

**Geotechnische toelichting
bij
Aanvraag wijziging instemmingsbesluit 2012
van
Actualisering winningsplan voor
winningsvergunning 'Barradeel II'**



Vorbereiding: Well Engineering Partners,
Hoogeveen

Auteur:

Versie: 1 (definitief)

Publicatiedatum: 12 maart 2018

Goedkeuring:



Inhoud

1	Aanleiding tot aanvraag wijziging Instemmingsbesluit 2012	3
2	Bodembewegingen	3
2.1	Eindprognose bodemdaling door zoutwinning	3
2.2	Bodemtrillingen	4
2.3	Maatregelen om schade door bodembeweging te voorkomen.....	4
3	Stabiliteit cavernedaken bij groter eindvolume	4
3.1	Analytische berekeningen.....	4
3.2	Numerieke DIANA modellering (bijdrage dr.ir. P.A. Fokker).....	5
4	Processen in de ondergrond na buitengebruikstelling cavernes	6
4.1	Geomechanische en hydraulische processen in diepe ondergrond.....	7
4.2	Conversie van halietpekkel naar carnallietpekkel.....	8
4.3	Doelmatigheid Bontzandsteen als bergingszone	8
4.4	Uitbreiding bergingszone naar Vlieland zandsteen.....	10
4.5	Tijdschaal pekelmigratie door Zechstein zoutformatie	11
4.5.1	Thermische effecten in cavernes BAS-2 en BAS-3	11
4.5.2	Thermische effecten in cavernes BAS-3-O en BAS-4	12
5	Gebalanceerd pekelpermeatiemodel	13
6	Bodemdaling na buitengebruikstelling cavernes.....	15
7	Onafhankelijke beoordeling van modellering pekelpermeatie	16
8	Samenvattende conclusies.....	17
9	Referenties.....	17
	Bijlage 1: Recentste prognose bodemdaling door zoutproductie (per 31 december 2021).....	19
	Bijlage 2: Minimaal voor cavernestabiliteit vereiste zoutdakdikte.....	20
	Bijlage 3: Stratigrafie van Zechstein zoutpakket in Barradeel II winningsgebied.....	21
	Bijlage 4: Stratigrafie van Zechstein deklagen in Barradeel en Barradeel II winningsvergunningen	22
	Bijlage 5: Volledige stratigrafie in de omgeving van de cavernes BAS-3 en BAS-3-O	23
	Bijlage 6: Ontwikkeling pekelt temperatuur in cavernes BAS-2 en BAS-3 na insluiting	24
	Bijlage 7: Pekelinfiltratiezones cavernes BAS-2 en BAS-3 volgens TUC model	25
	Bijlage 8: Infiltratiezone TUC model na pekeldoorbraak als functie van de temperatuurkloof	26
	Bijlage 9: Ontwikkeling pekeldruk en permeatie na afsluiting caveerne BAS-3.....	27
	Bijlage 10: Tijdsverloop pekelpermeatie en bodemdaling caveerne BAS-3.....	28
	Bijlage 11: Criteria voor zoutpermeabiliteit als functie van σ_{eff}	29
	Bijlage 12: Officiële prognose bodemdaling Frisia op 31 december 2021	30
	Bijlage 13: Berekeningen DIANA eindige elementen modellering	31

1 Aanleiding tot aanvraag wijziging Instemmingsbesluit 2012

De nu voorliggende aanvraag betreft een wijziging van het Besluit van 2 januari 2012 met kenmerk ETM/EM/11175957 van de Minister van Economische Zaken (Instemmingsbesluit MinEZ 2012), waarin met betrekking tot het winningsplan Barradeel II de oorspronkelijke voorschriften uit het Besluit van 28 juni 2004 met kenmerk ME/EP/UM/4031464 zijn geactualiseerd. De instemming met het in 2012 geactualiseerde winningsplan eindigt op uiterlijk 31 december 2021.

De door Frisia gevraagde wijziging van het Instemmingsbesluit 2012 betreft twee aanvullingen op het besluit:

1. Vergroting van het openstaande eindvolume van de cavernes BAS-3-O en BAS-4 tot maximaal 1,5 miljoen m³ bij definitieve buitengebruikstelling
2. Toepassing van een ander type injectiepompen met debiet-onafhankelijke drukopbouw om de druk in de cavernes onder alle operationele omstandigheden stabiel en hoog te houden.

Vanuit het oogpunt van mijnbouwregelgeving heeft de aanvraag betrekking op de volgende geotechnische voorschriften uit het Mijnbouwbesluit (Mbb) over een winningsplan voor zout:

- Artikel 24, lid 1, sub m tot en met s (bodemdaling, bodemtrillingen, schade door bodembeweging, maatregelen tegen bodembeweging en om schade te beperken)
- Artikel 25, lid 1, sub a, c, d en f (structuur zoutlaag en bovenliggende aardlagen, stabiliteit en buitengebruikstelling holruimten).

2 Bodembewegingen

Dit hoofdstuk behandelt de voorschriften van Artikel 24, lid 1, sub m en sub p tot en met s, Mbb.

2.1 Eindprognose bodemdaling door zoutwinning

In het Besluit van 2 januari 2012 heeft MinEZ in artikel 1 het volgende bepaald. Overlopende bodemdaling uit het gebied van de winningsvergunning Barradeel telt mee voor het bereiken van de bodemdalinglimiet van 30 cm in Barradeel II, waarbij echter alleen de samengestelde bodemdaling boven de cavernes BAS-3 en BAS-4 maatgevend is. Omgekeerd mag overlopende bodemdaling uit de winningsvergunning Barradeel II niet op enige plaats in het gebied van de winningsvergunning Barradeel leiden tot een overschrijding van de bodemdalinglimiet van 35 cm.

De kaart in bijlage 1 toont de verwachte eindsituatie van de maximale bodemdaling op 31 december 2021, als gevolg van zoutwinning uit 5 cavernes, namelijk BAS-1, 2, 3, 3-O(riginal) en 4.

In Tabel 1 zijn de gegevens met betrekking tot de bodemdalingsprognose samengevat.

Prognose 2021 op basis van WP2015 parameters/ Status oktober 2015.							
Caverne	x ₀ (RD)	y ₀ (RD)	gamma	delta	W _{max} (mm)	Berekend komvolume (m ³)	Achtergelaten open caverne volume (m ³)
BAS-1&2	160.783	580.026	4,30E-07	1,951	333,7	3.557.632	676.320
Totaal Barradeel						3.557.632	676.320
BAS-3	163.041	581.188	4,30E-07	2,006	116,9	816.403	475.000
B3 original	163.477	581.542	4,30E-07	1,985	145,0	1.187.240	1.500.000
BAS-4	166.418	582.017	4,30E-07	1,985	294,5	2.409.351	1.500.000
Totaal Barradeel 2						4.412.995	3.475.000
Totaal Barradeel & Barradeel 2						7.970.628	4.151.320

Tabel 1. Bodemdalingsprognose 2021 (peildatum okt-2015). Toegepaste parameters uit WP2015 analyse, en geactualiseerde open eindvolumes van de cavernes.

De W_{\max} waarden van de cavernes BAS-1, 2 en 3 komen uit de WP2015 analyse (ref.1) en liggen voor de toekomst ongeveer vast. De W_{\max} van cavernes BAS-3-O en BAS-4 zijn zodanig gekozen, dat de cumulatieve bodemdaling eind 2021 binnen de gestelde bodemdalingslimieten blijft. De uiteindelijke maximum daling in het winningsgebied Barradeel bedraagt 34,4 cm op de positie (x,y) = (160 800, 580.000). In het winningsgebied Barradeel II bedraagt de cumulatieve daling 29,9 cm boven caverne BAS-3; 28,6 cm boven caverne BAS-3-O en 30,0 cm boven caverne BAS-4.

De begin november 2017 vastgestelde bodemdaling bedraagt maximaal 19,7 cm boven caverne BAS-3-O en maximaal 26,8 cm boven caverne BAS-4. Derhalve bedraagt tot 31 december 2021 de resterende dalingsmarge 8,9 cm (28,6-19,7) voor caverne BAS-3-O en 3,2 cm voor caverne BAS-4.

De open eindvolumes van de cavernes BAS-3-O en BAS-4 worden gemaximeerd op 1,5 miljoen m³. Met behulp van de nieuwe injectiepompen is het mogelijk onder alle productieomstandigheden (klein tot groot volume injectiewater per uur) de druk in de cavernes zodanig stabiel en hoog te houden, dat de caverneconvergentie verregaand wordt tegengehouden. Zo wordt voorkomen dat de zoutwinning uit caverne BAS-4 reeds begin 2019 gestopt zou moeten worden wegens het bereiken van de door MinEZ voorgeschreven dalingslimiet voor die caverne.

2.2 Bodemtrillingen

Tijdens de actieve zoutwinning door Frisia vanaf 1995 tot heden hebben zich in de vergunninggebieden Barradeel en Barradeel II geen door het KNMI geregistreerde bodemtrillingen voorgedaan (ref. Seismic & Acoustic Data Portal). Sinds 2010 heeft het KNMI drie boorgatseismometers actief in Noordwest Friesland, namelijk bij Zweins, Wijnaldum en Firdgum. Hierdoor is de detectiegrens voor bodemtrillingen in de winninggebieden van Frisia sterk verlaagd van een magnitude groter dan 1,5 op de schaal van Richter naar minder dan 0,5.

Uit de vakliteratuur zijn geen aanwijzingen bekend over het optreden van bodemtrillingen veroorzaakt door de winning van steenzout door middel van oplosmijnbouw. De bewegingen in de zoutformatie zijn vanwege zoutkruip zo gelijkmatig en langzaam, dat eventueel in en boven het zout gelegen breuken ook niet plotseling kunnen zetten en zo een beving veroorzaken. In aanvulling hierop laten structuurkaarten van de diepe ondergrond in Noordwest Friesland geen breuken van betekenis zien (ref.19). Vanwege het structureel uitblijven van bodemtrillingen kan ook geen schade als gevolg van bodemtrillingen ontstaan.

2.3 Maatregelen om schade door bodembeweging te voorkomen.

Vanwege betrouwbare metingen en goede voorspelbaarheid van bodemdaling door zoutwinning in de vergunning Barradeel II kan men in het gebied effectief inspelen op voorkoming van schade als gevolg van deze bodemdaling door het nemen van de juiste herstelmaatregelen, voornamelijk op waterhuishoudkundig vlak. Hiertoe heeft Frisia eind 2013 een overeenkomst gesloten met de vier betrokken partijen, namelijk de provincie Friesland, het waterschap Fryslân en de gemeenten Franekeradeel en Harlingen (ref.20). In de overeenkomst is het peilmerkenregister van de waterpassing uit september 2004 als uitgangspunt genomen ('nulmeting') ter bepaling van de bodemdaling door zoutwinning in het gebied Barradeel II en de gerelateerde herstelmaatregelen.

3 Stabiliteit cavernedaken bij groter eindvolume

Dit hoofdstuk behandelt de voorschriften van Artikel 25, lid 1, sub d, Mbb.

3.1 Analytische berekeningen

Uit een echometing op 24 oktober 2017 zijn de volgende afmetingen van caverne BAS-4 verkregen. De cavernehoogte tussen sump (2639 mTV) en zoutdak (2469 mTV) bedraagt 170 m. De caverne is klokvormig met een gemiddelde doorsnede van bijna 90 m. Het open cavernevolumen bedraagt circa 1 miljoen m³. De dikte van het dragende steenzoutdak van de caverne tot aan de onderkant van een bovenliggende zwakke carnallitietlaag (2382 mTV) bedraagt gemiddeld 90 m.

Met behulp van het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium is de stabiliteit van het zoutdak onderzocht. Het dak wordt opgevat als een alzijdig ingeklemde cirkelvormige plaat, die in verticale richting gelijkmatig wordt belast (ref.2). De minimaal voor lange-termijn stabiliteit vereiste dakdikte h_{dak} is berekend volgens onderstaand bezwijkcriterium:

$$h_{\text{dak}} > 0.5 R \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot (1 - \sin \phi)}{2C \cdot \cos \phi + P_{\text{cav}} \cdot (1 + \sin \phi)}}$$

waarin: R = straal van het cirkelvormige dak [m]
 ΔP = druktekort in pekkel aan het dak ten opzichte van lithostatisch [MPa]
 ϕ = hoek van inwendige wrijving van dakgesteente [°]
 C = cohesie van steenzout [MPa]
 P_{cav} = pekeldruk in caveerne [MPa].

In bijlage 2 is de minimaal vereiste dakdikte voor permanente stabiliteit bij drie overspanningen getoond. De toegepaste breuksterktewaarden voor steenzout zijn $C = 3,3$ MPa en $\phi = 33^\circ$ (ref.3). De pekeldrukgradiënt is 0,012 MPa/m en de overburden gradiënt 0,0215 MPa/m. Omdat de bovenstaande analoge modellering een aanzienlijke vereenvoudiging inhoudt van de werkelijke, complexe spanningstoestand in het gesteente rondom de pekkelgevulde caveerne is het aanbevelenswaardig een veiligheidsfactor 2 voor de vereiste dakdikte in acht te nemen.

Met toepassing van een veiligheidsfactor van 200% blijkt uit bijlage 2 dat bij een doorsnede van 150 m het zoutdak van caveerne BAS-4 stabiel is vanaf een dikte van 48,5 m (2x 24,2 m) bij het maximaal mogelijke pekeldrukdeficiet ten opzichte van lithostatisch van 23,5 MPa ter hoogte van het zoutdak. Deze getallen gelden evenzeer voor caveerne BAS-3-O, waar de stratigrafie van de Zechstein formatie, getoond in bijlage 3, overeenkomt met die van caveerne BAS-4.

Indien de cavernehoogte in de toekomst gehandhaafd blijft op 170 m, heeft een caveerne met een openstaand volume van 1,5 miljoen m³ een doorsnede van 106 m, wat ruimschoots minder dan de hiervoor vermelde doorsnede van 150 m.

3.2 Numerieke DIANA modellering (bijdrage)

De Frisia-cavernes BAS-3-O en BAS-4 zijn gemodelleerd als axi-symmetrische cavernes, waarbij wordt aangenomen dat de straal van de cavernes vergelijkbaar is in alle kompasrichtingen (azimuths). Dat komt redelijk goed overeen met echometingen uit 2017. De cavernevorm op 31 december 2021 is geschat op basis van de verwachte zoutproductie, het voorziene drukregime en het daarmee samenhangende convergentievolume. Voor BAS-3-O is de cavernevorm aangeleverd door ingenieursbureau DEEP uit Bad Zwischenahn (Duitsland) op basis van oplosmijnbouwsoftware en voor BAS-4 is de vorm geschat op basis van de 2017 echometing en de geplande waterinjectie en zoutextractie, die veel geringer zijn dan voor BAS-3-O, door de geringe injectiecapaciteit van de recent geïnstalleerde plunjerpomp. De cavernevolumes groeien naar verwachting tot circa 1,2 à 1,5 miljoen m³.

Caverne BAS-3-O wordt permanent met een groot debiet onder hoge druk ($\approx 90\%$ lithostatisch) geopereerd door middel van een centrifugaalpomp. De caveerne convergeert nauwelijks, hoewel een beperkte bodemdaling van enkele millimeters is opgetreden bovenop de eerdere bodemdaling van de in 2013 afgesloten caveerne BAS-3. Die beperkte bijdrage is voornamelijk afkomstig van kortere periodes van lagere druk ten behoeve van putoperaties en metingen. Caverne BAS-4 wordt vanaf medio februari 2018 ook onder hoge druk geopereerd, maar dan met een flexibel regelbaar (lager) injectiedebiet met behulp van de plunjerpomp.

Gedurende de hoge-druk-oplosmijnbouw zijn de schuifspanningen in het zout laag, en daarmee ook de caverneconvergentie en het risico van dakschade. Voor de berekening van de dakstabiliteit is uitgegaan van een situatie van ongeveer hydrostatische pekeldruk, zoals deze zou kunnen

optreden tijdens complexe putreparaties, een zware putlekkage of doordat alsnog de wens bestaat het ondergronds pekelvolume tot een minimum te beperken voordat tot definitieve afsluiting van de cavernes wordt overgegaan.

In bijlage 13 is caverne BAS-3-O weergegeven, die eerst op hoge druk uitgelopen is tot circa 1,5 miljoen m³, inclusief een deel van de sump. Daarna wordt de druk voor de duur van enkele maanden verlaagd naar pekel-hydrostatisch. De schuifspanningen zijn weergegeven als Von-Mises spanningen, die direct te vergelijken zijn met de verschilspanningen van een triaxiaalproef (verschilspanning = axiale - radiale spanning). Te zien is dat de maximale Von Mises spanningen circa 8 MPa bedragen, op een paar hogere waarden van circa 10 MPa na op plaatsen waar de gemodelleerde zoutwand knikken maakt. Voor dakbezwijking moeten grotere delen van het zoutdak instabiel worden. Derhalve is een schuifspanning van 8 MPa uitgangspunt voor het analyseren van de korte-termijn (enkele maanden) dakstabiliteit. Zoutdakbezwijking (ernstige dilatatie, gevolgd door afbrokkeling) wordt niet verwacht voor Von Mises spanningen beneden de 10 à 15 MPa, op basis van korte-termijn uniaxiale zoutsterktes van 25 - 30 MPa. Een gemiddelde schuifspanning van 8 MPa betekent een korte-termijn zoutbelasting van 25 à 33%, hetgeen een conservatief domein is.

De invloed van de carnallietlaag op de dakstabiliteit is beperkt, in ieder geval wanneer er nog circa 100 meter haliet aanwezig is tussen het cavernedak en de carnallietlaag, zoals de verwachting is voor eind 2021. In bijlage 13 is wel te zien dat de carnalliet als een afschuivingslaag functioneert vanwege de lagere viscositeit in vergelijking met haliet.

Caverne BAS-4 is ook geanalyseerd, gebaseerd op de huidige vorm met een beperkte vergroting van de bovenste helft tot een totaal cavernevolumen van 1,2 miljoen m³ eind 2021. In bijlage 13 zien we Von Mises spanningen van circa 9 MPa. De bodemdaling uit het model kon ook passend gemaakt worden aan de bodemdalingmetingen (vorm en tijdslijn).

Kort samengevat is door middel van zowel analytische als numerieke modellering aangetoond, dat de dakstabiliteit van de vergrote cavernes blijvend voldoende gegarandeerd is.

4 Processen in de ondergrond na buitengebruikstelling cavernes

Dit hoofdstuk behandelt de voorschriften van Artikel 25, lid 1, sub a en c, Mbb

Vrij beweegbare pekel

Uit Tabel 1 volgt dat bij einde zoutproductie op uiterlijk 31 december 2021 het ondergronds achter te laten open pekelvolume in de vergunningsgebieden Barradeel (BAS-1 en 2) en Barradeel II (BAS-3, 3-O en 4) in totaal maximaal 4,15 miljoen m³ bedraagt. De onzekerheid in het totale volume bedraagt ongeveer 5% op basis van echometingen en productiebalansen (ref.4). De pekel wordt halietpekel genoemd en kan zich vrij verplaatsen.

In sump gebonden pekel

Daarnaast bevindt zich een relatief klein halietpekelvolume in de poriën van de sump op de bodem van de cavernes. Het porievolumen is gelijk aan ongeveer 1,5% van het totale aan zout geproduceerde volume (ref.4). In december 2017 is uit de winningsvergunningen Barradeel en Barradeel II cumulatief 9.644.075 m³ zout gewonnen (officiële melding aan EZ). In de periode 2018-2021 komt hier naar verwachting circa 1,6 miljoen m³ bij, zodat op 31 december 2021 circa 11,25 miljoen m³ zout geproduceerd is. In de resulterende vijf cavernesumps bevindt zich op dat moment cumulatief circa 0,17 miljoen m³ pekel, die niet of nauwelijks door drukverlaging gewonnen kan worden. Het porievolumen bedraagt ongeveer 4% van het vrije volume.

Het sumpmateriaal ondersteunt het omringende zout en zal nauwelijks compacteren. Zodra de cavernes definitief zijn afgesloten stijgt de pekeldruk in de poriën naar lithostatische waarden, waardoor de geringe compactie van de sump helemaal tot stilstand komt. De in de poriën aanwezige pekel zit daardoor blijvend gebonden en is 'dood' volume geworden.

4.1 Geomechanische en hydraulische processen in diepe ondergrond

Frisia heeft diverse studies laten uitvoeren naar de mogelijke korte- en lange-termijn bodemdaling als gevolg van caverneconvergentie en permeatieprocessen van ingesloten pekervolumes onder lithostatische druk (refs.5,6,7,8). De studies hebben relevante inzichten en resultaten opgeleverd over de geomechanische en hydraulische processen in de diepe ondergrond rond en boven met pekkel gevulde, ingesloten en verlaten cavernes. De processen worden sterk beïnvloed door de lokale stratigrafie van het Zechstein zoutpakket en de erboven liggende gesteenten (deklagen). In de bijlagen 3, 4 en 5 is de stratigrafie van de Zechstein groep en de deklagen getoond.

De belangrijkste inzichten in de ondergrondse processen zijn als volgt:

1. Er zijn geen overtuigende aanwijzingen gevonden dat in een afgesloten, met hogedruk pekkel gevulde caveerne hydraulische breukvorming op macroscopische schaal in het zout kan plaatsvinden. De pekeldruk in de caveerne blijft ver beneden de limietwaarde, waarboven doorgaande scheurvorming in het zout kan ontstaan. Er kan dus geen sprake zijn van een snel en ongecontroleerd leeglopen van de afgesloten caveerne naar hoger gelegen poreuze gesteenten. De vorm van de caveerne, noch het ingesloten pekervolume zijn kritische factoren.
2. Thermisch evenwicht tussen pekelt temperatuur en de temperatuur van de omringende zoutformatie is geen voorwaarde voor een definitieve en veilige afsluiting van een met pekkel gevulde caveerne. Vanwege de grote compressibiliteit van de caveerne inclusief de directe zoutwand, de drukverlaging in het zout rondom de caveerne en de verhoogde zoutporositeit vanwege dilatatie als gevolg van langdurige stationaire winningsfasen, veroorzaakt de volumexpansie van de opwarmende cavernepkkel slechts een geleidelijke en gematigde drukverhoging in de caveerne. De sterkste opwarming zal overigens plaatsvinden in de eerste jaren na einde productie. Zolang de caveerne nog niet definitief afgesloten is, zou men indien nodig nog druk kunnen afdrukken, hoewel dat tot extra bodemdaling leidt.
3. De hogedruk pekkel (circa lithostatische druk) creëert geleidelijk microscopische spleten langs zoutkristalvlakken in de zoutlagen boven de caveerne en vormt zo secundaire porositeit in het zout. Het resulterende pekelmigratieproces wordt gedomineerd door lokale spanningspatronen in het zout en de lokale zoutstructuur.
4. De halietspekkel uit de cavernes migreert op weg naar boven door de gebiedsbreed aanwezige Carnallietlaag. Daarbij wordt halietspekkel omgezet in carnallitische pekkel. Meer details over dit conversieproces volgen in de volgende sectie.
5. Zodra na verloop van (veel) tijd de migrerende carnallitische pekkel de top van de Zechstein formatie bereikt, lekt de pekkel weg in de poreuze bovenliggende Bontzandsteen, waarbij de pekeldruk afneemt van lithostatisch naar hydrostatisch. Het uit de Zechstein weglekkende pekervolume veroorzaakt bodemdaling aan maaiveld. Er wordt conservatief verondersteld dat ieder m³ pekkel, die naar hydrostatische druk terugvalt, eenzelfde volume aan bodemdaling aan maaiveld veroorzaakt, hoewel poro-elastische numerieke modellering van de processen aangeeft dat maximaal 95% van het ondergrondse volumedeficiet naar maaiveld kan worden doorgezet.
6. Na pekeldoorbraak in de deklaag wordt de vloeistofstroom door de secundaire porositeit van het zout een laminair Darcy-type stroming. Het zout heeft nu een verhoogde permeabiliteit, maar er is geen sprake van macroscopisch lekpaden.
7. Niet of nauwelijks poreuze, dikke schalielagen uit de Trias (Zurich schalie) en Krijtperiode (Vlieland schalie) zijn aanwezig tussen de Zechstein zoutformatie en het maaiveld. Weliswaar verpietert de Zurich schalie in noordoostelijke richting, waardoor deze schalielaag ontbreekt boven de caveerne BAS-4, maar de overal aanwezige dikke Vlieland schalie vormt een effectieve eindbarrière, temeer omdat daarin geen doorgaande breuken zijn aangetroffen. De uit de Zechstein formatie weggelekte carnallitische pekkel kan daardoor niet de Tertiaire aardlaag bereiken, die overigens ook nog dikke afdichtende kleilagen bevat.
8. De poreuze Bontzandsteenlaag en de Vlieland zanden fungeren als blijvend bergingsgesteente voor de weglekkende pekkel. Door de hoge dichtheid van de carnallitische pekkel (1,3 kg/l) zal de pekkel zich voornamelijk onderin de Bontzandsteenlaag verspreiden en zich nauwelijks mengen met het lichtere zoute water (1,05 kg/l) in de poriën van de Bontzandsteen.

9. Via de buitenzijde van de boorput zal geen lekpad optreden vanuit de caveerne naar hoger gelegen poreuze gesteentelagen. Vooral het puttraject in de Zechstein zoutformatie is vanwege zoutkruip zeer lekdicht afgesloten. Een effectief en over voldoende lengte inwendig afgecementeerde boorput kan ook geen lekpad meer naar maaiveld vormen.
10. De niet-terugwinbare dieselolie, die bij de uitloging van de cavernes als dakbescherming is ingezet ('mijnbouwhulpstof'), zal eveneens na verloop van tijd de Zechstein formatie verlaten en migreren naar de top van de Bontzandsteen. Daar wordt de olie tegengehouden door de Zurich schalie. De helling van de Zurich schalie is zo gering dat geen verdere verspreiding van olie in het horizontale vlak verwacht wordt (zie bijlage 4).

4.2 Conversie van halietpekel naar carnallietpekel

In geval van caveerne BAS-2 is het conversieproces representatief gekwantificeerd (ref.9). De halietpekel dringt vanuit de caveerne door in de bovenliggende carnalliet laag, die 52 m dik is. Uitgangspunt bij het conversieproces is dat de carnalliet uit 30% zuiver carnalliet ($MgKCl_3 \cdot 6H_2O$) bestaat (ref.6). De overige 70% bestaat uit haliet (NaCl) en andere bestanddelen, die niet oplosbaar zijn in carnallitische pekkel. Het vrije volume aan halietpekel in caveerne BAS 2 bedraagt bij definitieve afsluiting 208.000 m³.

30% carnalliet-fractie in carnalliet	BAS-2	
Volume halietpekel (beschikbaar voor permeatie en migratie)	208 000	m ³
Aangetast carnalliet volume	734 240	m ³
Totaalvolume na conversie	973 440	m ³
Toename pekelvolume vanwege oplossing carnallietzout	1.03	-
Volume carnallitische pekkel (factor 2,09 volumevergroting)	434 720	m ³
Onoplosbaar materiaal	538 720	m ³
Sump volume (bulking factor 1.4)	754 208	m ³
Porievolume van sump (28.5%) (gebonden volume)	215 488	m ³
Vrije volume carnallitische pekkel	219 232	m ³
Volumeverhouding halietpekel en vrije carnallitische pekkel	1.05	-
Dakoppervlak caveerne in carnalliet	14 120	m ²
Secundaire porositeit in Zechstein loodrecht boven dakoppervlak	7 144	m ³
Benodigd bruto bergingsvolume Bontzandsteen	4 384 640	m ³

Tabel 2: Conversie van halietpekel naar carnallitische pekkel voor 30% carnalliet concentratie in geval van caveerne BAS-2 (ref.9).

In Tabel 2 is samengevat welke volumes vervolgens ontstaan wanneer de halietpekel volledig uit de caveerne door de carnalliet laag stroomt (permeatie). Tijdens het conversieproces wordt 434.720 m³ carnallitische pekkel gevormd, waarvan 215.488 m³ gebonden zit in de poriën van de sump van de nieuw gevormde caveerne in de carnalliet laag. De resterende 219.232 m³ vrije pekkel migreert naar de bergingszone van de Bontzandsteen. Onderweg in de Zechstein formatie staat de pekkel onder lithostatische druk.

Een klein deel van de migrerende pekkel blijft hangen in de secundaire porositeit van de Zechstein formatie, die boven de carnalliet laag 250 m dik is. Bij een secundaire porositeit van circa 0,2% en een schoorsteenvormige migratiezone in de Zechstein kan daarin 7144 m³ geborgen worden. Bijna alle vrije carnallitische pekkel komt dus terecht in de poriën van de Bontzandsteen.

4.3 Doelmatigheid Bontzandsteen als bergingszone

De Bontzandsteen is feitelijk een zandige kleisteen met een gemiddelde porositeit van circa 5% en een permeabiliteit van 1 -10 mD (ref.6). De horizontale permeabiliteit is groter dan de verticale ($K_v/K_h \approx 1/10$). De poriën zijn gevuld met zout water met een dichtheid van 1,06 ton/m³ (~ 90 g/l haliet). De poriedruk is oorspronkelijk hydrostatisch.

Om 219.232 m³ carnallitische pekkel uit caveerne BAS-2 te bergen is een bruto Bontzandsteen volume van 4.384.640 m³ nodig. De carnallitische pekkel heeft een dichtheid van 1,3 ton/m³. Vanwege dichtheidsverschillen tussen carnallitische pekkel en zout water zal de pekkel zich hoofdzakelijk verspreiden in de onderste lagen van de Bontzandsteen.

Geen risico op porieverstopping door zoutrekristallisatie

De gesatureerde carnallitische pekkel, die arriveert in de Bontzandsteen bergingszone zal niet rekristalliseren door afkoeling, omdat de pekkel hygroscopische eigenschappen heeft met betrekking tot het zoute water. Op het raakvlak tussen pekkel en water ontstaat een overgangszone in pekkelconcentratie vanwege thermische diffusie van kalium- en magnesiumionen van hoge naar lage concentratie. De oplosbaarheid van deze ionen in water is hoger dan van natriumionen, zodat de diffusie van carnallitische pekkel in zout water kan leiden tot het neerslaan van haliet (NaCl) in de poriën van de Bontzandsteen. Indien alle haliet zou neerslaan is dat 90 g/l. Dit gewicht heeft een volume van 0,043 l (90/2100), zodat maximaal 4,3% van het porievolume verstopt kan raken.

Geen risico op breukvorming in afdichtende Zurich schalie

Op de lange duur moet de Bontzandsteen bergingszone het volledige volume aan vrije carnallitische pekkel kunnen bergen zonder dat de poriedruk daardoor zo hoog wordt dat de afsluitende schalie boven de bergingszone kan breken. Uitgaande van een Poisson verhouding van $\nu = 0,25$ voor schalies volgt dat de effectieve horizontale gesteentespanning 1/3 bedraagt van de verticale effectieve spanning. Bezwijkgedrag treedt op indien de drukverhoging van de porievloeistof ten opzichte van hydrostatisch groter is dan $\Delta P_{\text{pore,max}} = 2 \times \sigma_{\text{h,eff}} = 0,67 \sigma_{\text{v,eff}}$ (ref.6). De onderkant van de Zurich schalie bevindt zich boven caveerne BAS-2 op een diepte van gemiddeld 2050 mTV, waar geldt $\sigma_{\text{v,eff}} = P_{\text{litho}} - P_{\text{pore}} = (0,215 - 0,106) \times 2050 = 223$ bar en $\Delta P_{\text{pore,max}} = 150$ bar. De bezwijkdruk bedraagt $P_{\text{frac}} = P_{\text{pore}} + \Delta P_{\text{pore,max}} = 217 + 150 = 367$ bar (drukgradiënt 0,179 bar/m). Evenzo bedraagt de breukvoortplantingsdruk $P_{\text{voort}} = P_{\text{frac}} - \sigma_{\text{h,eff}} = 367 - 74 = 293$ bar (drukgradiënt 0,143 bar/m).

Een zeer conservatieve beschouwing, waarbij 70.000 m³ hogedruk carnallitische pekkel met een drukgradiënt van 0,215 bar/m plotseling vanuit de Zechstein uitbreekt naar de Bontzandsteen, heeft het volgende rekenresultaat opgeleverd (zie ref.6, bijlage 19, sectie 3.2). In de onderste lagen van de Bontzandsteen is breukvorming, evenals enige breukdoorzetting naar boven mogelijk. Het overdrukfront dempt na circa 7 uur uit (drukgradiënt < 0,15 bar/m), terwijl een maximale hoogte van $H = 40$ m bereikt wordt. Aangezien de gemiddelde dikte van de Bontzandsteen circa 120 m bedraagt komt de integriteit van de Zurich schalie niet in gevaar door hogedruk pekelerupties.

Een tweede potentieel drukverhogend mechanisme hangt samen met de geleidelijke accommodatie van carnallitische pekkel in de Bontzandsteen. De oorspronkelijke porievloeistof wordt weggedrukt naar andere delen van de Bontzandsteen, hetgeen daar tot poriedrukverhoging zou kunnen leiden. De bulk samendrukbaarheid van Bontzandsteen bij een porositeit van 5% bedraagt $1,18 \cdot 10^{-5}$ /bar (ref.6, bijlage 19). Omdat zich in het horizontale vlak geen barrières in de Bontzandsteen bevinden wordt de herverdeling van porievloeistof niet gehinderd en zal dit tot slechts geringe algehele drukverhoging leiden. Het volgende rekenvoorbeeld bevestigt dat.

Uit Tabel 1 volgt dat het achtergelaten vrije pekkelvolume in de cavernes BAS-1, 2 en 3 cumulatief 1,15 miljoen m³ bedraagt. Dit volume wordt na verloop van tijd geconverteerd naar 1,21 miljoen m³ vrije carnallitische pekkel (factor 1,05; zie Tabel 2). Indien de poriedruktoename als gevolg van de carnallitische pekkelindringing beperkt blijft tot $\Delta P_{\text{pore,max}} = 10$ bar, is het daarvoor benodigde bruto gesteentevolume circa 10^{10} m³ [$1,21 \cdot 10^6 / (10 \times 1,18 \cdot 10^{-5})$]. Indien de drukverhoging cilindervormig plaatsvindt over een Bontzandsteenhoogte van 120 m, leidt dit tot een cilinderstraal van 5,15 km. De geringe drukverhoging zal de afdichtende werking van de Zurich schalie niet noemenswaardig beïnvloeden.

Geografische reikwijdte afdichtende werking Zurich schalie

Uit de regionale stratigrafie van bijlage 4 blijkt dat er boven de cavernes BAS-1, 2 en 3 voldoende Zurich schalie aanwezig is om als afschermdende laag naar hoger gelegen poreuze gesteenten te fungeren. Voor het opvangen van een volume van 1,21 miljoen m³ vrije carnallitische pekels in de poriën van de Bontzandsteen is een bruto bergingsvolume van 24,2 miljoen m³ nodig.

Indien men aanneemt dat vanwege de zwaartekrachtwerking de zware carnallitische pekels slechts tot H = 5 m in de Bontzandsteen reikt en zich cirkelvormig verbreedt met straal R, volgt uit de relatie $V = \pi R^2 H = 24,2 \cdot 10^6$, dat R = 1240 m. Deze kleine straal en de geringe indringhoogte maken duidelijk dat de carnallitische pekels ruimschoots geborgen kan worden in de Bontzandsteen. Zelfs als op geologische tijdschaal alle carnallitische pekels (vrij en gebonden in de sump poriën) de Zechstein zou kunnen verlaten, is er ruim voldoende bergingscapaciteit in de Bontzandsteen. De kans dat carnallitische pekels zelfs maar in de buurt van de Zurich schalie zou komen is feitelijk nihil.

In de definitief verlaten caveerne BAS-2 is naar schatting een maximum volume van 64 m³ aan niet-terugwinbare blanket dieselolie achtergebleven (ref.10). De olie met een s.g.van 0,83 ton/m³ kan onder invloed van zwaartekrachtsverschillen met pekels uiteindelijk opdrijven naar de onderkant van de ondoorlaatbare Zurich schalie. Indien men aanneemt dat de olie een film van 10 cm dikte zal vormen boven in de Bontzandsteen, raken de poriën daarvan in een cirkel met een doorsnede van maximaal 64 m met olie gevuld. De afdichtende Zurich schalie voorkomt verdere verspreiding van de dieselolie in de ondergrond.

4.4 Uitbreiding bergingszone naar Vlieland zandsteen

Uit de regionale stratigrafie van bijlage 4 blijkt eveneens dat de Zurich schalie noordoostelijk van caveerne BAS-3-O niet meer aanwezig is, maar de Rijnland groep nog wel. Zoals getoond in bijlage 5, bevinden zich in de Rijnland groep de Vlieland schalies, die de gewenste afdichtende werking naar ondiepere gesteentelagen zullen bewerkstelligen. Door het ontbreken van de Zurich schalie ontstaat voor migrerende pekels een ruimere bergingszone, die bestaat uit de Bontzandsteen en de bovenliggende Vlieland zandsteen.

De ruimere bergingszone is een gunstig gegeven met het oog op het vrije pekelsvolume van maximaal 3 miljoen m³, dat in de cavernes BAS-3-O en BAS-4 cumulatief wordt achtergelaten. Het ingesloten volume wordt tijdens migratie naar de Bontzandsteen geconverteerd naar 3,15 miljoen m³ vrije carnallitische pekels. Het benodigde bruto bergingsvolume in de Bontzandsteen bedraagt 63 miljoen m³. Indien ook in dit geval de carnallitische pekels niet hoger dan 5 m in de Bontzandsteen reikt en zich cirkelvormig verspreidt bedraagt de straal R = 2000 m. Dit bergingsvolume is ruimschoots voorhanden.

In boring BAS-4 is de top van de Vlieland zandsteen aangetroffen op een diepte van 1896 mTV. De top van de Zechstein formatie ligt op een diepte van 2066 mTV. De dikte van de bergingszone bedraagt dus 170 m, waarvan de bovenste 26 m bestaan uit Vlieland zandsteen met een porositeit van meer dan 10% (ref.11). Indien de poriedruktoename in de bergingszone beperkt moet blijven tot maximaal 10 bar, wordt identiek aan een berekening in sectie 4.3 afgeleid dat hiervoor 2,6 10^{10} m³ bruto gesteentevolume nodig is. Er is aangenomen dat de bulk samendrukbaarheid van de meer poreuze Vlieland zandsteen niet groter is dan die van Bontzandsteen. Bij een bergingshoogte van 170 m betreft dit een schijfvormig gesteentevolume met een straal van 7 km, waarin de poriedruk met maximaal 10 bar verhoogd is. Gezien de gelijkmatige en ononderbroken afzettingen van de Bontzandsteen en Vlieland zandsteen is dat berekende volume zondermeer aanwezig. De Vlieland schalies worden in hun afdichtende werking niet ondermijnd door de geringe poriedruktoename, die in de praktijk waarschijnlijk lager zal uitvallen dan de toename van 10 bar, die hier conservatief toegepast is.

4.5 Tijdschaal pekelmigratie door Zechstein zoutformatie

4.5.1 Thermische effecten in cavernes BAS-2 en BAS-3

Op het moment dat een met pekkel gevulde caveerne definitief wordt afgesloten is de temperatuur van de pekkel als gevolg van jarenlange injectie van koud water meestal lager dan die van het omringende zoutgesteente. Na insluiting neemt de caveerneconvergentie door drukverhoging van de pekkel sterk af, maar tegelijkertijd zet het caveernevolume uit door opwarming van de pekkel. Dit leidt ertoe, dat in de eerste jaren na caveerne-afsluiting de pekelpermeatie in het zoutdak van de caveerne het grootste is. Voor de cavernes BAS-2 en BAS-3 is dit proces in detail gemodelleerd door de Technische Universiteit Clausthal (TUC, ref.5).

In bijlage 6 is de door TUC gemodelleerde ontwikkeling van de pekkeltemperatuur na definitieve stopzetting van koudwater-injectie in de cavernes BAS-2 en BAS-3 getoond. Voor de kleine caveerne BAS-2 met een volume van 208.000 m³ is na circa 10 jaar een temperatuurevenwicht met het omringende zoutgesteente bereikt. Voor de grotere caveerne BAS-3 met een volume van 475.000 m³ duurt deze periode ongeveer 50 jaar. Aangezien caveerne BAS-2 al in 2004 blijvend is ingesloten, is die caveerne inmiddels in thermisch evenwicht met de omgeving.

In bijlage 7 zijn pekelinfiltratiezones na caveerne-afsluiting getoond, die met het TUC model zijn berekend. De berekeningen zijn uitgevoerd voor periodes van 6 jaar (BAS-2, status in 2010) en 110 jaar (BAS-3, status in 2115). De permeatiepatronen vertonen nog niet hun uiteindelijke vorm op de langere termijn. In bijlage 8 zijn typische voorbeelden getoond van infiltratiepatronen van migrerende pekkel door een Zechstein zoutdak tot het moment van doorbraak en weglekken van de pekkel in het poreuze gesteente (ref.12). Een algemeen kenmerk is de schoorsteenvormige migratie van pekkel in de zoutformatie op enige afstand boven de afgesloten caveerne. Wel versnelt een grotere temperatuurkloof op moment van caveerneafsluiting de pekeldoorbraak aanzienlijk.

Tijdschaalanalyse pekelmigratie caveerne BAS-3

In bijlage 9 zijn de TUC modelresultaten van drukontwikkeling en pekelpermeatie voor caveerne BAS-3 over een periode van 110 jaar getoond. Duidelijk is in de onderste figuur te zien dat pekelpermeatie door het caverne dak na het bereiken van temperatuurevenwicht zeer significant afneemt. Na 100 jaar begint een zeer lange periode van stationaire caveerneconvergentie, waarbij de pekelpermeatie in het dak slechts met 4 mm per jaar in opwaartse richting voortgaat.

TUC heeft berekend dat ongeveer 55.000 jaar na afsluiting van caveerne BAS-3 het infiltratiefront de poreuze Bontzandsteen zal bereiken. Pas vanaf dat moment loopt de druk van de weglekkende (inmiddels carnallitische) pekkel terug van lithostatisch naar hydrostatisch en treedt bodemdaling aan maaiveld op. Het TUC-model heeft als best passende secundaire zoutporositeit een waarde van 1% berekend. Deze waarde is erg hoog, want de meest aannemelijke secundaire porositeit van onbeschadigd zout is een standaardwaarde van 0,2% (ref.13). Indien men als secundaire zoutporositeit 0,2% hanteert zal het infiltratiefront vijf keer sneller de Bontzandsteen bereiken dan door TUC berekend is. De bodemdaling boven caveerne BAS-3 zou dan vijf keer sneller aanvagen, dus ongeveer 11.000 jaar na afsluiting.

In bijlage 10 is voor BAS-3 de ontwikkeling van permeatievolume en bodemdaling in de tijd getoond, die verkregen is met een door WEP gekalibreerd model voor caveerneconvergentie (ref.6). Als permeatiepatroon in de Zechstein is een omgekeerde kegel genomen met 0,2% secundaire porositeit en een totaal porievolume van 110.000 m³. Na circa 10.000 jaar treedt volgens het WEP model de eerste uitstroming van pekkel in de Bontzandsteen op, gevolgd door bodemdaling aan maaiveld.

Conservatieve schatting pekeldoorbraak bij caveerne BAS-3

Men kan het infiltratieproces bij BAS-3 (in geval van een intact caverne dak) op dezelfde manier modelleren als is gebeurd in Tabel 2 voor caveerne BAS-2. Caveerne BAS-3 heeft een factor 2,3 groter caveernevolume dan caveerne BAS-2. In de carnallitietlaag ontstaat op den duur een nieuwe

met carnallitische pekels gevulde cavernes met een dakoppervlak van 32.250 m². Door thermische uitzetting van de cavernepemel zal binnen 100 jaar het pekelpermeatiefront circa 100 m hoger zijn gelegen. Er resteert dan circa 220 m aan Zechstein dak, waarin met een schoorsteenvormig infiltratiepatroon nog 14.200 m³ aan secundaire porievolumes gevormd kan worden. Volgens het WEP model van bijlage 10 bedraagt het infiltratievolume door cavernconvergentie minder dan 12 m³ per jaar. Met deze infiltratiesnelheid en het gereduceerde secundaire porievolume duurt het nog minstens 1200 jaar voordat pekeldoorbraak naar de Bontzandsteen kan optreden.

4.5.2 Thermische effecten in cavernes BAS-3-O en BAS-4

Het vrije pekervolume van de na 31 december 2021 in te sluiten cavernes BAS-3-O en BAS-4 zal volgens planning nogal groot worden met een uiterste volume van 1,5 miljoen m³ per cavern. In de volgende beschouwing wordt gebruik gemaakt van gegevens over de huidige cavern BAS-4. Een echometing op 24 oktober 2017 heeft opgeleverd dat een open pekervolume van circa 1 miljoen m³ is bereikt en dat vanwege de snelle groei van de cavern de huidige temperatuurkloof tussen pekels en omringend zout minstens 45 °C bedraagt.

Vanwege het grote in te sluiten cavernvolume zal het relatief lang duren voordat thermische evenwicht bereikt wordt tussen cavernepemel en omringend zoutlichaam. Voor cilindrische cavernes is voor de karakteristieke tijd t_c , waarin 75% van de temperatuurkloof is overbrugd, de volgende formule afgeleid (ref.14):

$$t_c = 4.67 (V_c/100000)^{2/3} \exp[-0.5 \{0.5 \ln(1.1 A)\}^2],$$

met: V_c = volume van de cilindrische cavern [m³]

$A = H/D$, met H = cavern hoogte en D = cavern diameter.

Volgens sectie 3.1 geldt bij afsluiting van de cavernes BAS-3-O en BAS-4 dat $H = 170$ m en $D = 106$ m, waardoor $A = 1,6$. Voor een cavern met $V = 1,5 \cdot 10^6$ m³ wordt berekend $t_c = 27,5$ jaar. Voor een halfwaardetijd van $0,5 t_c = 13,75$ jaar zal na ongeveer 69 jaar de temperatuurkloof voor 97,5% zijn overbrugd en kan men verdere temperatureffecten verwaarlozen ten opzichte van de voortgaande cavernconvergentie.

De thermische uitzettingscoëfficiënt van pekels bedraagt $\alpha = 4,4 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$. Indien in de eerste 69 jaar na afsluiting een temperatuurkloof van 45 °C wordt overbrugd zet de pekels in totaal circa 30.000 m³ uit. Dat volume is ongeveer het volledige effect van thermische expansie op de pekelmigratie. Om dat volume te bergen in zout met een secundaire porositeit van 0,2% is een bruto zoutvolume van 14,8 miljoen m³ nodig.

Het zoutdak tussen cavern en de carnallitiet moet vanwege dakstabiliteit minimaal een dikte van 50 m behouden (zie sectie 3.1), indien rekening gehouden wordt met (korte) perioden van hydrostatische pekeldruk, bijvoorbeeld als gevolg van onvoorziene putproblemen. Eveneens zullen de cavernes BAS-3-O en BAS-4 maximaal een factor 7 groter volume krijgen dan cavern BAS-2. Ontleend aan Tabel 2, ontstaat in de carnallitietlaag op den duur een nieuwe met carnallitische pekels gevulde cavern met een dakoppervlak van 99.000 m², een doorsnede van 355 m (bij cirkelvorm) en een hoogte van ongeveer 44 m (ref.15). Indien het geïnfiltrerde zout tussen cavernedak en top carnallitiet ook ongeveer een cilindervorm heeft met een doorsnede van 355 m en een dikte van 94 m is het bruto zoutvolume 9,3 miljoen m³. Voor berging van thermisch uitgezette pekels is 14,8 miljoen m³ nodig. Er zal boven de carnallitietlaag nog een laag van 55 m dik ($5,5 \cdot 10^6/99 \cdot 10^3$) gevuld worden met uitzettingspekels. De restandikte van nog niet geïnfiltrerde Zechstein formatie bedraagt circa 215 m (ref.15). Bij een oppervlak van 99.000 m² is het restvolume aan secundaire porositeit 42.500 m³.

Caverneconvergentie na bereiken van thermisch evenwicht

Na circa 70 jaar van afsluiting verkeren de grote cavernes BAS-3-O en BAS-4 in thermisch evenwicht met het omringende zout. Vanaf dat moment zal de snelheid van pekelpermeatie bepaald worden door caverneconvergentie als gevolg van zoutkruip.

Het lineaire WEP-zoutkruipmodel, dat is gekalibreerd op basis van TUC modellering, is als volgt voor caverne BAS-4 gedefinieerd:

$$dV/dt = 3V \Delta P_{\text{def}} A_2 e^{-Q/RT},$$

met: dV/dt = convergentievolumen van de caverne [m^3/dag]

V = ingesloten open cavernevolumen $\approx 1,5 \cdot 10^6 m^3$

ΔP_{def} = drukdeficiet van cavernepekkel ten opzichte van lithostatische druk [MPa]

T = temperatuur = $283 + 0,034 D = 367 K$ (op BAS-4 dakdiepte $D = 2469 mTV$)

$A_2 e^{-Q/RT}$ = lineaire zoutkruip = $0,037 \cdot 10^{-6} MPa^{-1}/dag = 13,5 \cdot 10^{-6} MPa^{-1}/jaar$.

Invulling van de bekende getallen geeft $dV/dt < 60,5 \Delta P_{\text{def}}$ [$m^3/jaar/MPa$]. Het is echter onbekend hoeveel het druktekort aan het cavernedak van BAS-4 zal zijn 70 jaar na caverneafsluiting. In de modellering van caverne BAS-3, getoond in bijlage 10, is in de beginfase als gemiddeld drukdeficiet $\Delta P_{\text{def}} = 6,5 \text{ bar}$ (0,65 MPa) toegepast. Indien men dit getal ook voor BAS-4 gebruikt volgt een caverneconvergentie $dV/dt = 39,3 m^3/jaar$.

Aangezien het restvolume aan secundaire porositeit $42.500 m^3$ bedraagt zal pekeldoorbraak vanuit de Zechstein formatie naar de Bontzandsteen pas na circa 1080 jaar optreden. Een conservatieve schatting van pekeldoorbraak leverde in geval van caverne BAS-3 een termijn van 1200 jaar op.

5 Gebalanceerd pekelpermeatiemodel

Het TUC model, dat is toegepast op de cavernes BAS-2 en BAS-3 (ref.5), is een zogenaamd gebalanceerd model, waarin voldaan moet worden aan de massabalans $Q_{\text{permeatie}} = Q_{\text{cav}}$, waarbij $Q_{\text{permeatie}}$ de pekelfiltratie in het Zechstein zoutdak voorstelt en Q_{cav} de pekelluitstroming uit de caverne door pekelopwarming en caverneconvergentie. Voor cavernes, die in thermisch evenwicht met de omgeving zijn, heeft WEP voor Frisia dit balansconcept uitgewerkt in de vorm van een stelsel vergelijkingen.

Men dient zich te realiseren dat zout een voor vloeistoffen en gassen uitsluitend ondoorlatend gesteente is, zolang de druk van deze stoffen lager is dan de gesteentedruk (korrelspanning) in het zout. In bijlage 11 is voor drie verschillende criteria voor zoutpermeabiliteit als functie van de effectieve korrelspanning σ_{teff} getoond, dat de permeabiliteit van het zout sterk toeneemt, indien de pekeldruk in de poriën van het zout uitstijgt boven de lokale lithostatische druk. Bij $\sigma_{\text{teff}} = 10 \text{ bar}$ (1 MPa) overdruk neemt de permeabiliteit al met een factor 100 à 1000 toe. In het zout heersen bij benadering isotrope spanningscondities ($K_0 \approx 1$) op basis van gravitatie, dus hoe hoger men in de formatie komt des te lager wordt de heersende lokale lithostatische druk ten opzichte van de opdringende pekkel vanuit dieper gelegen caverneregionen. In homogeen zout zal de permeatie voornamelijk in opwaartse richting plaatsvinden, omdat dat de weg van de minste weerstand is. Dit infiltratiepatroon ziet men duidelijk terug in de getoonde infiltratiezones van bijlage 8.

In het WEP model wordt een uitgebreidere versie van het IUB permeabiliteitscriterium toegepast. De helling van de permeabiliteitstoename wordt doorgetrokken naar σ_e -waarden (σ_{teff} in bijlage 11) groter dan 1 MPa. De permeabiliteit van zout is voor $\sigma_e \geq 0$ als volgt afhankelijk van σ_e :

$$K = 10^{-21} 10^{3\sigma_e} [m^2].$$

De pekelfiltratie Q_{perm} in het Zechstein zoutdak kan men beschrijven als een Darcy stroming volgens:

$$Q_{\text{perm}} = (K/\eta) (A/\Delta l) \Delta P_{ZE} \mathbf{31,536 \cdot 10^6 [m^3/jaar]},$$

met: K = zoutpermeabiliteit afhankelijk van σ_e volgens uitgebreid IUB criterium
 η = viscositeit van hogedruk verzadigde pekels @ 90 °C = $0,65 \cdot 10^{-9}$ MPa.s
 A = dakoppervlak waardoor de pekels migreert [m²]
 Δl = dikte van het geïnfilterde Zechstein zout tot bodem Bontzandsteen [m]
 ΔP_{ZE} = verschil tussen lithostatische pekeldruk aan het cavernedak P_{cav} en hydrostatische druk P_{hydroB} van de porievloeistof aan de onderkant Bontzandsteen
 1 jaar = $31,536 \cdot 10^6$ s.

De pekelinfiltratie vindt plaats tegen de zwaartekracht in. De drukgradiënt van verzadigde pekels is $\rho g_p = 0,012$ MPa/m. Zodra deze pekels de carnallietlaag gepasseerd is, migreert feitelijk carnallitische pekels in plaats van halietpekels. Carnallitische pekels is zwaarder, heeft een drukgradiënt van $0,013$ MPa/m en een driemaal hogere viscositeit. Vanuit conservatief oogpunt wordt in de volgende analyse van pekeldoorbraak toch gerekend met de beweeglijker halietpekels.

Om pekelinfiltratie in het zout te bewerkstelligen moet de pekeldruk P_{cav} hoger worden dan de lokale lithostatische druk. Het drukverschil ΔP_{ZE} wordt nu als volgt berekend:

$$\Delta P_{ZE} = (P_{\text{cav}} + \sigma_e) - (P_{\text{hydroB}} + \rho g_p \Delta l) .$$

Na afsluiting van een caverne stelt zich geleidelijk een drukevenwicht in tussen cavernepekels en omringend zout. Dit evenwicht ligt ongeveer centraal in de caverne. Door verschillen in de drukgradiënt van pekels ($0,012$ MPa/m) en het zoutlichaam ($0,0215$ MPa/m) ontstaat aan het cavernedak een overdruk in de pekels ten opzichte van de lokale lithostatische druk P_{cav} . De waarde van de overdruk wordt bepaald door de halve cavernehoogte $H/2$ maal het gradiëntverschil zout-pekels $\Delta p_g = 0,0095$ MPa/m en is medebepalend voor de verwachtingswaarde van σ_e .

De pekelluitstroming Q_{cav} uit de caverne wordt beschreven met een lineair zoutkruipmodel volgens:

$$Q_{\text{cav}} = 3V_{\text{cav}} (\Delta P_{\text{def}} - \sigma_e) A_2 e^{-Q/RT} \mathbf{[m^3/jaar]},$$

met: V_{cav} = open caverne volume [m³]
 $A_2 e^{-Q/RT} = 13,5 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹/jaar (TUC kalibratie) of $67,5 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹/jaar (WEP conservatief, ref.6)
 $\Delta P_{\text{def}} - \sigma_e$ = gereduceerd druktekort, omdat pekeldruk P_{cav} met een drukwaarde σ_e groter moet worden om pekelinfiltratie in het zoutdak te bewerkstelligen.

Het druktekort ΔP_{def} is het grootste op de bodem van de caverne en bedraagt daar ongeveer $H/2$ maal $\Delta p_g = 0,0095$ MPa/m.

Door gelijkstelling van Q_{perm} aan Q_{cav} verkrijgt men een impliciete vergelijking met σ_e als onbekende parameter. Hieruit kan men σ_e oplossen en is de pekelpermeatie op jaarbasis bekend.

Toepassing van permeatiemodel op caverne BAS-4

In geval van caverne BAS-4 worden gegevens in het WEP permeatiemodel ingevuld, die betrekking hebben op de situatie na het bereiken van thermisch evenwicht in de caverne. Vanaf circa 70 jaar na buitengebruikstelling en afsluiting van BAS-4 bepaalt zoutkruip het permeatieproces en is de invloed van resterende pekelexpansie door nog enkele graden opwarming verwaarloosbaar. Het pekelfront is op dat moment gemiddeld op een diepte van 2281 mTV aanbeland. De bodem van de Bontzandsteen ligt op een gemiddelde diepte van 2066 mTV (ref.15). De drukgradiënt van het zoute poriewater in de Bontzandsteen is circa $0,0105$ MPa/m.

De volgende gegevens zijn van toepassing: $A = 99.000$ m², $\Delta l = 215$ m (2281-2066), $P_{\text{cav}} = P_{\text{litho}} @ 2281$ mTV = $49,0$ MPa, $P_{\text{hydroB}} = 21,7$ MPa, $\rho g_p \Delta l = 2,6$ MPa, $\Delta P_{ZE} = (24,7 + \sigma_e)$ MPa, $V_{\text{cav}} = 1,49$

10^6 m^3 , $H = 170 \text{ m}$, $\Delta P_{\text{def}} = 0,8 \text{ MPa}$ ($85 \times 0,0095$). Invulling van deze gegevens en gelijkstelling van Q_{perm} aan Q_{cav} resulteert in de volgende vergelijkingen met parameter σ_e als onbekende:

- 1) **$22,34 \cdot 10^{3(\sigma_e-1)} (24,7 + \sigma_e) = 60,34 (0,8 - \sigma_e)$** (TUC kalibratie)
- 2) **$= 301,75 (0,8 - \sigma_e)$** (WEP conservatief).

Iteratief oplossen van de twee vergelijkingen geeft $\sigma_{e1} = 0,50 \text{ MPa}$ en $\sigma_{e2} = 0,64 \text{ MPa}$. Invullen van deze σ -waarden geeft als minimum permeatie $18,1 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en als maximum $48,3 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

Het restvolume aan secundaire porositeit in het Zechstein zout boven caverne BAS-4 na bereiken van thermisch evenwicht bedraagt 42.500 m^3 (zie 4.5.2). Op basis van het gebalanceerde WEP permeatiemodel betekent dat een pekeldoorbraak naar de Bontzandsteen in een tijdspanne van 880 tot 2350 jaar, gerekend vanaf 70 jaar na definitieve afsluiting van de caverne.

6 Bodemdaling na buitengebruikstelling cavernes

Dit hoofdstuk behandelt de voorschriften van Artikel 24, lid 1, sub n en o, Mbb

Zodra de migrerende carnallitische pekeldruk de top van de Zechstein formatie bereikt, lekt de pekeldruk weg in de poreuze bovenliggende Bontzandsteen, waarbij de pekeldruk afneemt van lithostatisch naar hydrostatisch. Het uit de Zechstein weglekkende pekeldruk veroorzaakt bodemdaling aan maaiveld. Er wordt conservatief verondersteld dat ieder m^3 pekeldruk, die naar hydrostatische druk terugvalt, eenzelfde volume aan bodemdaling aan maaiveld veroorzaakt, hoewel poro-elastische numerieke modellering van de processen aangeeft dat maximaal 95% van het ondergrondse lekvolume naar maaiveld kan worden doorgezet.

Analyseresultaten tijdsduur pekeldoorbraak naar de Bontzandsteen

Uit analytische modellering, gepresenteerd in hoofdstuk 4, is gebleken dat pekelpermeatie uit afgesloten cavernes als gevolg van pekelopwarming en caverneconvergentie door zoutkruip slechts op termijn leidt tot pekeldoorbraak door het Zechstein zoutdak naar de poreuze Bontzandsteen. Zelfs bij een zeer voorzichtige tijdschatting blijft doorbraak nog minstens 1000 jaar uit. Deze conclusie geldt voor alle bestudeerde Frisia cavernes met open volumes van $0,2$ tot $1,5$ miljoen m^3 .

Ter controle van deze bevindingen heeft WEP in hoofdstuk 5 een gebalanceerd permeatiemodel voor Frisia ontwikkeld. In dat model zijn twee uiterste waarden voor zoutkruip ingevoerd en toegepast op het geplande grote eindvolume van caverne BAS-4 van $1,5$ miljoen m^3 . Er is een tijdsduur van pekeldoorbraak naar de Bontzandsteen berekend, variërend van 880 tot 2350 jaar. Dit resultaat sluit goed aan bij de bevindingen uit hoofdstuk 4.

Snelheid en grootte van de bodemdaling na buitengebruikstelling cavernes

In de operationele fase van zoutwinning sinds 1995 is uit waterpassingen en massabalansen gebleken dat de bodemdaling boven een producerende caverne in het diepste punt van de bodemdalingssom circa 10 cm per miljoen m^3 caverneconvergentie bedraagt.

Indien men dit richtgetal toepast op caverne BAS-4, die in de eindsituatie een open pekeldruk van $1,5$ miljoen m^3 zou kunnen hebben en op geologische tijdschaal een migratiepotentieel van ruim $3,1$ miljoen m^3 carnallitische pekeldruk (factor $2,09$ door conversie), zou dit leiden tot een maximale na-ijlende bodemdaling van circa 31 cm . Dat is echter een volstrekt academisch getal. De bodemdaling treedt waarschijnlijk pas op na verloop van bijna 1000 jaar. Vanaf die tijd bedraagt de pekeldrukafvoer naar de Bontzandsteen hoogstens $50 \text{ m}^3/\text{jaar}$, oftewel slechts 1 cm per 2000 jaar. Bovendien heeft zout op de lange duur de neiging om in een zwaartekrachtveld net zo lang te kruipen tot alle afschuifspanningen geneutraliseerd zijn. Men kan daarom in de dalingskommen, die al aanwezig zijn bij buitengebruikstelling van de cavernes, eerder bodemverheffing ('rebound') dan bodemdaling verwachten, in ieder geval in de diepste delen van de kom gedurende de eerste 1000 jaar na afsluiting.

7 Onafhankelijke beoordeling van modellering pekelpermeatie

Bij de modellering van de geomechanische en hydraulische processen in de diepe ondergrond wordt in dit actualiseringsrapport regelmatig verwezen naar een esco/Frisia rapport uit 2014 (ref.6). Op verzoek van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft Prof. Dr. J.L. Urai in 2017 de modellering van pekelpermeatie in dat rapport beoordeeld (ref.17). Vervolgens heeft esco/Frisia deze externe beoordeling van commentaar voorzien (ref.7). De voor het huidige actualiseringsrapport meest essentiële onderdelen uit het commentaar worden in deze sectie besproken.

Filosofie achter het beoordeelde rapport

Het primaire doel van het rapport uit 2014 is aan te tonen dat een 'harde' afsluiting van caveerne BAS-3 geen veiligheids- of milieurisico oplevert op de korte en lange termijn. Een harde afsluiting houdt in dat *niet* wordt gewacht tot de af te sluiten caveerne in thermisch evenwicht verkeert met het omringende zoutlichaam. Eventueel wordt zelfs een klein volume aan hogedrukpekel nagepompt om caveerneconvergentie en na-ijlende bodemdaling als gevolg van zoutkruip meteen te verhinderen. Voornoemde procedure vormt een invulling van het gestelde in Artikel 25, lid 1, sub f, Mbb.

Een essentieel aspect bij afgesloten pekелgevolde cavernes in de diepe ondergrond is de onomkeerbaarheid en onbeheersbaarheid van de meeste ondergrondse processen. De 2014-studie heeft zich voornamelijk gericht op de slechtst-denkbare globale situatie om niet verstrikt te raken in onzekere en relatief onbelangrijke details op het gebied van geologie en procesdynamica. Met uitzondering van de vorming van secundaire porositeit in het zout zijn detail-aspecten als lokale inhomogeniteiten en plooiing in de Zechstein zouten, scheurvorming op micro-schaal en andere microfysische processen buiten beschouwing gelaten. Er is niet zozeer gestreefd naar het beste academische antwoord, als wel naar een pragmatische beoordeling van de meest voor de hand liggende 'worst-case' invloeden van een afgesloten caveerne op de ondergrond en bovengrond.

Aanbevelingen uit de onafhankelijke beoordeling

Urai geeft aanbevelingen om de onzekerheden in de voorspelde permeatie- en migratieprocessen, veroorzaakt door het afsluiten van een caveerne, te verkleinen. Het betreft de vormingssnelheid en geometrie van de pekellekpaden in de Zechstein zouten en de bovenliggende Bontzandsteen.

De meeste aanbevelingen zijn te academisch voor het gestelde doel van het 2014-rapport. Ze betreffen detaillering van de geologie en hydrodynamische processen in de Zechstein formatie op micro-schaal. Afgezien van het feitelijk ontbreken van de hiervoor benodigde informatie, heeft een zoutproductiebedrijf er ook geen behoefte aan om veel geld en moeite te steken in het verkrijgen van representatieve 3D-seismische data, en gegevens uit niet-standaard boorgatmetingen en laboratoriumproeven aan volledige trajecten van boorkernen.

Enkele aanbevelingen voor nader onderzoek en detaillering zijn waar mogelijk overgenomen en verwerkt in dit actualiseringsrapport. Het betreft in essentie de volgende onderwerpen:

- Hydraulische breukvorming op macroscopische schaal. Onderzocht is dat deze niet kan optreden in het geval van de afgesloten Frisia cavernes (ref.8).
- Herziening permeatie en bodemdalingsvoorspellingen. Veel aandacht is besteed aan de conversie naar carnallitische pekел waarbij het pekелvolume met een factor 2,09 toeneemt. Op analytische wijze is het effect van pekелopwarming op de migratiesnelheid onderzocht. De tijdschaal van de pekelmigratie door de Zechstein formatie na bereiken van thermisch evenwicht is nader onderzocht met een nieuw ontwikkeld gebalanceerd permeatiemodel. De 'worst-case' bodemdalingsvoorspellingen na afsluiting van een caveerne zijn herzien en gepreciseerd.
- Pekелbergingszone in poreuze bovenliggende gesteenten en aanwezigheid afdichtende schalielagen tegen verdere pekелinfiltratie in de diepe ondergrond. De doelmatigheid van de Bontzandsteen als bergingszone is in meer detail beschreven. De beperkte geografische reikwijdte van de afdichtende Zurich schalie in het gebied is meegenomen. De capaciteit van de bergingszone noordoostelijk in vergunningsgebied Barradeel II wordt mede bepaald en vergroot door de Vlieland zandsteen. De bovenliggende dikke Vlieland schalies zorgen bij ontbreken van de

Zurich schalie voor de regio-brede ultieme blokkering van pekelinfiltratie vanuit de beide bergingsgesteenten naar geringere diepten.

8 Samenvattende conclusies

De Aanvraag tot wijziging van het Instemmingsbesluit 2012 van het geactualiseerde winningsplan Barradeel II heeft nauwelijks consequenties voor de bestaande teksten van het Winningsplan Barradeel II uit 2004 en de Actualisering uit 2012. In feite hoeft slechts één onderdeel te worden toegevoegd, namelijk 'Buitengebruikstelling van de cavernes in Barradeel II' met een nadere geotechnische toelichting betreffende de korte en lange-termijn effecten in de ondergrond en aan maaiveld als gevolg van de definitieve afsluiting van vergrote cavernes.

De officiële 2011-prognosekaart voor bodemdaling door zoutwinning op het moment van beëindiging van de zoutproductie, op uiterlijk 31 december 2021, wordt door Frisia ongewijzigd gehandhaafd. Deze kaart uit de Actualisering 2012 van het winningsplan Barradeel II is voor de volledigheid nogmaals getoond in bijlage 12 (ref.18). De recentste actualisatie van de kaart is getoond in bijlage 1. Die kaart vertoont afgezien van de diepste punten fractioneel minder bodemdaling dan de officiële kaart uit 2011. De dalingsschotels zijn enigszins krapper geworden. Vanuit conservatief oogpunt is het beter dat herstelmaatregelen voor de waterhuishouding op basis van de officiële 2011-kaart worden uitgevoerd.

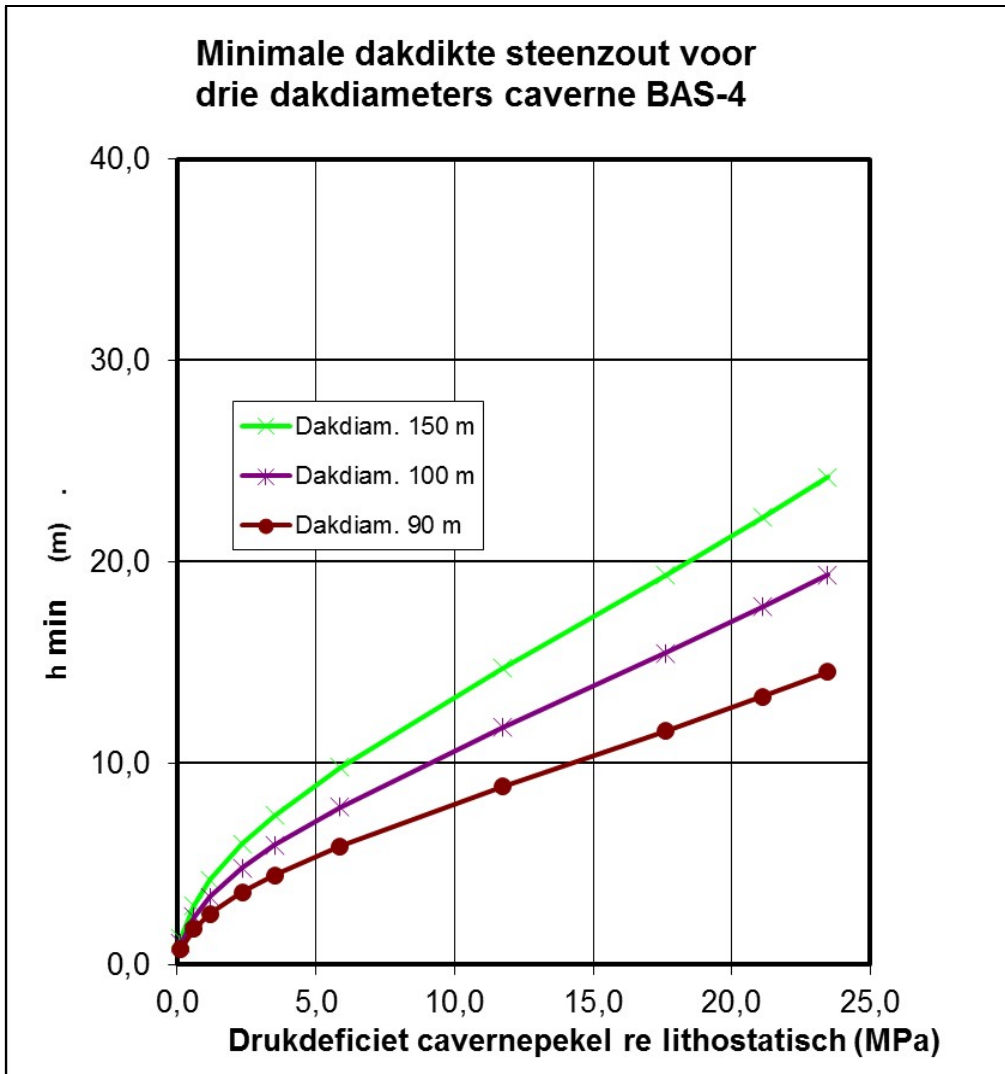
Na beëindiging van de zoutproductie en de definitieve buitengebruikstelling van de cavernes is volgens de analyses in dit rapport pas een aanvang van na-ijlende bodemdaling te verwachten na verloop van circa 1000 jaar. De na die periode te verwachten bodemdaling bedraagt slechts 1 cm per 2000 jaar. Indien 'rebound' (terugvering bodemdaling door regionale zoutkruip) gaat optreden, zal de bodemdaling op de lange termijn zelfs verwaarloosbaar zijn in de diepste delen van de huidige dalingskommen.

9 Referenties

1. Uitvoering beheerscyclus van meet- en regelprotocol 'Barradeel II' over het jaar 2015, v.4 (final), esco/Frisia Zout B.V., 27 juli 2016.
2. Ronde schijven en platen, , Sectie Constructiemechanica, T.U. Delft, februari 2008.
3. Bewertung früherer Standsicherheitsuntersuchungen unter Einbeziehung aktueller Laborversuche an Kernmaterial der Bohrung 480, Abschlussbericht BGR, Hannover, Juni 2007.
4. Technische Bijlage bij Meet- en regelprotocol winningsplan 'Barradeel II', Bodemdalingsprognoses, definitieve afsluiting van cavernes en beheersing bodemdaling, v.6 (definitief), esco/Frisia Zout B.V., 11 november 2014
5. Untersuchung der konvergenzinduzierten zeitlichen und räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge, Abschlussbericht, TU Clausthal, Dezember 2010.
6. Definitieve afsluiting van caveerne BAS-3, Modellerings van pekelpermeatie en -migratie en consequenties van pekelpermeatie naar carnallitische pekelp, esco/Frisia Zout B.V., 5 november 2014.
7. Comments on review by J.L. Urai, dated 15 April 2017, concerning report: 'Definitieve afsluiting van caveerne BAS-3' by , 5 November 2014, v.2.def, esco/Frisia Zout B.V., 31 July 2017.
8. Issues pertinent to the abandonment of deep brine-filled Frisia caverns. Discussion paper, esco/Frisia Zout B.V., v.2.corr (final), 1 February 2017.
9. Addendum DUY Definitieve afsluiting caveerne BAS-3 v.1.def, and Geo-mechanical and technical aspects of BAS-2 final abandonment, v.2, esco/Frisia Zout B.V., 11 July 2017.
10. Memo detailoverzicht vloeistofmigratie in BAS-2, v.1, esco/Frisia Zout B.V., 16 juni 2017.
11. Vinkega Field Vlieland Evaluation, Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V., January 2010.

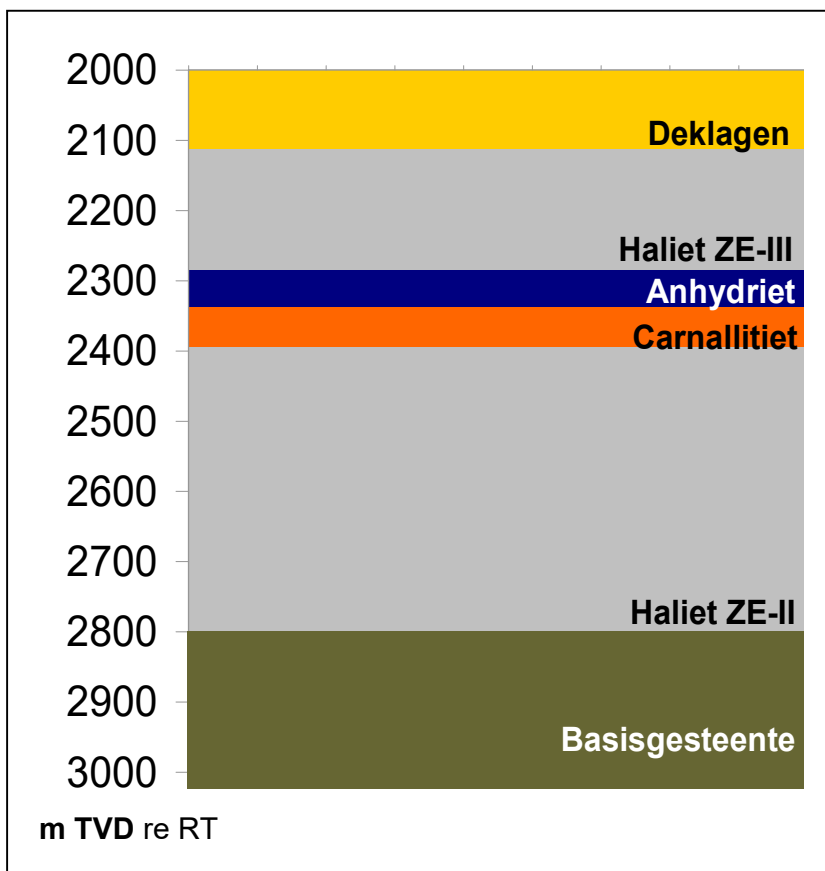
12. Long-term behaviour of sealed brine-filled cavities in rock salt mass – A new approach for physical modelling and numerical simulation, K. *et al.*, SMRI Fall 2006 Conference, Rapid City, South Dakota, USA, October 2006.
13. Development of damage and permeability in deforming rock salt, O. Schultze *et al.*, Engineering Geology 61, 2001.
14. Thermal effects in salt caverns, M. Karimi-Jafari *et al.*, SMRI Spring 2007 Conference, Basel, Switzerland, April 2007.
15. End-of-well report BAS-4, esco/Frisia Zout B.V., August 2004.
16. High pressure cavern analysis, *et al.*, SMRI Research Project Report No.2002-2, October 2002.
17. Review of the report: Definitieve afsluiting van caveerne BAS-3, by Dr. Ir. A.J.H.M. Duquesnoy (05.11.2014), *et al.*, Geostructures, Consultancy for Structural Geology, and Geomechanics, Hunnenweg 9, 6224 JN Maastricht, 15 April 2017.
18. Actualisering Winningsplan voor winningsvergunning 'Barradeel II', v.2.6, esco/Frisia Zout B.V., 13 oktober 2011.
19. Subsurface structure of the Netherlands – results of recent onshore and offshore mapping, E. Duin *et al.*, Neth.J.Geosc. 85-4, 2006.
20. Overeenkomst inzake maatregelen in het gebied Franekeradeel-Harlingen die mede verband houden met de bodemdaling als gevolg van zoutwinning, Frisia Zout B.V., 4 november 2013.

Bijlage 2: Minimaal voor cavernestabiliteit vereiste zoutdakdikte



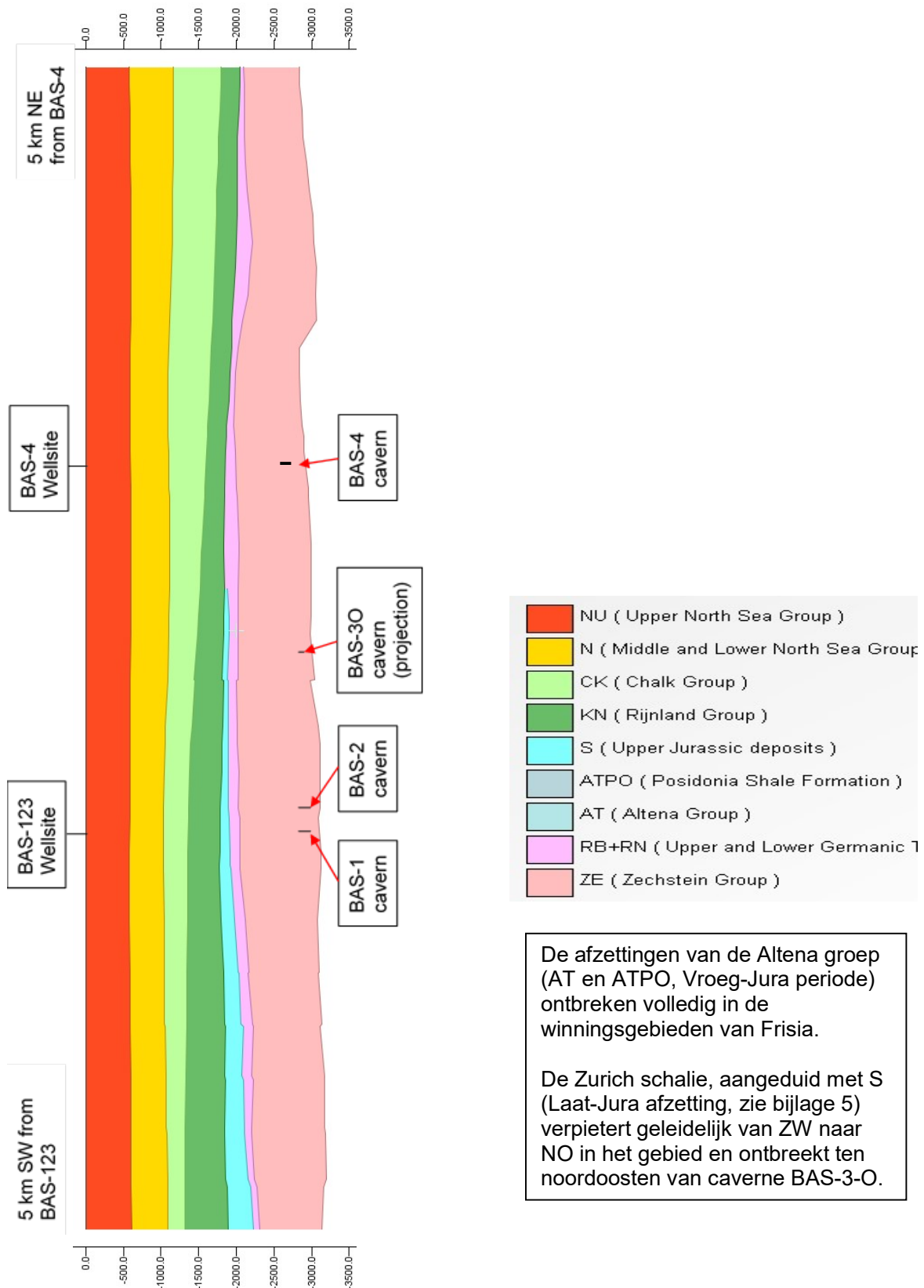
Het maximale druktekort van 23,5 MPa in de caverne ontstaat bij open wellhead, waarbij de pekeldruk in de caverne hydrostatisch wordt.

Bijlage 3: Stratigrafie van Zechstein zoutpakket in Barradeel II winningsgebied

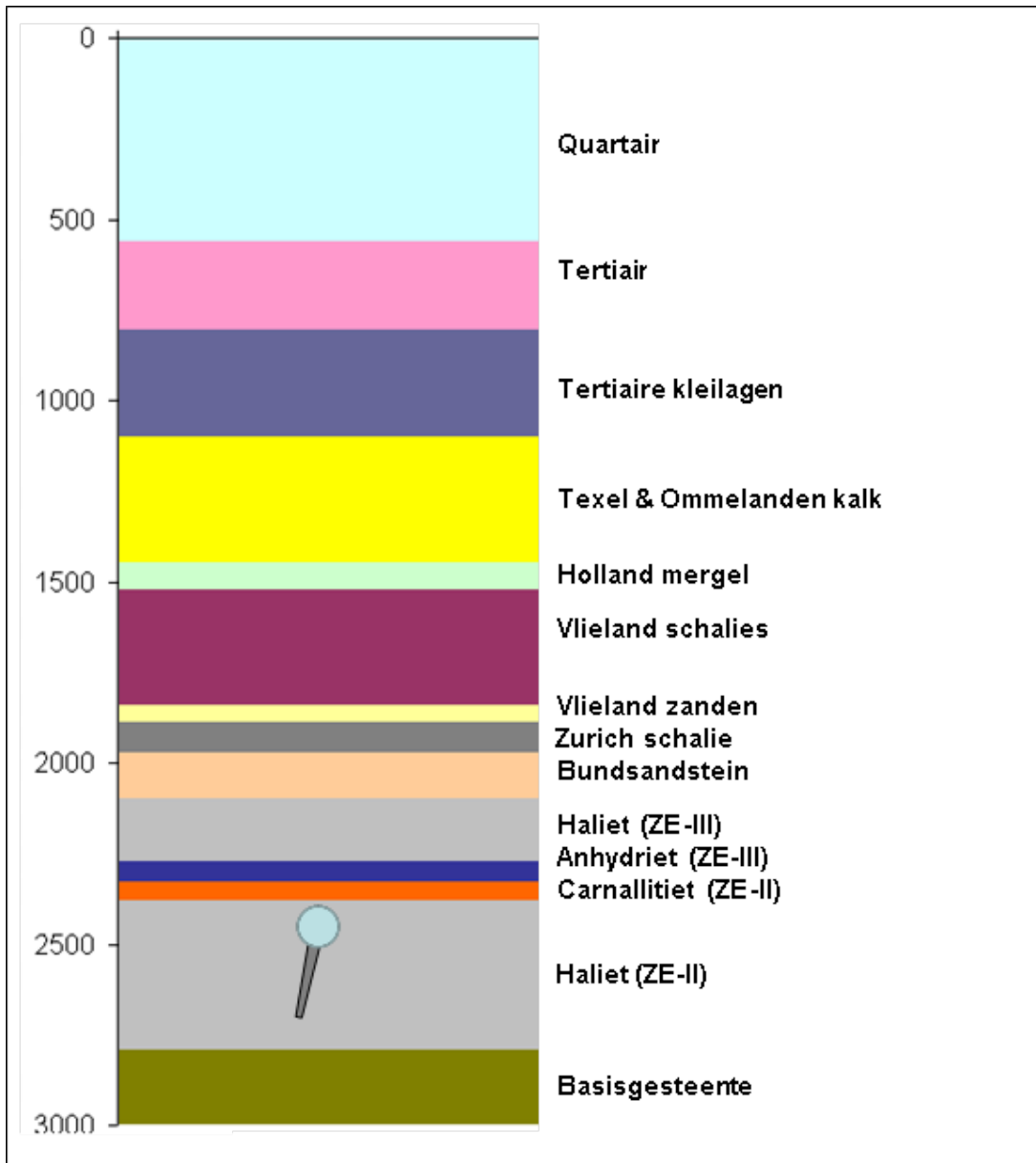


De dieptes op de linkerass zijn aangegeven in m TVD t.o.v. RT (Rotary Table), met RT @ +10 m NAP. In de oudere winningsvergunning Barradeel liggen de zoutlagen ongeveer 150 m dieper. Het steenzout wordt gewonnen uit de Haliet ZE-II laag, die Stassfurt genoemd wordt. De steenzoutlaag Haliet ZE-III wordt Leine zout genoemd. Hieruit wint Frisia geen zout. De carnalliethoudende zoutlaag wordt als Carnallitiet aangeduid.

Bijlage 4: Stratigrafie van Zechstein deklogen in Barradeel en Barradeel II winningsvergunningen

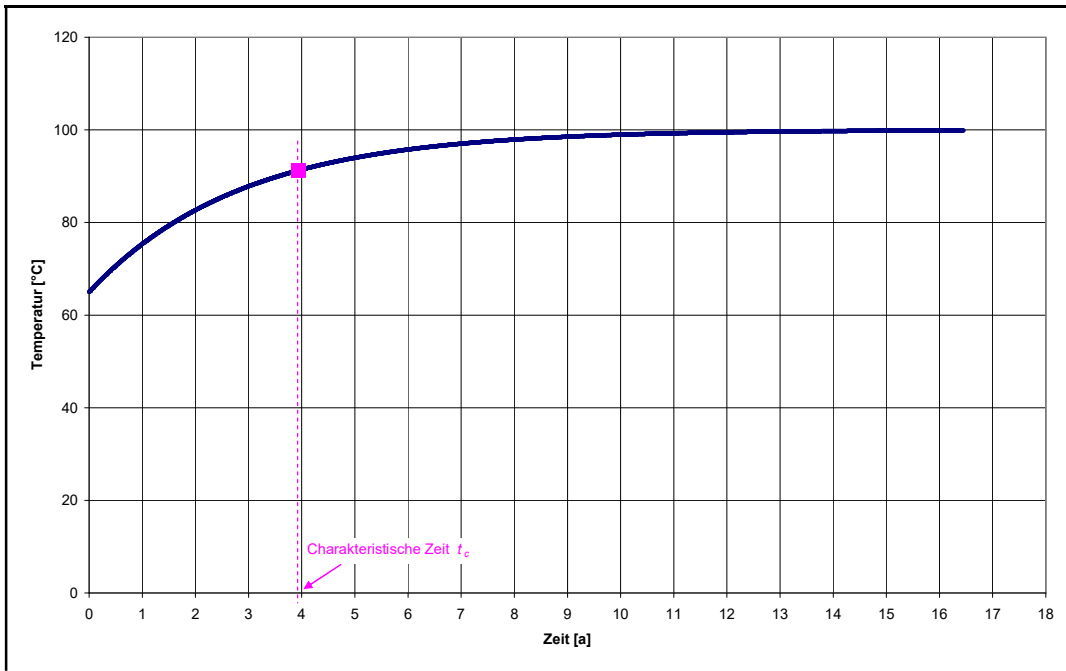


Bijlage 5: Volledige stratigrafie in de omgeving van de cavernes BAS-3 en BAS-3-O

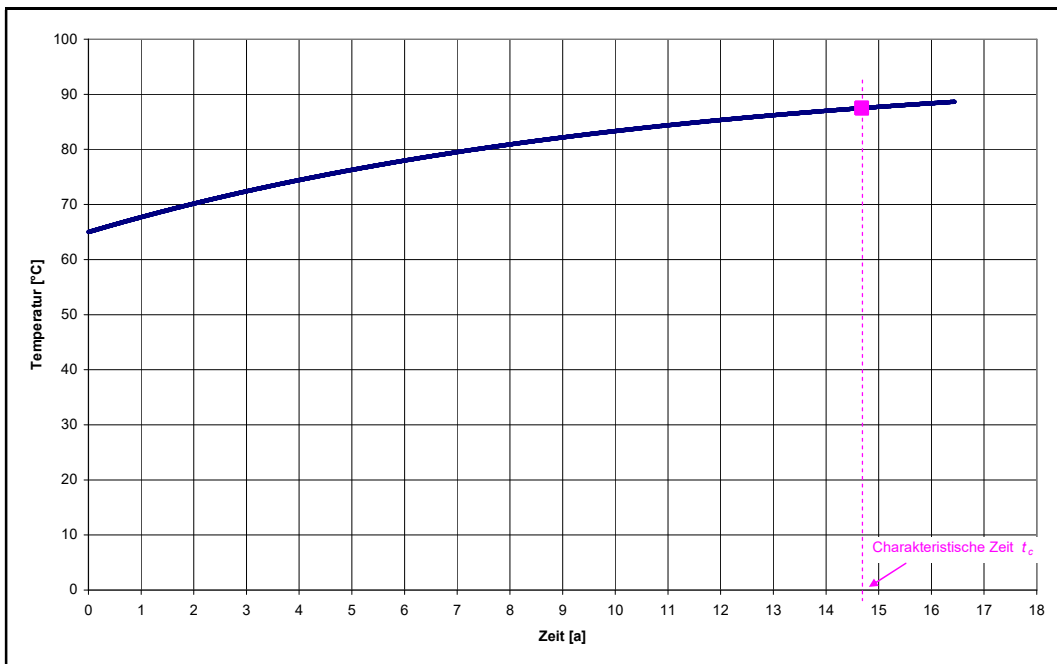


Volledige stratigrafie met diepteaanduiding in m TVD t.o.v. RT van de gesteenten boven de in september 2014 definitief afgesloten caverne BAS-3 (blauwe bol met grijze sump-staart). De laag aangeduid als 'Bundsandstein' is een samentrekking van de poreuze ZE-IV kleisteen (Perm periode) en de Onder-Bontzandsteen (feitelijk een kleisteen), die tot de Trias periode behoort (= RB+RN in bijlage 4). Beide kleistenen hebben vergelijkbare hydraulische eigenschappen. De Zurich schalie is afgezet in de Laat-Jura periode, aangeduid in bijlage 4 met S. De Vlieland zanden en schalies en de Holland mergel behoren tot de Rijnland groep (uit Krijtperiode), die in bijlage 4 wordt aangeduid met KN en daar niet is onderverdeeld.

Bijlage 6: Ontwikkeling pekelt temperatuur in cavernes BAS-2 en BAS-3 na insluiting

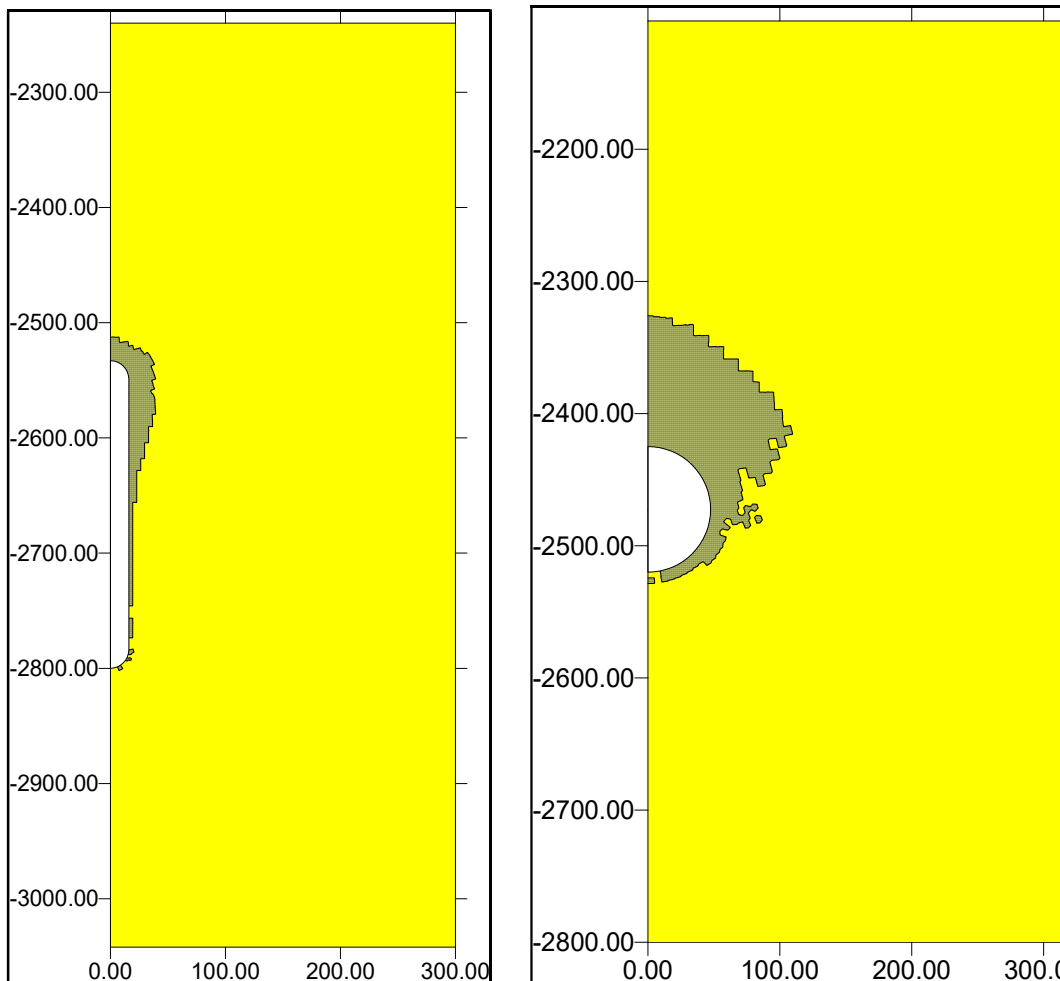


Caverne BAS-2: na een karakteristieke tijd van 4 jaar is 75% van de aanvankelijke temperatuurkloof van 34 °C tussen cavernepekkel (208.000 m³) en omringend zout overbrugd.



Caverne BAS-3: na een karakteristieke tijd van 14,7 jaar is 75% van de aanvankelijke temperatuurkloof van 31 °C tussen cavernepekkel (475.000 m³) en omringend zout overbrugd.

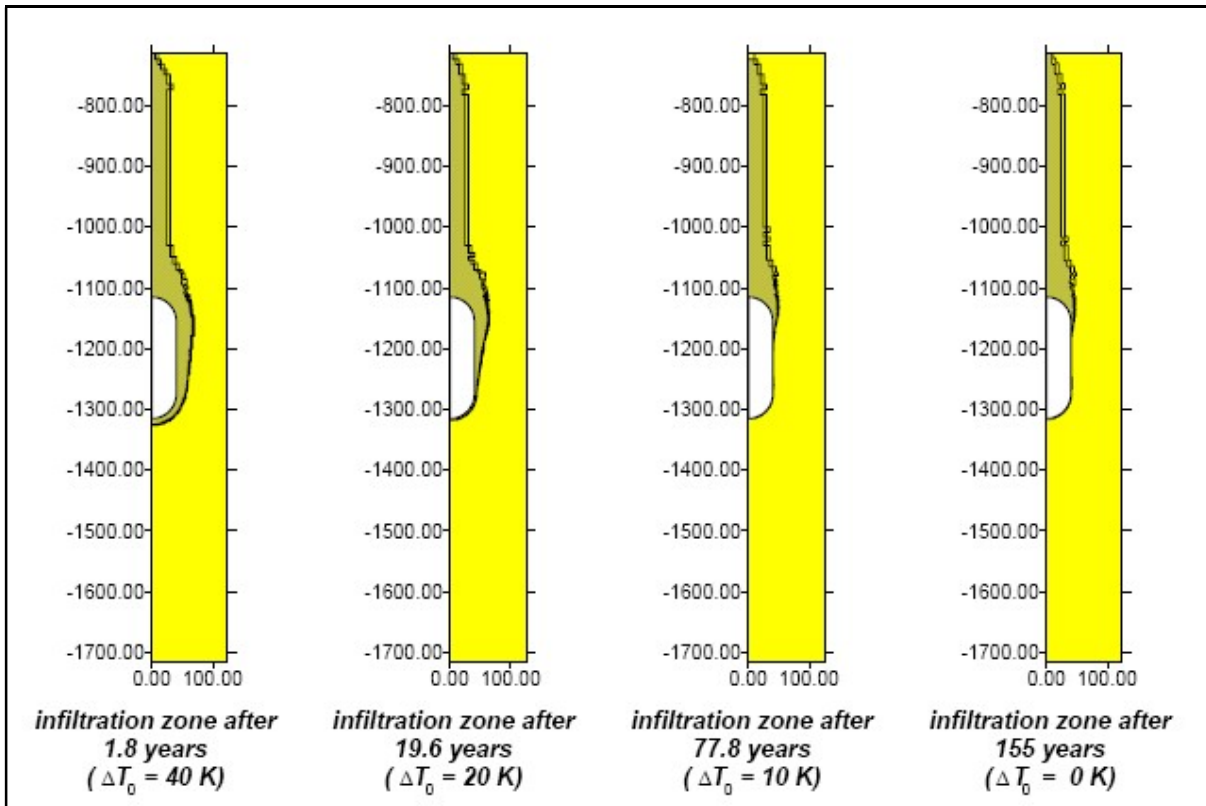
Bijlage 7: Pekelinfiltratiezones cavernes BAS-2 en BAS-3 volgens TUC model



Linker figuur: Infiltratiezone caverne BAS-2 in november 2010 na zes jaar afsluiting

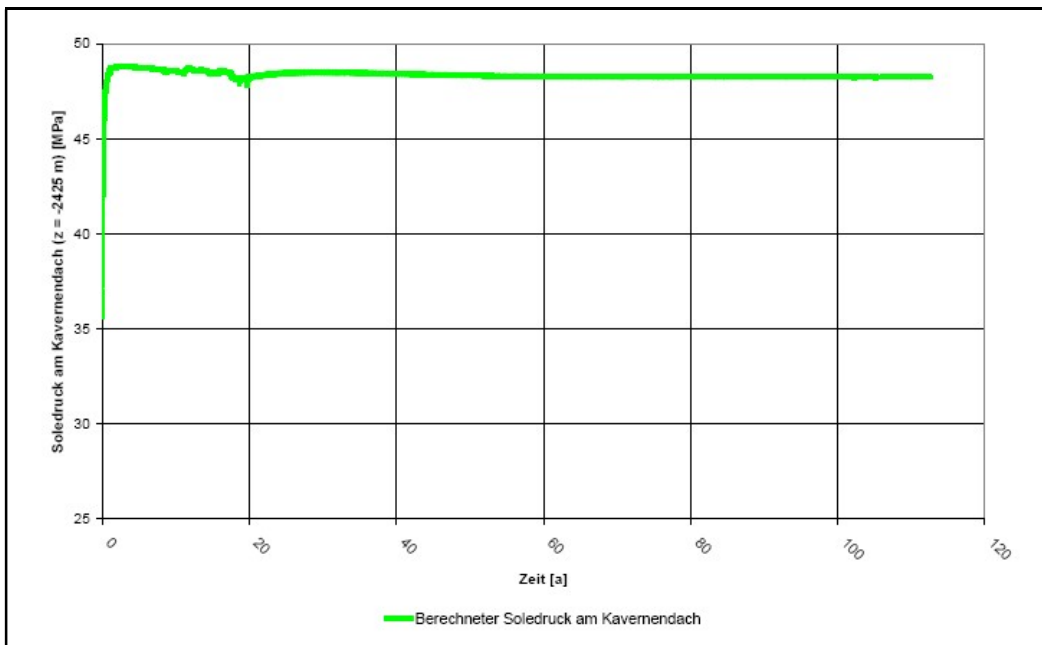
Rechter figuur: Infiltratiezone caverne BAS-3 na 110 jaar afsluiting. Het cumulatieve pekelinfiltratievolume bedraagt 30.500 m³.

Bijlage 8: Infiltratiezone TUC model na pekeldoorbraak als functie van de temperatuurkloof

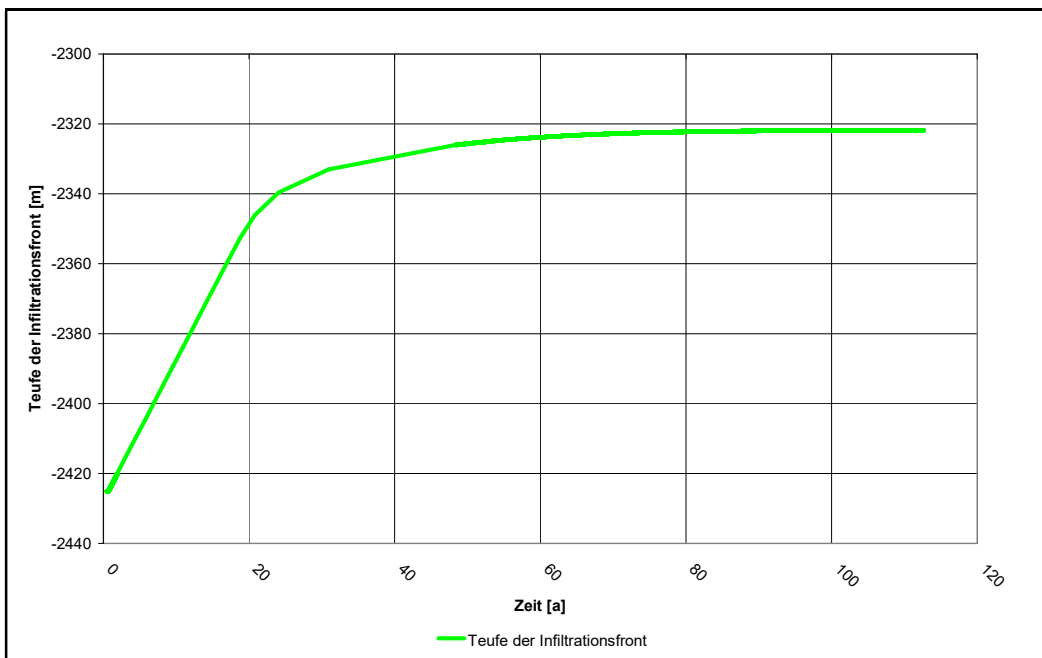


De getoonde rekenvoorbeelden hebben betrekking op een standaard caverneconfiguratie, ontleend aan het caverneveld Etzel in Noord-Duitsland (ref.13). Op circa 700 m diepte ligt de top van het Zechstein zoutlichaam (gele kleur), waarboven een poreus gesteente ligt. De infiltratiepatronen na pekeldoorbraak in het poreuze gesteente zijn schoorsteenvormig en grotendeels identiek voor de vier gemodelleerde temperatuurkloven ΔT_0 ten tijde van afsluiting van de caverne. De tijdsduur tot de pekeldoorbraak in het poreuze gesteente hangt echter sterk af van ΔT_0 .

Bijlage 9: Ontwikkeling pekeldruk en permeatie na afsluiting caverne BAS-3

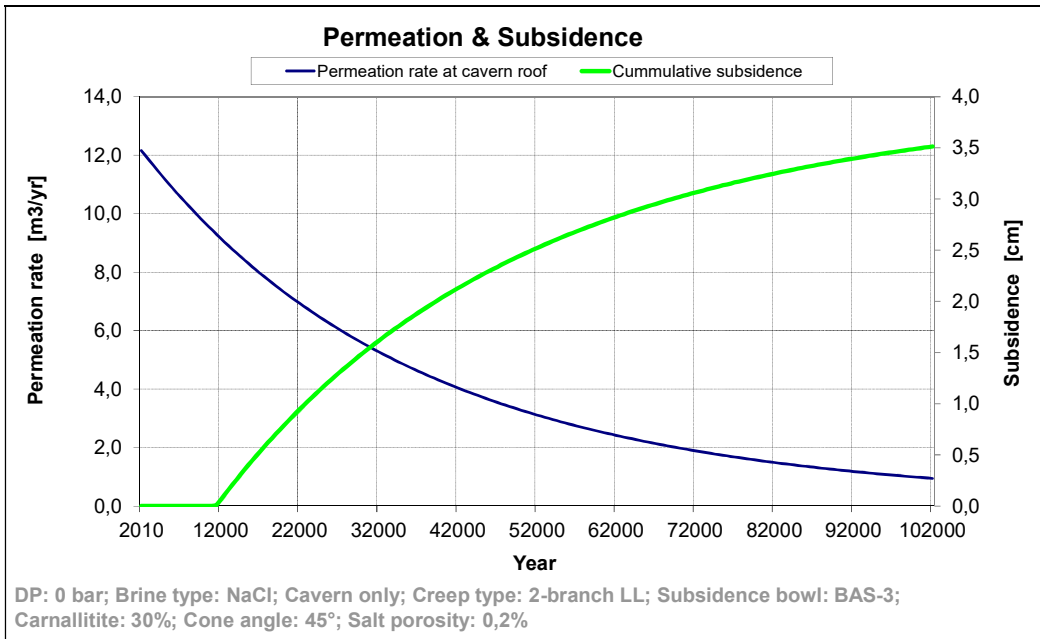


Ontwikkeling pekeldruk na insluiting caverne BAS-3. Na twee jaar is de pekeldruk tot iets boven lithostatisch gestegen onder invloed van pekelopwarming. Na circa 50 jaar is het effect van pekelopwarming geheel uitgewerkt.



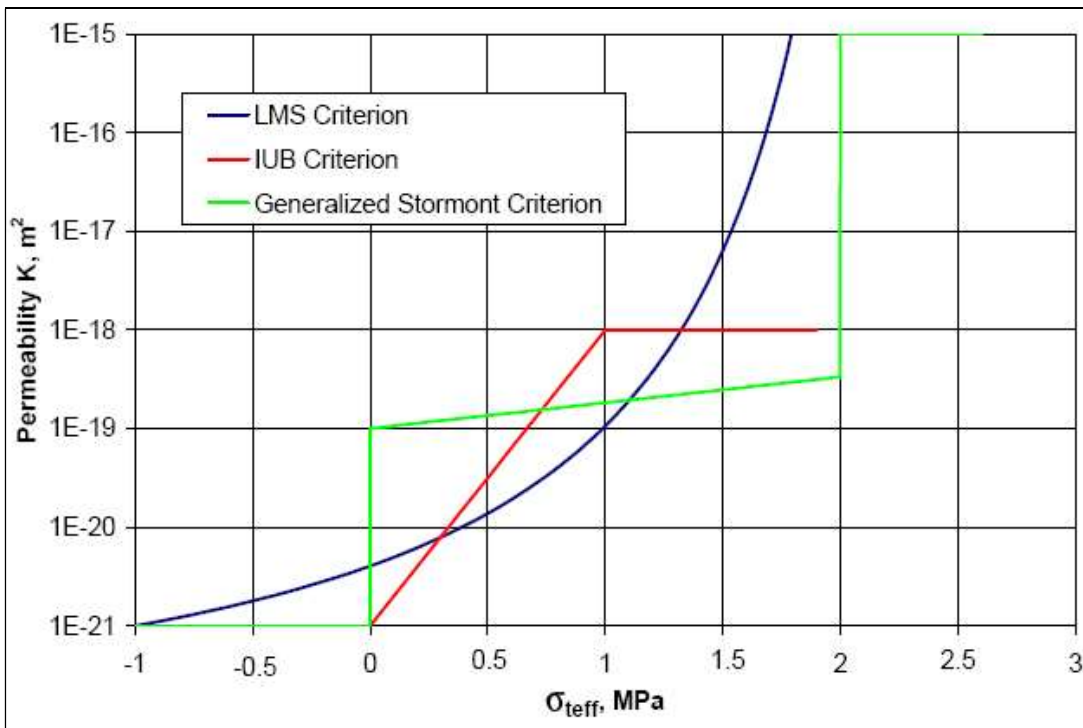
Pekelinfiltratie in caverne BAS-3. Na 50 jaar is het temperatuur effect praktisch verdwenen. De pekeldruk is dan 100 m in het dak doorgedrongen. Daarna vertraagt de pekelpermeatie aanzienlijk tot 4 mm per jaar, omdat alleen geringe caverneconvergentie door zoutkruip als aandrijving overblijft.

Bijlage 10: Tijdsverloop pekelpermeatie en bodemdaling caverne BAS-3



Caverne BAS-3. Permeatievolume per jaar (donkerblauwe curve) en bodemdaling (groene curve) in de loop van 100.000 jaar berekend met een lineair WEP-kruipmodel met een op TUC modellering gebaseerde kalibratie. Het Zechstein zoutlichaam van cavernedak tot aan de Bontzandsteen is in totaal 321 m dik. Als permeatiepatroon in het zout is een omgekeerde kegel met tophoek 45° genomen. Het volume aan secundaire porositeit (0,2%) in de kegel bedraagt circa 110.000 m³ (ref.6, bijlage 6b). Na circa 10.000 jaar treedt volgens het WEP model de eerste uitstroming van pekkel in de Bontzandsteen op, gevolgd door bodemdaling aan maaiveld.

Bijlage 11: Criteria voor zoutpermeabiliteit als functie van σ_{eff}



Drie verschillende criteria voor de verandering van de permeabiliteit van steenzout als functie van de effectieve vloeistofspanning op het zout uitgeoefend, waarbij $\sigma_{eff} = P - \sigma_t$. In zout is σ_t (t = tangentieel) ongeveer gelijk aan de lokale lithostatische druk P_{litho} . Indien de pekeldruk P is, geeft $\sigma_{t,eff}$ de overdruk van de pekels ten opzichte van de lithostatische druk aan.

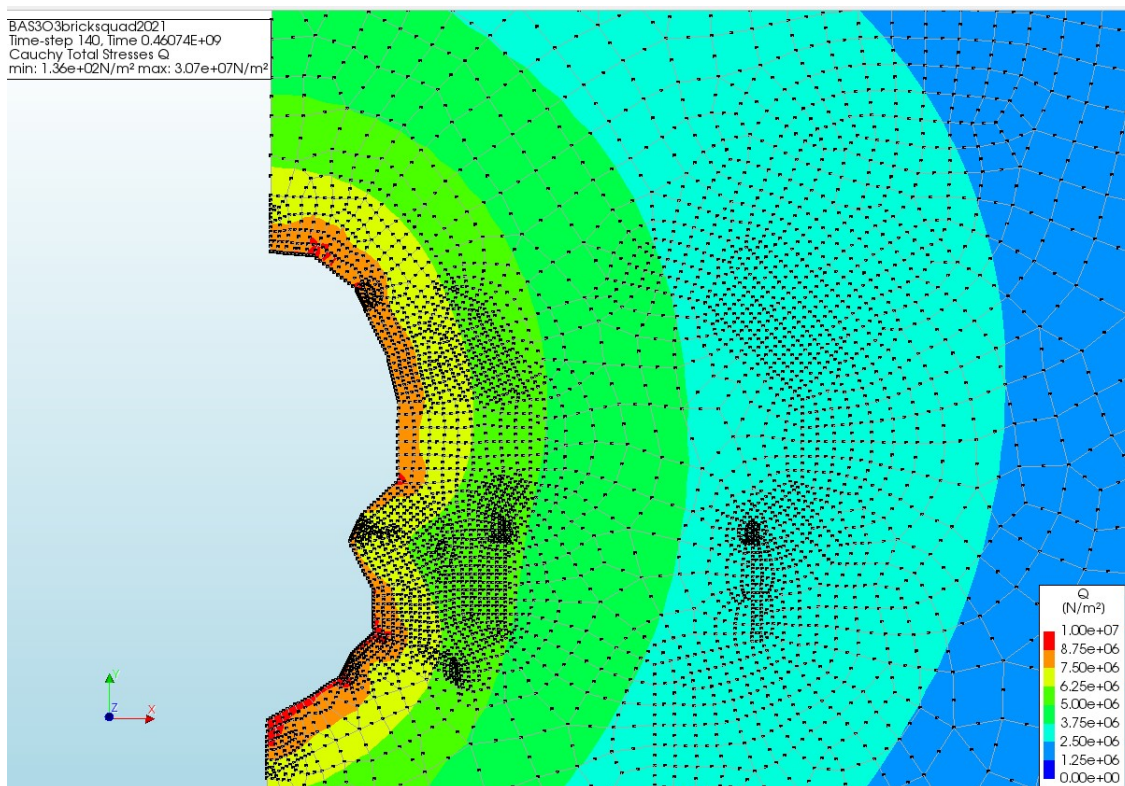
(Bron: ref.16).

Bijlage 13: Berekeningen DIANA eindige elementen modellering

De drukdaling in de caverne geeft een toestroming van zout naar de caverne. Er bouwen zich met name tangentiële spanningen op ('hoop-stresses'), die het gebrek aan pekeldruk opvangen. Het verschil tussen met name de tangentiële spanningen (richting z in axiaal-symmetrisch model) en de normaalspanning (x richting in het midden; y richting bij dak en bodem) geeft kruip van zout met een inwaartse beweging. Figuur 13.1 geeft de spanningcontouren in Von Mises stresses, gelijk aan differentieel (verschil) spanningen voor een laboratorium situatie, waarin de twee radiale spanningen identiek zijn. De Von Mises spanning geeft daarmee een goede vergelijking voor laboratoriumtesten voor kruip of bezwijken, maar neemt de derde richting mee, indien deze niet gelijk is aan de grootste of kleinste (hoofd)spanning.

Caverne BAS-3-O

Het plaatje in Figuur 13.1 toont de schuifspanningen bij een cavernedruk van 60% van lithostatisch, ongeveer 0,13 bar/m en net boven het theoretische drukminimum van 0,12 bar/m, dat echter door stromingsrestricties door de verbuizing nooit gehaald kan worden.

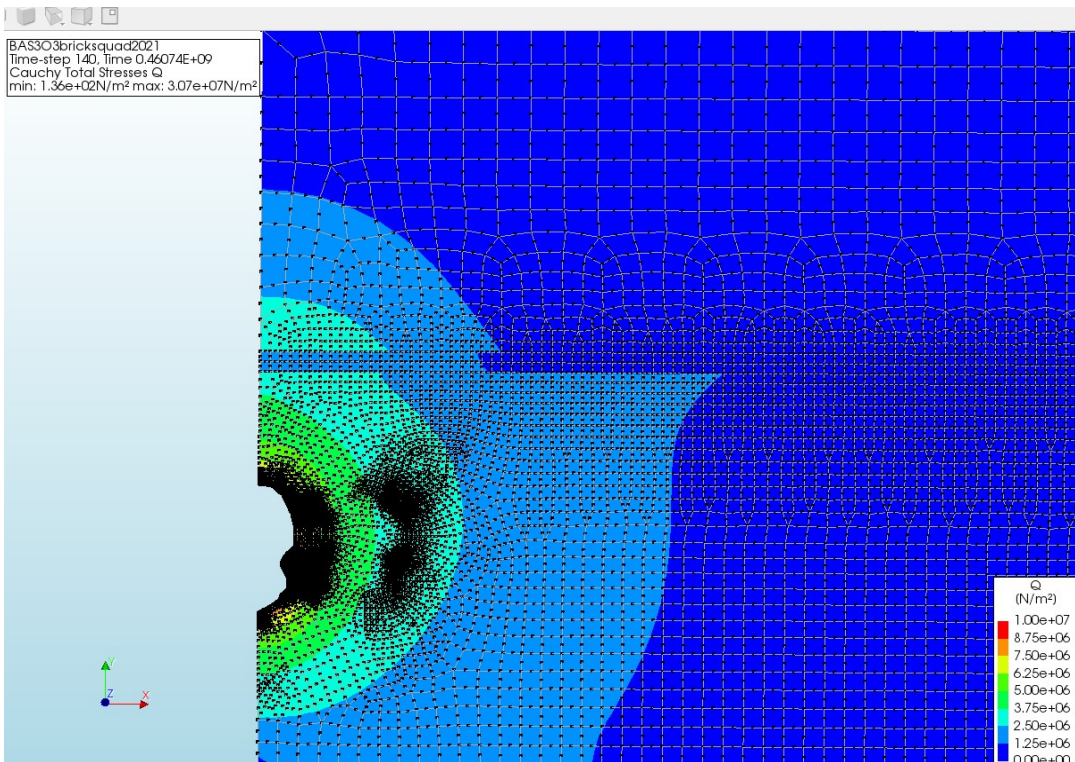


Figuur 13.1: Von-Mises spanningen aan de cavernewand bij halmostatische druk (= hydrostatische pekeldruk) in caverne BAS-3-O.

In het uitgezoomde plaatje van Figuur 13.2 is ook de Von Mises-spanning te zien van de carnallietlaag en de bovenliggende ZE-III halietlaag. De carnallietlaag heeft 10 keer snellere kruipparameters dan de ZE-II halietlaag en fungeert daarmee als een soort afschuiflaag, wat te zien is in het plaatje als de dunne horizontale band met lagere spanningswaarden boven de caverne.

Caverne BAS-3-O veroorzaakt weinig bodemdaling, omdat de put vanaf het begin onder hoge druk wordt gelooft. Bodemdaling rond BAS-3-O is voornamelijk een effect van de nabijgelegen definitief verlaten caverne BAS-3. De berekende bodemdaling komt goed overeen met de gemeten vorm. De dalingskom, die uit de gemodelleerde caverne komt, kan het best beschreven worden met

Gaussische komparameters $\gamma = 4,5 \cdot 10^{-7}$ en $\delta = 1,95$, vrijwel gelijk aan de parameters van de best-fit kom, die gebaseerd is op waterpasmetingen.



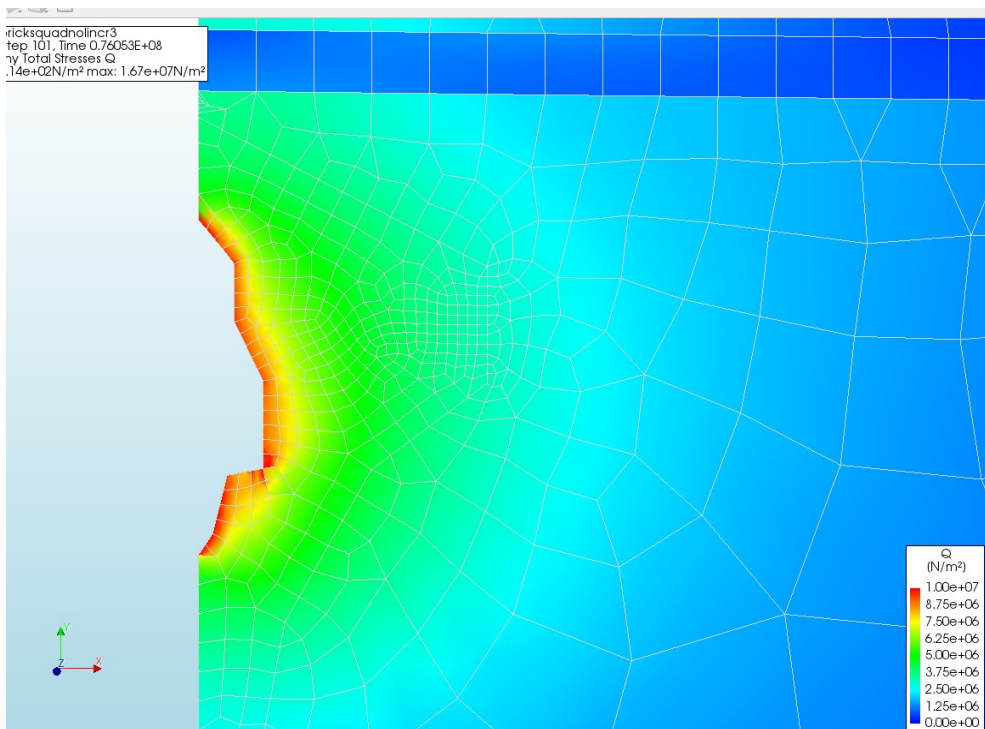
Figuur 13.2: Von Mises spanningen bij halmotostatische caverneedruk voor BAS-3-O. De band boven de caverne is de carnallitietlaag. Daarboven zit het Zechstein-III halietzout.

Caverne BAS-4

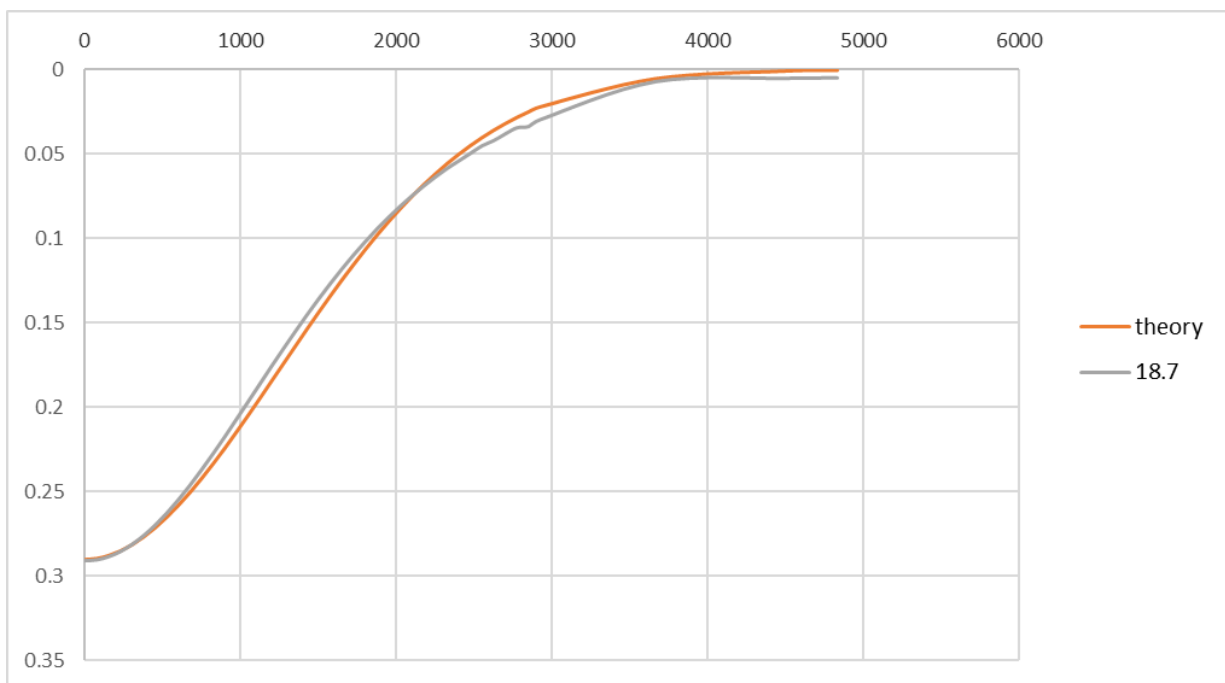
Bij caverne BAS-4 zijn de Von Mises-spanningen geplot als gevolg van hydrostatische pekewinning in 2005-2017. Vanaf februari 2018 wordt de pekeldruk geleidelijk verhoogd naar lithostatisch met behulp van een plunjer-injectiepomp. De cavernevorm in Figuur 13.3 heeft echter al de verwachte vorm van eind 2021. In het model is de maximale Von Mises-spanning circa 9 MPa (op enkele hoekpuntjes na). De carnallitietlaag valt ook hier op door een lagere schuifspanning. Het caverneedak is niet erg breed is en gemiddeld circa 90 m verwijderd van de carnallitietlaag. De spanning in het dak van BAS-4 zal nauwelijks hoger zijn dan in het dak van BAS-3-O met een dakdikte van 100 m.

De bodemdalingsskom uit de numerieke modellering voor BAS-4 komt, na enige afstemming van de materiaalparameters, goed overeen met de gemeten en gemodelleerde Gaussische dalingscurve, zoals Figuur 13.4 toont.

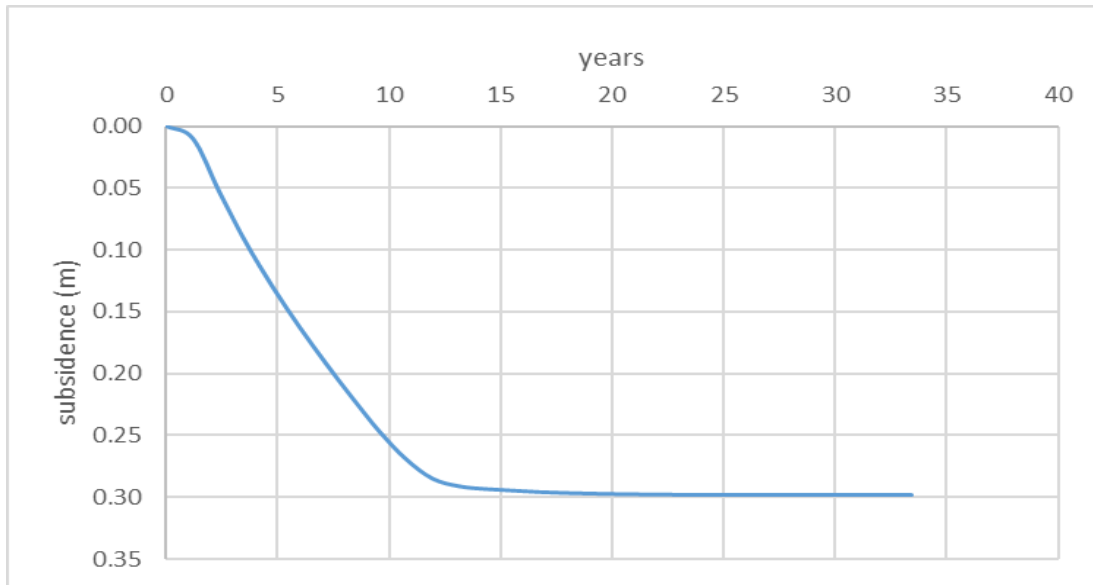
Het verloop in de tijd voor het diepste punt boven caverne BAS-4 is weergegeven in Figuur 13.5. De bodemdaling vakt af na jaar 10 (2015) door de iets hogere gehanteerd pekeldruk en dan veel sterker vanaf jaar 12 (2018) waar aangenomen wordt dat de caverneedruk op 90% van lithostatisch komt. Na 2021 (insluiting en monitoring) wordt de druk 95% van lithostatisch. Dat leidt feitelijk tot een beëindiging van de bodemdaling, namelijk minder dan 1 mm tussen 2025 en 2038. Dit lijkt goed overeen te komen met de situatie boven de cavernes BAS-1 en BAS-2, waar de bodemdaling niet meer meetbaar is, maar de tijd nog te kort is om een eventuele 'rebound' te zien, een proces dat vermoedelijk tientallen jaren of langer duurt.



Figuur 13.3: Von Mises spanningen bij hydrostatische cavernedruk voor BAS-4 (cavernevorm 2021). De blauwe band boven de caveerne is de carnallitietlaag.



Figuur 13.4: Bodemdaling boven caveerne BAS-4 in 2021, zoals uit de eindige elementen analyse volgt ('18.7', naar de time-stamp in jaren) en de Gaussian best-fit voor deze kom ('theory').



Figuur 13.5: Maximum bodemdaling boven caverne BAS-4 in de periode van 2005 ('0-years') tot 2045 ('45-years'), zoals uit de eindige elementen analyse volgt. De cavernedruk na 2021 (jaar 16) is conservatief aangenomen als 95% van lithostatisch. Zelfs dan is de na-ijlnde bodemdaling als gevolg van caverneconvergentie verwaarloosbaar.