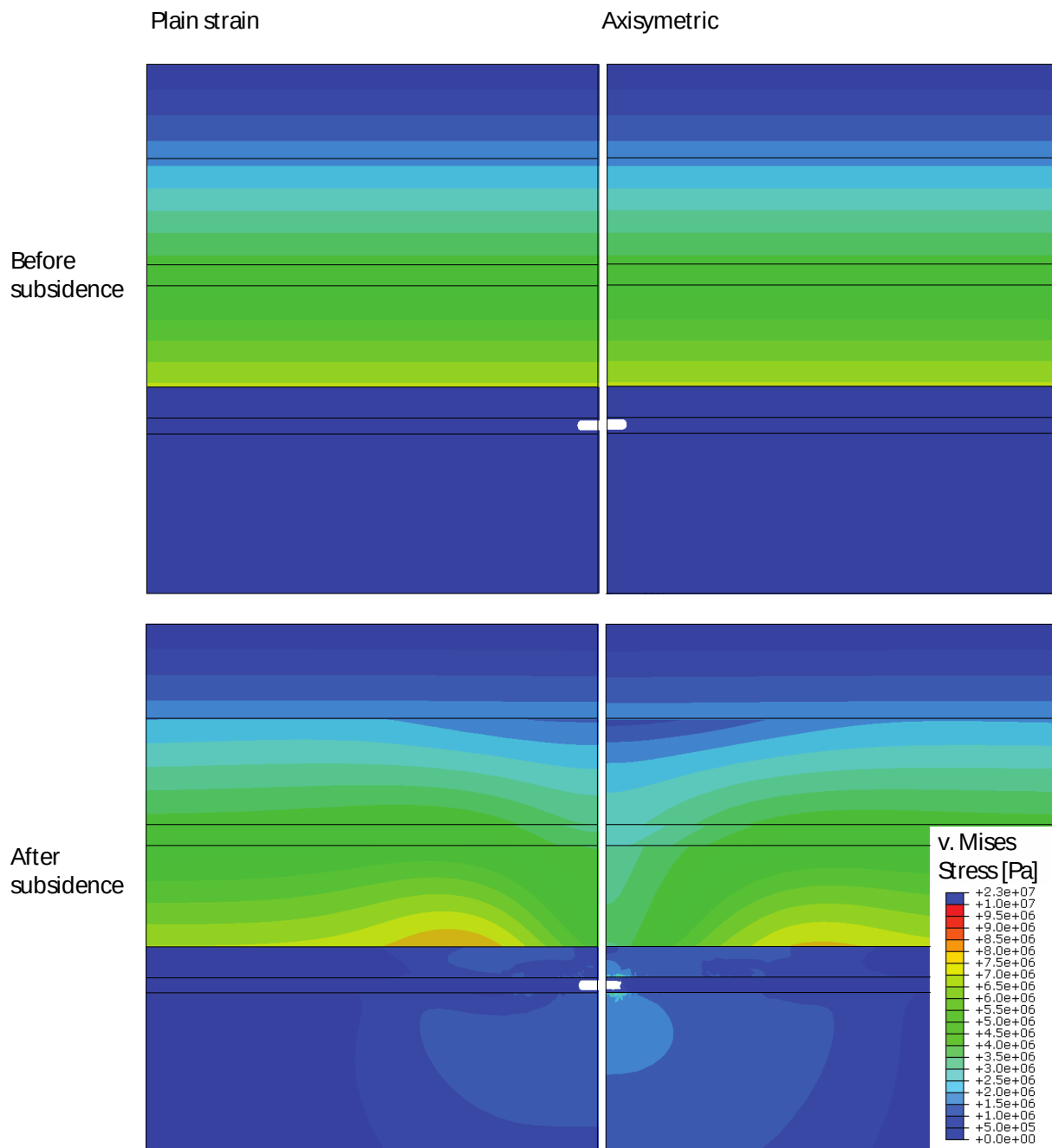


Fig. 14 – Een vergelijking van Von Mises-spanning voor en na squeeze mining tussen axisymmetrische en plane strain modellen.

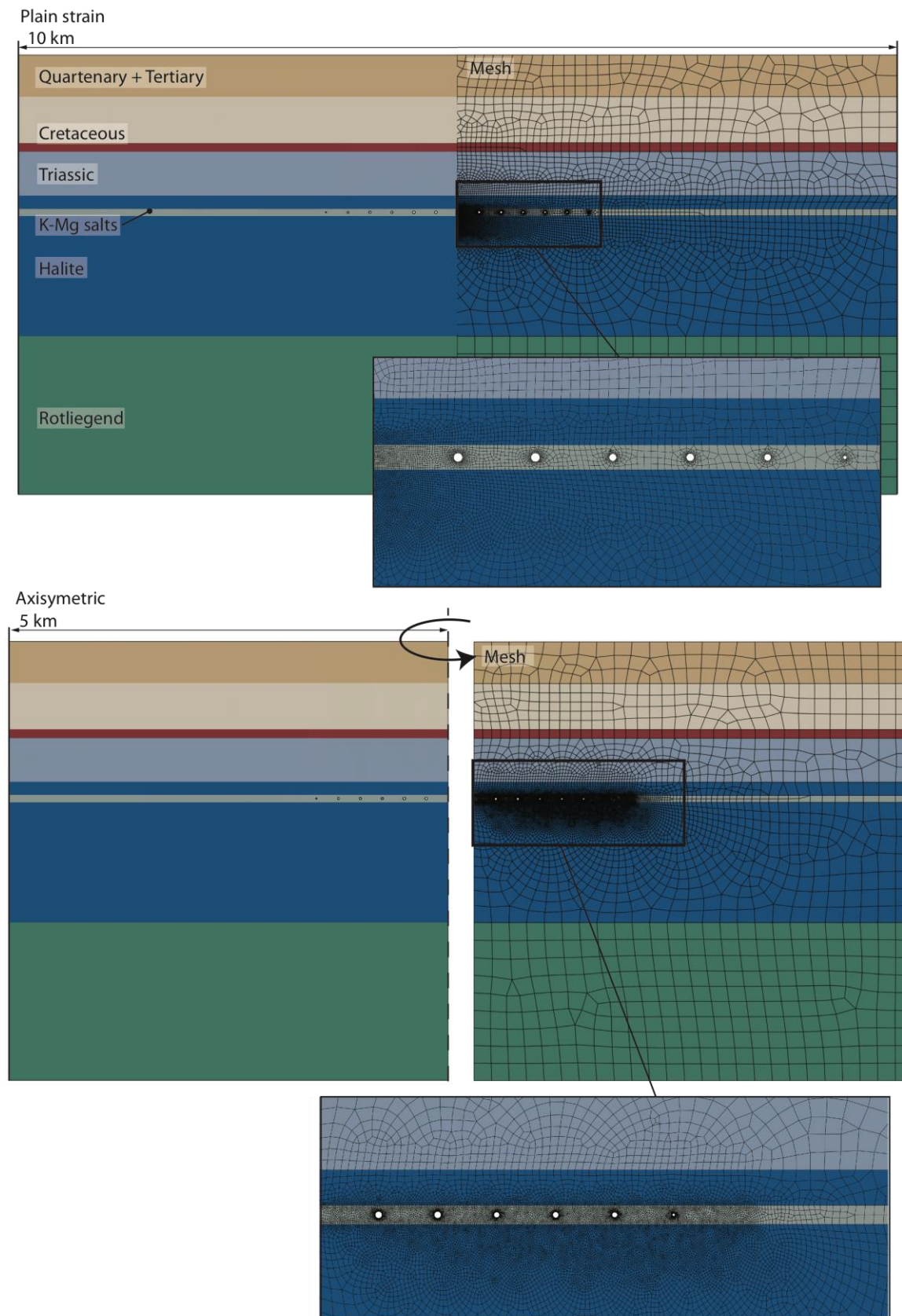


Fig. 15 – De twee modellen die zijn gebruikt om de verschillen tussen plane strain en axisymmetrische modellen (meerdere cavernes) te verkennen. Te zien zijn het eindige-elementenrooster, de materiaalgroepen, en de cavernes.

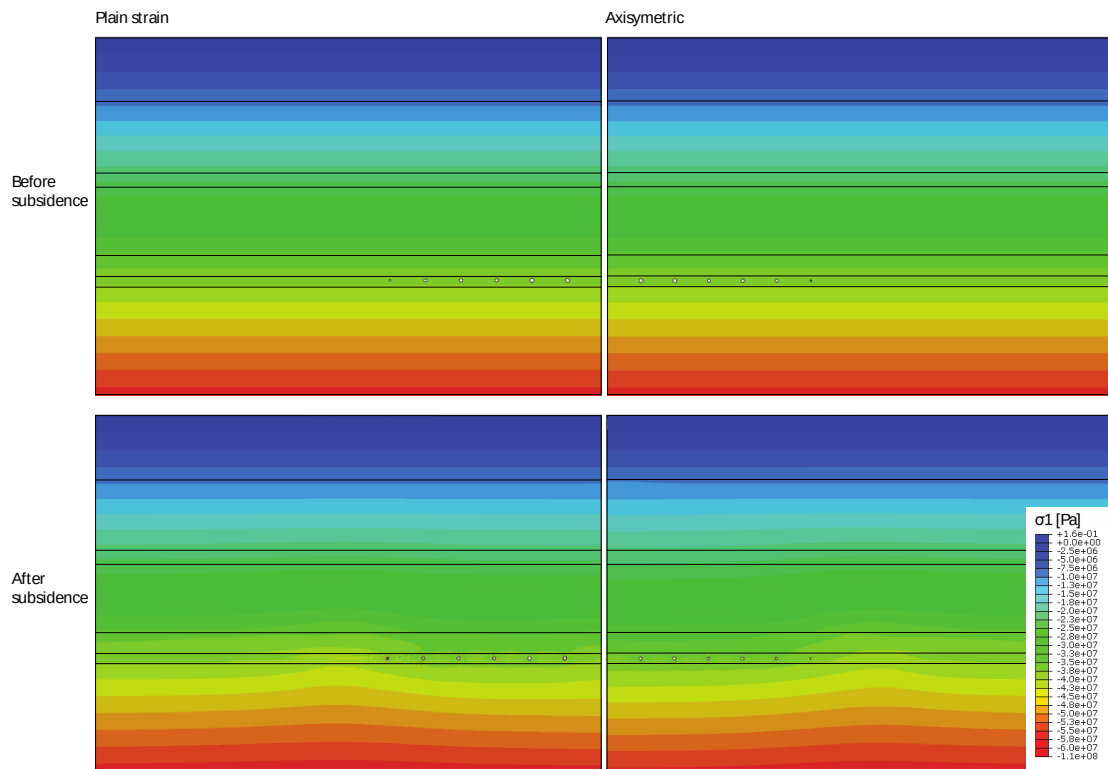


Fig. 16 – Een vergelijking van de maximale hoofdspanning tussen axisymmetrische en plane strain-modellen, voor en na squeeze mining. Merk op dat ABAQUS compressiespanningen als negatief weergeeft.

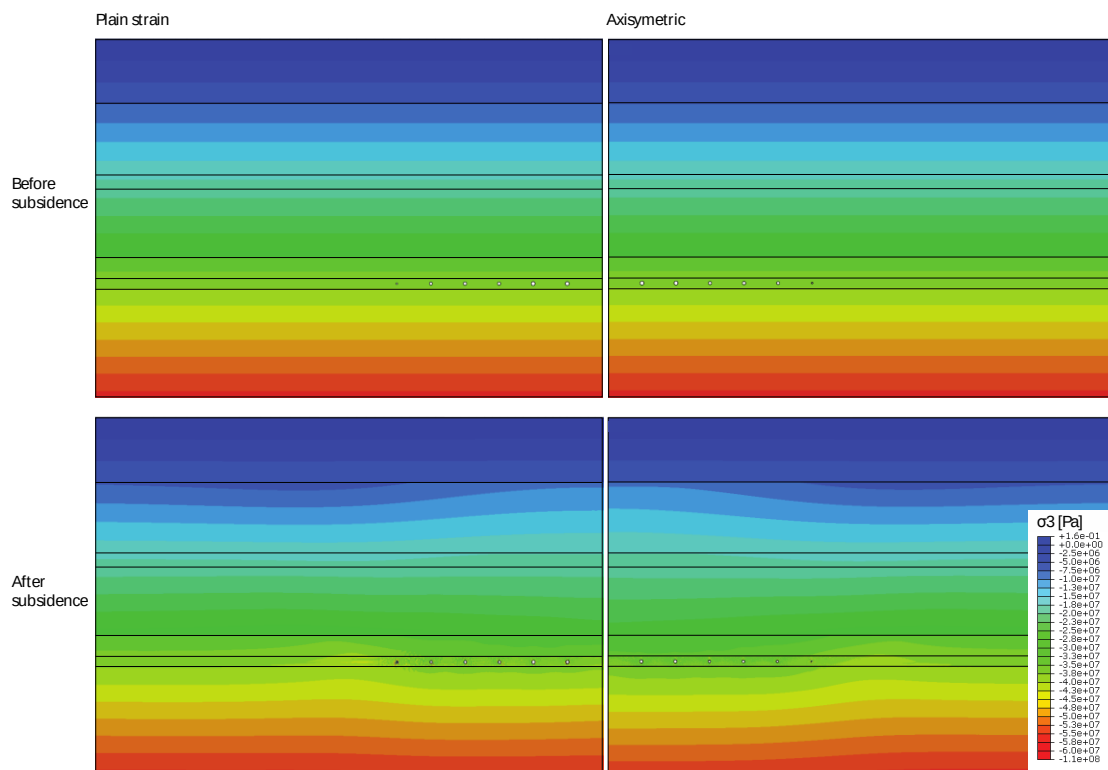


Fig. 17 – Een vergelijking van de minimale hoofdspanning tussen axisymmetrische en plane strain-modellen, voor en na squeeze mining. Merk op dat ABAQUS compressiespanningen als negatief weergeeft.

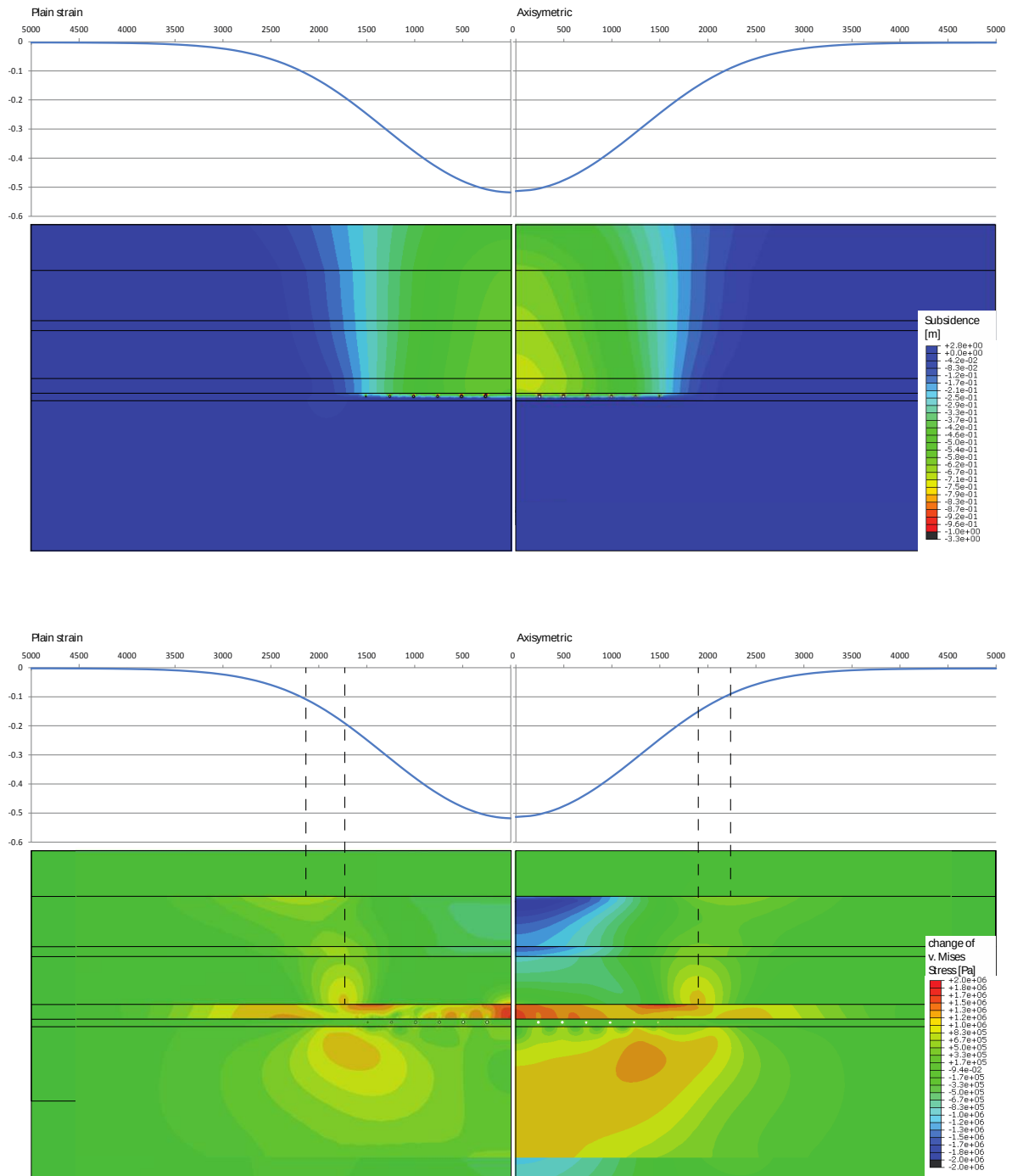


Fig. 18 – Een vergelijking van verticale verschuiving, bodemdalingprofielen, en verandering in Von Mises-spanning tussen axisymmetrische en plane strain modellen, na squeeze mining.

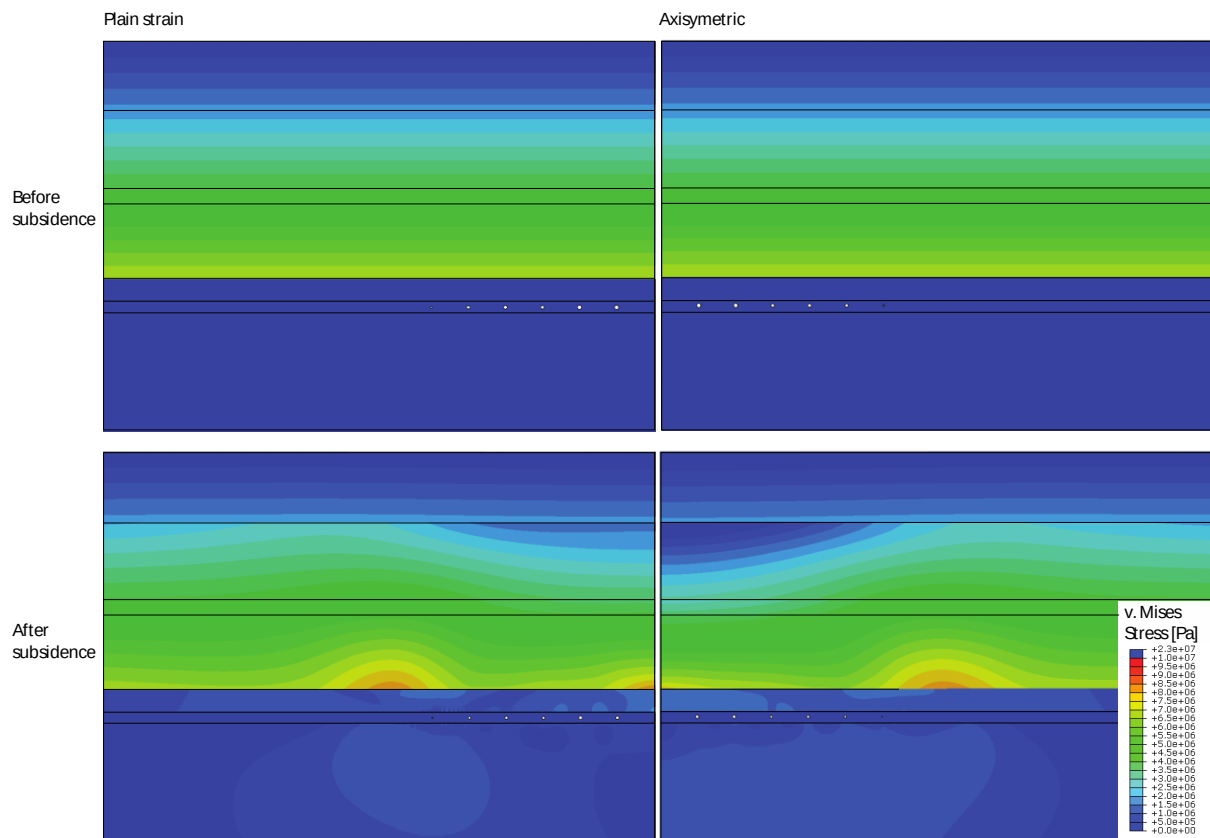


Fig. 19 – Een vergelijking van Von Mises-spanning tussen axisymmetrische en plane strain modellen, voor en na squeeze mining.

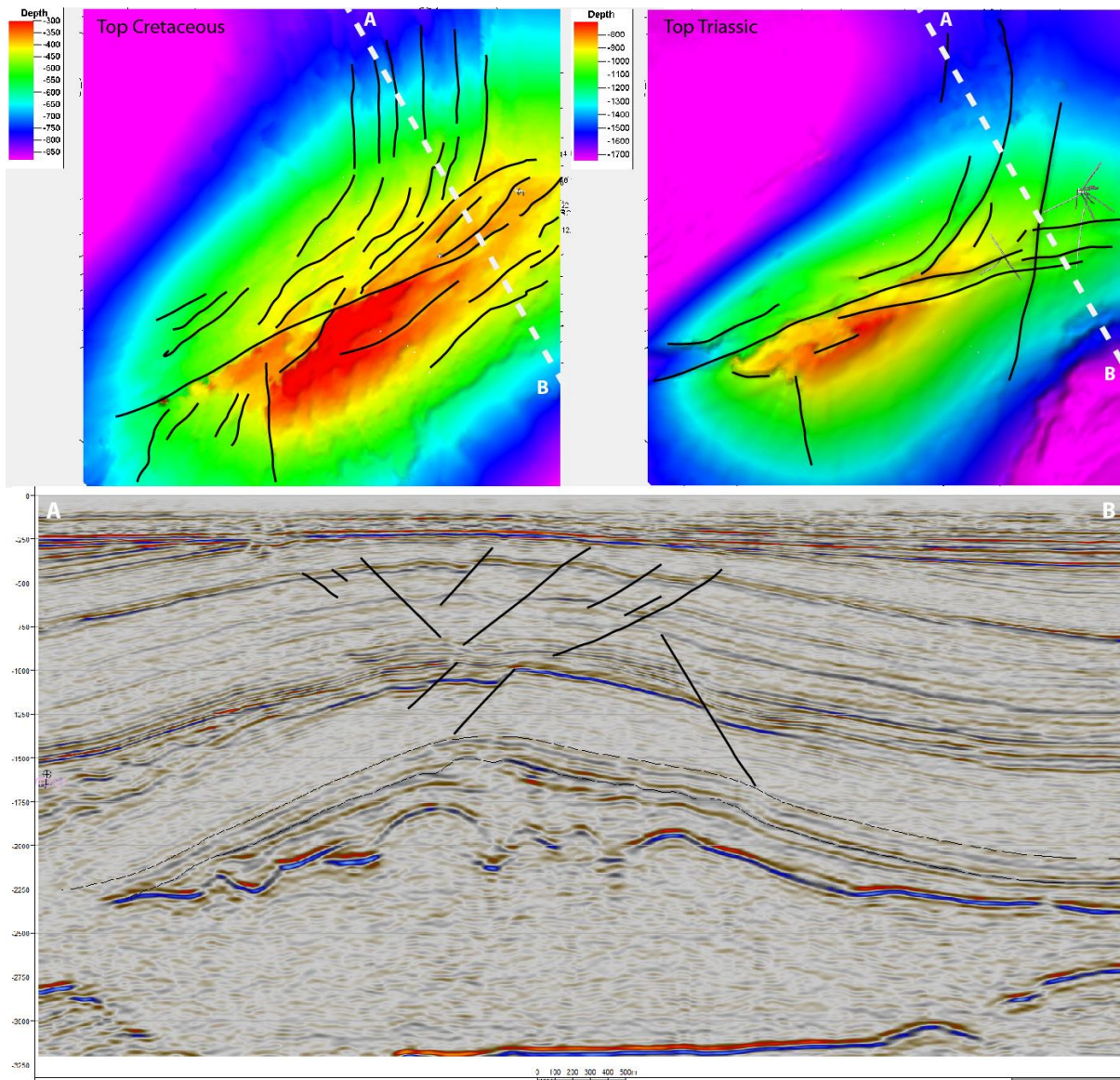


Fig. 20 – Boven: dieptekaarten van het Boven Krijt en Boven Trias met breuken aangegeven in zwarte lijnen. Onder: Profiel A-B (verticale = horizontale schaal) dat de normale breuken boven de cavernevelden laat zien (uit: Raith en Urai [2017], Spanningsveranderingen veroorzaakt door squeeze mining in de geologisch gebroken aardlagen boven het zout van het Veendammer zoutkussen, NEDMAG rapport).

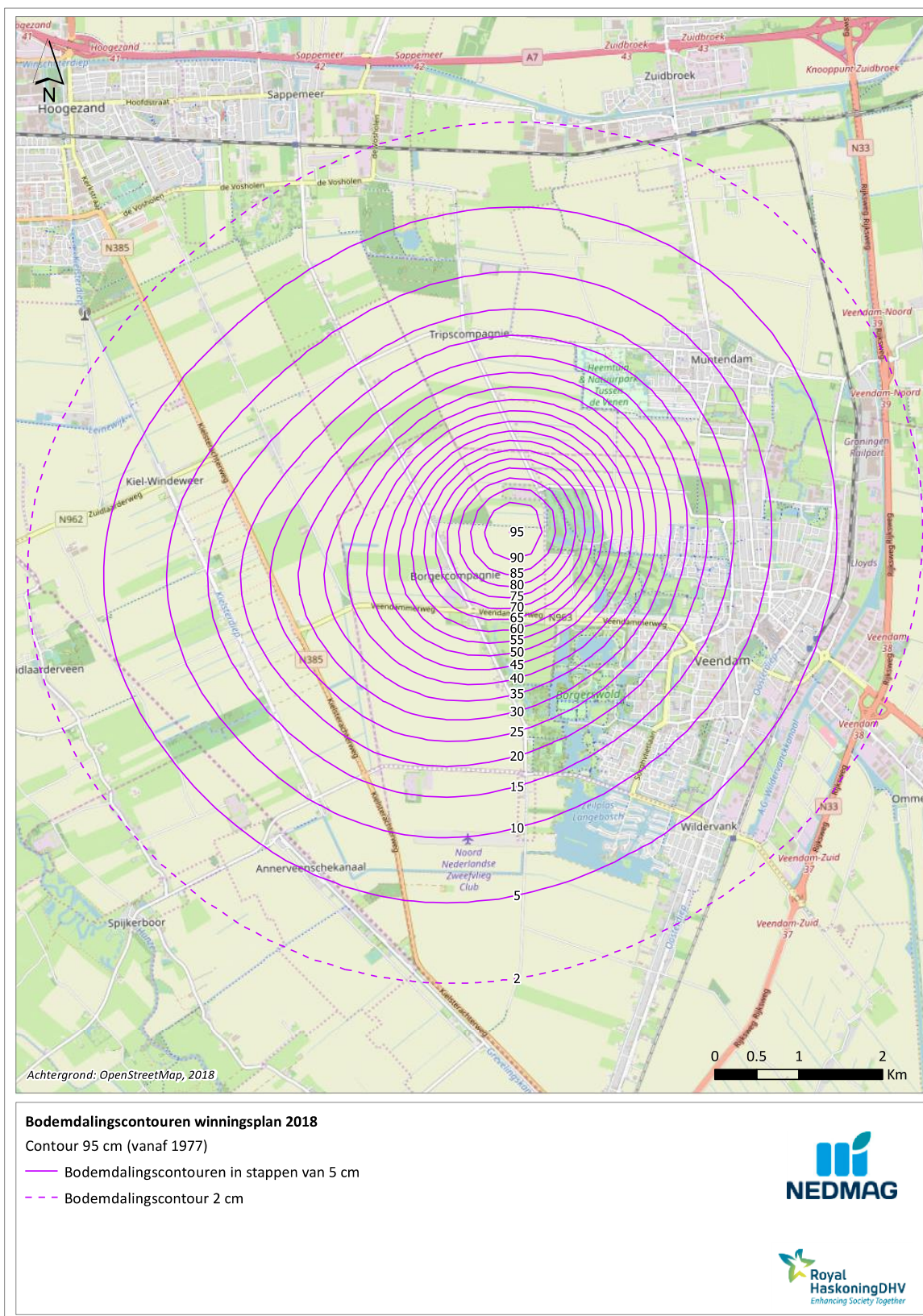


Fig. 21 – Nedmags hoogste prognose van bodemdaling voor het Winningsplan 2018.

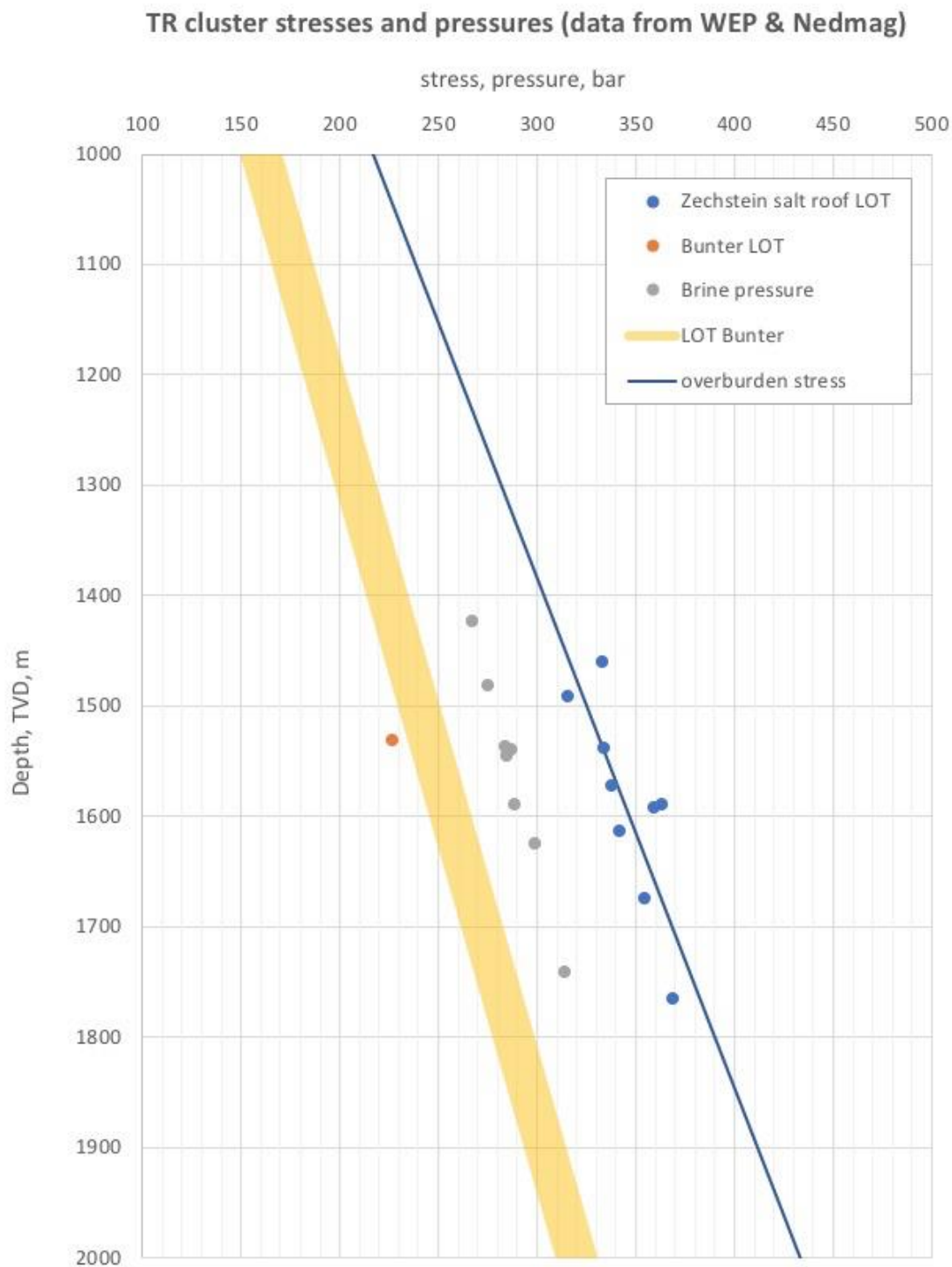


Fig. 22 – Plot van bestaande spannings- en drukdata van de Veendammer en Tripscompagnie putten, plus twee LOT metingen (een ervan ligt onder het bereik van deze grafiek) van het Buntsandstein in offset wells. De trend van Zechsteinzout LOT (voor het begin van de mijnbouw) illustreert ook de trend van de aardlagen boven het zout, en de dikke lijn voor het Buntsandstein illustreert de onzekerheid in de spanning in die aardlagen. De cavernedrukken (voor de gebeurtenis van 20 april 2018) waren ongeveer 4 MPa onder de initiële LOT van de steenzouten deklaag.

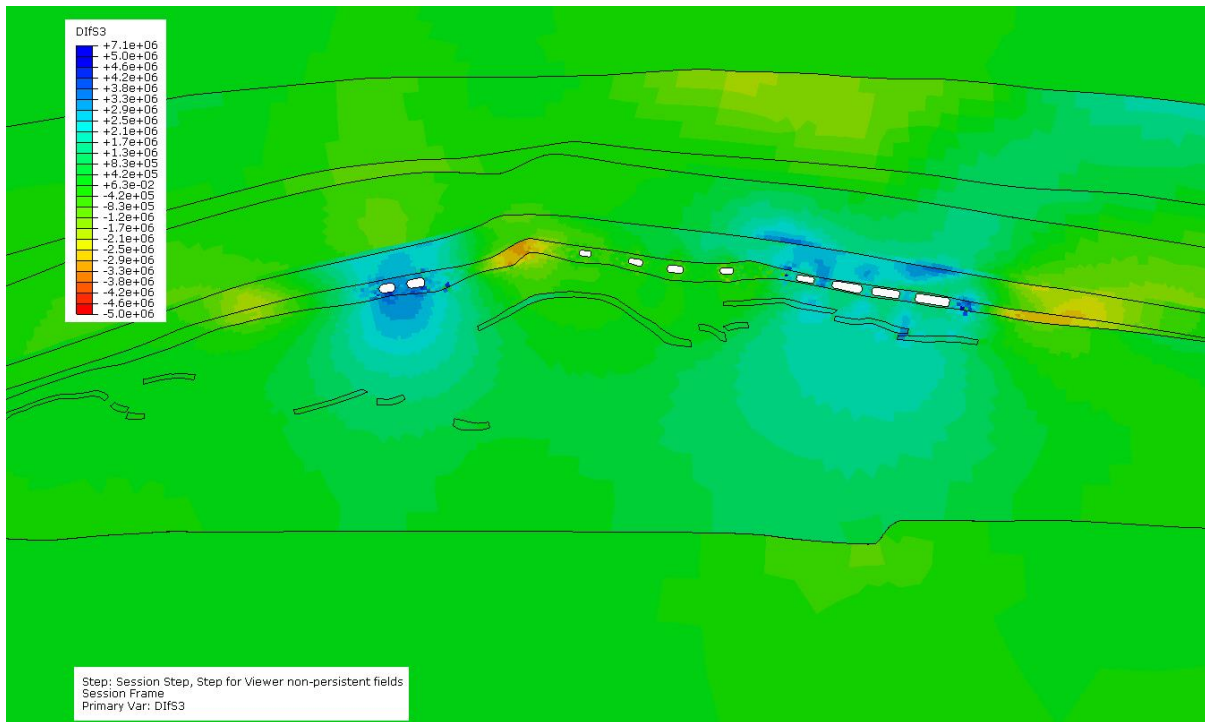


Fig. 23 – Veranderingen in minimale hoofdspanning tussen de initiële staat en na 65 jaar, met een focus op de veranderingen in de steenzouten deklaag. Voor de oriëntatie van de minimale hoofdspanning, zie fig. 9. Het is zichtbaar dat de minimale hoofddruk boven de cavernes lokaal afneemt met ongeveer 4 MPa, waardoor deze de druk in de cavernes benadert (vergelijk met fig. 22).

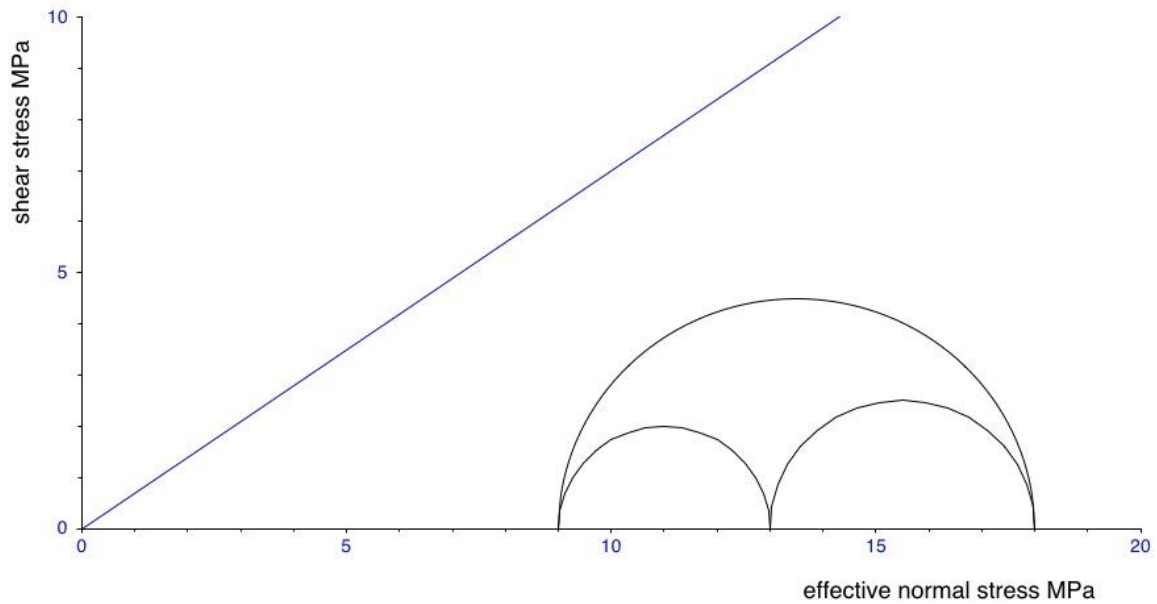


Fig. 24 – Een illustratie van de 3D effectieve spanningssituatie in het Buntsandstein op 1500 m diepte, in het geval van een intacte steenzouten deklaag. Waardes zijn gebaseerd op de data van fig. 3 en fig. 22 en poriëndruk met $SG = 1.0$. Voor de tussengelegen hoofdspanning hebben we een waarde aangenomen die ongeveer halverwege tussen de grootste en de kleinste hoofdspanning ligt.

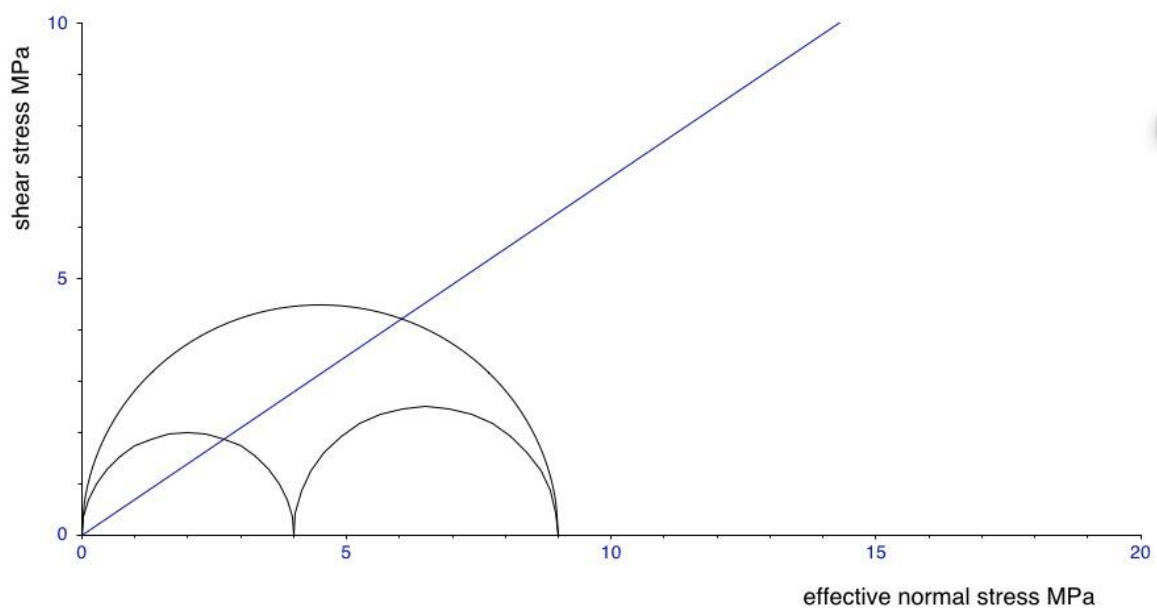


Fig. 25 – Een illustratie van de 3D effectieve spanningssituatie in het Buntsandstein op 1500 m diepte, in het geval van een lekkende steenzouten deklaag en een daarmee corresponderende toename van poriëndruk tot waardes die gelijk zijn aan de laagste hoofdspanning. Breuken die cohesieloos zijn en zo georiënteerd zijn dat voldaan wordt aan het criterium kunnen gereactiveerd worden.