

Definitieve afsluiting van caverne BAS-3

Modellering van pekelpermeatie en -migratie en consequenties
van pekelconversie naar carnallitische pekel



Vorbereiding: Well Engineering Partners B.V.
Hoogeveen

Auteur:

Verificatie:

Versie: 1 (definitief)

Publicatiedatum: 5 november 2014

Goedkeuring: Frisia Zout B.V.



Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Korte inleiding zoutwinning Frisia.....	3
2 Ontwikkelingen in verband met caveerne BAS-3	4
3 Gesteentemechanische aspecten bij definitieve afsluiting van diepe cavernes.....	5
3.1 Insluittest caveerne BAS-2	6
3.2 Abandonnering caveerne BAS-3	9
4 Modelleren van permeatie- en migratieprocessen.....	13
4.1 Modelleren door WEP	14
4.2 Gevoeligheidsanalyse met WEP-modelvarianten	16
4.2.1 Modelvariant met een instortend steenzoutdak	16
4.2.2 Andere modelvarianten	20
4.2.3 Samenvatting resultaten gevoeligheidsanalyse	21
4.2.4 Algehele conclusies gevoeligheidsanalyse met WEP-modelvarianten.....	24
4.3 Second opinion permeatie- en migratieprocessen	24
5 Herziening WEP-squeezemodel	26
5.1 WEP squeeze motor	26
5.2 Heroriëntatie op drukdeficit en zoutkruip in WEP model	29
5.2.1 Herbeschouwing drukdeficiten	29
5.2.2 Realistische drukdeficiten en nieuwe zoutkruipmodellering	30
6 Risico-analyse definitieve afsluiting caveerne BAS-3.....	31
7 Samenvattende conclusies.....	33
8 Referenties	35
Bijlage 1: Ligging van vergunninggebieden Barradeel en Barradeel II	36
Bijlage 2: Stratigrafie van Zechstein zoutpakket in Barradeel II	37
Bijlage 3: Stationaire winning van steenzout uit een caveerne.....	38
Bijlage 4: Volumebalansen voor twee concentraties carnallitiet	39
Bijlage 5: Volledige stratigrafie in de omgeving van caveerne BAS-3	40
Bijlage 6: WEP-modelleren BAS-3 basismodel.....	41
Bijlage 7: Ontwikkeling caveerneconvergentie en bodemdaling in de loop van 5000 jaar	42
Bijlage 8: Meetresultaat laatste echometing BAS-3 in december 2011	43
Bijlage 9: Mogelijke werking van anhydrietlaag boven caveerne met ingestort steenzoutdak	44
Bijlage 10: Minimaal voor dakstabiliteit vereiste dikte anhydrietlaag	45
Bijlage 11: Meetresultaten GPS station BAS-3 (tot juli 2014).....	46
Bijlage 12: Criteria voor zoutpermeabiliteit als functie van $\bar{u}_{eff}$	47
Bijlage 13: Convergentiewaarnemingen caveerne BAS-1.....	48
Bijlage 14: Permeatie bij niet-lineaire kruip nieuw model BAS-3	49
Bijlage 15: Permeatie bij lage lineaire kruip nieuw model BAS-3	50
Bijlage 16: Permeatie bij gereduceerde lage lineaire kruip BAS-3	51
Bijlage 17: Permeatie bij gecalibreerde lage lineaire kruip BAS-3.....	52
Bijlage 18: Dwarsdoorsnede ondergrond met caveerne BAS-3 en boring BAS-3-Original	53
Bijlage 19: Hydrodynamische processen in de Bontzandsteen.....	54
1 Doorgaande dakverbrokkeling bij Frisia niet aan de orde	54
2 Invloed bulking factor.....	54
3 Modelleren van afvloeiings- en verdringingsproces.....	55
3.1 Afvloeiingsproces uit Leinezout	55
3.2 Snelle afvloeiing carnallitische pekkel en verdringingsproces.....	55
3.3 Langzame afvloeiing carnallitische pekkel in Bontzandsteen	57
4 Bodemdaling door pekelaafvloeiing	58
5 Geen consequenties dakverbrokkeling voor integriteit boorput	58

Samenvatting

In april 2010 heeft Frisia de caverne BAS-3 om operationele redenen voortijdig uit bedrijf genomen en voorlopig ingesloten. Om de resterende zoutreserve alsnog te kunnen produceren wil Frisia door middel van een aftakking uit de boorput van BAS-3 een nieuwe caverne BAS-3-Original ontwikkelen ongeveer 500 m ten oostnoordoosten van de huidige caverne. Daartoe is het noodzakelijk om het huidige boortraject tussen het dak van de caverne BAS-3 en het punt van aftakking definitief af te sluiten (harde afsluiting).

Frisia heeft al ervaring opgedaan met het insluiten van een diepe zoutcaverne. Eind 2004 is de actieve zoutwinning uit de caverne BAS-2 stopgezet en gevolgd door een onmiddellijke insluiting van de caverne zonder dat er nog pekervolume wordt afgelaten om een eventuele drukverhoging in de caverne door thermische uitzetting van de pekels of door caverneverkleining als gevolg van zoutkruip te compenseren. Gedurende een observatieperiode van bijna 7 jaar is vastgesteld dat in deze diep gelegen caverne de drukopbouw door verhoging van de temperatuur en caverneverkleining zo gelijkmatig verloopt, dat een drukstijging tot boven de limietwaarde van de zoutsterkte achterwege blijft. Een sonarmeting eind 2009 heeft uitgewezen dat het open pekervolume in de caverne gedurende de testperiode niet noemenswaardig kleiner geworden is. Op basis van deze ervaringen acht Frisia de harde afsluiting van caverne BAS-3 een verantwoorde operatie.

Caverne BAS-3 heeft een groter ingesloten vrij pekervolume (circa 476.000 m³) dan BAS-2 (circa 210.000 m³). Om zoveel mogelijk onzekerheid rond de definitieve afsluiting weg te nemen zijn de mogelijke processen in en rond de afgesloten caverne bestudeerd met inachtneming van de geologische situatie ter plaatse. Er is een computermodel van permeatie- en migratieprocessen opgesteld om de gang van zaken in de ondergrond te analyseren en te voorspellen. Het model is afgestemd op de ervaringen opgedaan met de afsluiting van caverne BAS-2.

Door onverwachte ontwikkelingen in het zoutdak is caverne BAS-3 in contact gekomen met de bovenliggende carnalliethoudende zoutlaag, die preferentieel in oplossing is gegaan in de steenzoutpekels. Dit fenomeen is waarschijnlijk opgetreden eind 2011. Een dergelijk conversieproces brengt nieuwe gesteentemechanische en hydraulische ontwikkelingen met zich mee, waarvan in dit rapport de consequenties uitgebreid zijn bestudeerd door middel van enkele modelvarianten. Dit rapport geeft ten slotte een kort overzicht van de resultaten van een risico-analyse ten aanzien van de definitieve afsluiting van caverne BAS-3.

De algehele conclusie is dat de huidige situatie, waarin de cavernepekels eerder dan verwacht naar carnallitische pekels is geconverteerd, niet leidt tot bijzondere of onacceptabele risico's met betrekking tot veiligheid, milieu en bodemdaling. Voorwaarde hierbij is dat de boorput effectief en over voldoende lengte wordt afgecementeerd. Via die weg kan dan geen lekpad voor pekels ontstaan, waardoor zowel de opvang (containment) als de verticale begrenzing (confinement) van de uit de zoutformatie migrerende pekels in diepe gesteentelagen vlak boven het zout intact blijven. Een definitief verlaten caverne en boorput BAS-3 vormen evenmin een risico voor de aan te leggen afgetakte boorput en caverne BAS-3-Original.

1 Korte inleiding zoutwinning Frisia

Oplosmijnbouw steenzout

Frisia Zout B.V. (Frisia) in Harlingen wint sinds 1995 zout door middel van oplosmijnbouw in de winningvergunningen Barradeel en Barradeel II. De ligging van de vergunninggebieden is getoond in bijlage 1. Het winbare zout bevindt zich in een tamelijk vlakliggende Zechstein II, Stassfurt steenzoutlaag (Haliet ZE-II) op een diepte van 2400 tot maximaal 3000 m. Aan de bovenkant van de Stassfurt zoutlaag bevindt zich een carnalliethoudende zoutlaag van circa 60 m dikte (Carnalliet). Daarboven ligt een circa 50 m dikke gesteentelaag Anhydriet en daarboven een circa 200 meter dikke Zechstein III, Leine steenzoutlaag (Haliet ZE-III), die echter niet commercieel winbaar is vanwege de carnalliethoudende zoutlaag tussen het Stassfurt en Leine steenzout. De verticale opbouw en diepteligging (stratigrafie) van de genoemde zoutlagen en de omringende andere gesteentelagen is afgebeeld in bijlage 2. De ware verticale diepte (TVD) is aangegeven in meters beneden maaiveld. In de winningvergunning Barradeel reikt het zout tot een diepte van maximaal 3000 m en in de winningvergunning Barradeel II tot maximaal 2800 m. Door via een boorput water te injecteren in de Stassfurt steenzoutlaag lost het zout op en ontstaan er ondergrondse pekelgevulde holtes (cavernes) op de plaats waar oorspronkelijk het zout zat.

Beperking cavernehoogte in verband met carnalliethoudende zoutlaag

Ter beheersing van de ontwikkeling van de hoogte van een caverne wordt met behulp van dieselolie een zogenaamde oliespiegel in het dak van de caverne aangebracht. De olie drijft op de pekel en vormt een in water onoplosbare laag, die de zoutoplossing in zijwaartse en neerwaartse richting dwingt.

De gecontroleerde hoogteontwikkeling dient om te vermijden dat de caverne in contact komt met de carnalliethoudende zoutlaag. Carnalliet is een magnesium-kaliumchloride zout, dat een veel hogere oplosbaarheid in water heeft dan steenzout (natriumchloride). Indien carnalliet in aanraking komt met de pekel in de cavernes, waaruit Frisia steenzout wint, gaat carnalliet preferentieel in oplossing en wordt de pekel onbruikbaar voor de verwerkingsfabriek in Harlingen. De hoogste positie van het dak van de cavernes wordt daarom in de winningsfase enige tientallen meters beneden de carnalliethoudende zoutlaag gehouden.

Zoutkruip en stationaire winning

Op de grote dieptes, waar Frisia het zout wint, gedraagt het steenzout zich als een zeer stroperige vloeistof als gevolg van de hoge temperatuur en gesteentedruk (de lithostatische druk). De temperatuur als functie van de diepte bedraagt $T = 10 + 0,034 \cdot D$ [°C], met D de diepte in meters TVD. Gedurende de zoutwinning is de druk van de pekel (de lithostatische druk) in de cavernes aanzienlijk lager dan de druk in het omringende zoutgesteente. Op een diepte van 2800 m TV bedraagt de gesteentetemperatuur circa 105 °C, de statische pekeldruk maximaal 336 bar en de druk in het zoutgesteente ongeveer 600 bar. Tijdens de productie is de pekeldruk een tiental bar (15 tot 25 bar) hoger dan de statische pekeldruk om het dynamische drukverlies in het uitstroompad van de boorput te compenseren. Onder invloed van dit grote drukverschil van circa 250 bar en de hoge temperatuur in het steenzout kruipt het zout relatief snel in de richting van de cavernes. Na een aantal jaren is de oplosnelheid van het steenzout en de toestroom van steenzout door zoutkruip in termen van volumes vrijwel gelijk. Het pekelvolumen in de cavernes neemt daardoor niet of nauwelijks meer toe. In deze productiefase (de stationaire winningfase) is de verkleining van de caverne als gevolg van zoutkruip in dynamisch evenwicht met de vergroting van de caverne als gevolg van het oplossen van steenzout. Dit proces is schematisch getoond in bijlage 3.

Het karakteristieke pekelvolume van een caverne in dynamische evenwichtstoestand wordt bepaald door het gemiddelde debiet van de waterinjectie. Bij debieten van 200 ÷ 400 m³/uur varieert het evenwichtsvolume tussen 400.000 m³ en 1.000.000 m³. Zodra een caverne de maximaal mogelijke hoogte in de Stassfurt steenzoutlaag heeft bereikt, wordt hij uit bedrijf genomen. In het geval van de stationaire winning uit caverne BAS-1 was in september 2005 het cumulatief aan de ondergrond onttrokken zoutvolume een factor 5 groter dan het met sonar gemeten caverne-evenwichtsvolume (2.168.695 m³ versus 425.000 m³).

Caverneconvergentie en bodemdaling

De verkleining van de caverne door zoutkruip wordt caverneconvergentie genoemd. Dit proces van volumeverplaatsing van het steenzout in de open caverne levert nabij de caverne een volumetekort in het zout op, dat zich via ondergrondse gesteentemechanische processen vrijwel zonder tijdsvertraging vertaalt naar bodemdaling aan maaiveld. De verhouding bodemdalingsvolume/convergentievolume benadert inmiddels 100% bij de uit bedrijf genomen diep gelegen Frisia cavernes BAS-1 en 2. Er blijft dus nauwelijks volume hangen in de boven de cavernes liggende gesteentelagen. De doorsnede van de dalingschotel boven een caverne is ongeveer gelijk aan twee maal de gemiddelde diepte van de caverne, waarbij het diepste punt van de schotel recht boven de caverne ligt en de daling naar de rand toe afneemt. In de winningsvoorwaarden heeft de overheid vastgelegd, dat de bodemdaling als gevolg van zoutwinning maximaal 35 cm (vergunning Barradeel), c.q. 30 cm (vergunning Barradeel II), mag bedragen. In beide vergunningsgebieden bedraagt de bodemdaling in het diepste punt 9,5 à 10,5 cm per miljoen m³ caverneconvergentie (ref.17).

2 Ontwikkelingen in verband met caverne BAS-3

Insluiting caverne BAS-3

In april 2010 is caverne BAS-3 om operationele redenen uit productie genomen en voorlopig ingesloten. Door omstandigheden kan de aanvankelijk beoogde zoutproductie niet meer uit caverne BAS-3 gehaald worden. In november 2011 is met behulp van Gaussische modellering van meetresultaten uit een waterpassing boven caverne BAS-3 een bodemdaling van 15,7 cm vastgesteld, inclusief 4,2 cm overlapping vanwege de bodemdalingschotel boven de cavernes BAS-1 en BAS-2. De bodemdaling boven caverne BAS-4 bedroeg 12,4 cm zonder overlapping van andere cavernes. De dalinglimiet in Barradeel II is van overheidswege vastgelegd op 30 cm. Er resteert dus voldoende dalingsmarge in het gebied om de gemiste zouthoeveelheid van caverne BAS-3 alsnog vanuit een nieuwe caverne te produceren.

Planning nieuwe caverne BAS-3-Original

Frisia wil nu circa 500 m ten oostnoordoosten van de huidige caverne BAS-3 een nieuwe caverne BAS-3-Original aanleggen. Uitgaande van Gaussische bodemdalingsmodellen veroorzaakt een nieuwe caverne op die positie vanwege de grote afstand van meer dan 3 km tot de cavernes BAS-1 en BAS-2 (zie bijlage 1) geen bodemdaling op het diepste punt van de bodemdalingschotel in de winningvergunning Barradeel. De planning is om de nieuwe caverne via een aftakking (side-track) uit de bestaande boorput van BAS-3 te ontwikkelen. Dit vereist de definitieve abandonnering van caverne BAS-3, waardoor de in-situ monitoring van processen in de afgesloten caverne niet meer mogelijk is. Op basis van eerdere ervaringen met caverne BAS-2 en een abandonneringstudie uit 2010 (ref.1) acht Frisia de harde afsluiting van caverne BAS-3 een verantwoorde operatie. In verband met nieuwe ontwikkelingen in caverne BAS-3 gaat deze studie nader in op de mogelijke vervolgprocessen in de ondergrond en de eventuele uitwerking ervan op het BAS-3-Original project.

Recente dakdoorbraak naar carnalliethoudende zoutlaag

In de meest recente echometing van december 2011, waarvan het resultaat is getoond in bijlage 8, heeft het zoutdak van caveerne BAS-3 een uitstulping naar boven. Het hoogste punt is nog slechts 6 m verwijderd van de carnallietzoutlaag. Het voor echometingen toegankelijke vrije pekelvolume bedroeg op dat moment circa 476.000 m³. In juni 2012 bleek bij een drukaflaatoperatie, dat de caveerne geen halietpekel maar carnallitische pekel produceerde. In een eerste aanvullend rapport (ref.2) zijn de consequenties van de meest ernstige situatie (vorst case), namelijk totale conversie naar carnallitische pekel, bestudeerd. In dit rapport wordt een aantal scenario's met betrekking tot de definitieve abandonnering van een naar carnallitische pekel geconverteerde caveerne nader uitgewerkt en gepresenteerd.

3 Gesteentemechanische aspecten bij definitieve afsluiting van diepe cavernes

De veilige, definitieve afsluiting (abandonnering) van pekelgevulde cavernes in steenzout is al tientallen jaren een onderwerp van intensief wetenschappelijk onderzoek, dat vooral door het Solution Mining Research Institute (SMRI) wordt gestimuleerd en gesponsord. Een potentieel lange-termijn risico bij caveerne abandonnering is de mogelijke uitstroming van pekel uit de caveerne naar de bovenliggende gesteentelagen, vooral wanneer zich boven de caveerne drinkwaterhoudende zandsteenlagen bevinden. Ook de mate van bodemdaling en de betrouwbaarheid van de dalingsprognoses na abandonnering zijn punten van aandacht.

SMRI aanbevelingen met betrekking tot een veilige caveerne-abandonnering

Steenzout is een bijzonder gesteente met een zeer geringe porositeit (0,2 à 0,3 %) en het is praktisch ondoorlaatbaar voor gassen en vloeistoffen (permeabiliteit zout < 10⁻²⁰ m²), zolang de druk daarvan lager is dan de lokale lithostatische druk in het zout. Door langdurige injectie van grote hoeveelheden koud water is de temperatuur van de pekel in een caveerne en die van de omringende zoutwanden aan het einde van de actieve productiefase lager dan de oorspronkelijke temperatuur op die diepte.

In SMRI publicaties wordt geadviseerd om alvorens een dergelijke caveerne definitief af te sluiten de caveerne gedurende een jarenlange overgangsfase van geleidelijke drukopbouw door thermische expansie en zoutkruip toegankelijk te houden. Die strategie biedt de mogelijkheid om zonodig tussentijds pekel terug te produceren om de pekeldruk in de caveerne continu beneden een maximale drukwaarde te houden, om te voorkomen dat het omringende zout kan gaan breken en de stabiliteit van de caveerne mogelijk in het gedrang komt.

In de beginfase van de afsluiting van een caveerne wordt de drukopbouw in de caveerne sterk overheerst door de zoutkruip. Zodra de caverne druk in de buurt van de lokale lithostatische druk komt, is het drukverhogende effect van zoutkruip grotendeels uitgewerkt. De stijging van de caverne druk als gevolg van een geleidelijke temperatuurverhoging van de ingesloten pekel houdt bij grote cavernevolumes vele jaren aan. De potentiële drukverhoging van de pekel in een afgesloten caveerne door 1 °C temperatuurstijging bedraagt circa 10 bar (ref.11).

De vraag is of voor de zeer diepe cavernes van Frisia de aanbevelingen van SMRI ook van toepassing zijn. Door stationaire zoutwinning is het cumulatief aan de ondergrond onttrokken zoutvolume bovendien vele malen groter dan het met pekel gevulde evenwichtsvolume van de cavernes. Om in de praktijk ervaring op te doen met het lange-termijn gedrag van een uit bedrijf genomen caveerne op zeer grote diepte is Frisia eind 2004 met een hoge-druk insluittest in caveerne BAS-2 begonnen.

3.1 Insluittest caverne BAS-2

Voordat caverne BAS-2 is afgesloten voor een langjarige testperiode, is de oliespiegel uit de caverne verwijderd. De caverne is in november 2004 technisch ingesloten alsof het een harde afsluiting betrof zonder dat daarna nog pekels afgelaten kon worden. Door middel van een echometing is in oktober 2004 een open pekels gevuld cavernevolumen van circa 208.000 m³ vastgesteld op een gemiddelde diepte van circa 2650 m TV en met een pekels temperatuur van circa 65 °C. De dikte van de zoutbuffer tussen cavernedak en carnallie houdende zoutlaag bedroeg minimaal 32 m.

Begin oktober 2004 bedroeg het in totaal uit caverne BAS-2 geproduceerde zoutvolume 1.772.713 m³. Er is tijdens de zoutwinning een zoutvolume van circa 1.550.000 m³ naar de caverne opgeschoven (convergentie) en opgelost. Het zout bestaat voor circa 5% uit onoplosbare bestanddelen, zodat er op de bodem van de caverne een sump ontstaan (zie bijlage 3) met een netto volume van circa 90.000 m³. De sump bestaat echter uit losgepakt materiaal met een geschatte porositeit van 28,5% (bulking factor van 1,4). In de poriën van de sump zit naar schatting een gebonden pekels volume van 25.000 m³, dat met een echometing niet detecteerbaar is. Het bruto sumpvolume bedraagt dus circa 115.000 m³.

Het totale volume van open caverne en poreuze sump samen bedraagt 323.000 m³. Dit volume heeft min of meer de vorm van een smalle cilinder met een gemiddelde straal van 18,5 m en een hoogte van 300 m, en is gelegen op een diepte tussen 2530 m en 2830 m TV, met een gemiddelde diepte van 2680 m TV. Het verschoven zoutvolume van circa 1.550.000 m³ heeft de vorm van een holle cilinder met een buitenstraal van 44,5 m. Dit betekent dat het zout, dat bij de insluiting in november 2004 de cavernewand vormt, oorspronkelijk op een gemiddelde afstand van 26 m (44,5-18,5) van de cavernewand heeft gelegen.

Alvorens de caverne in te sluiten is eerst een extra hoeveelheid pekels geïnjecteerd om het grote drukverschil van circa 250 bar op een referentiediepte van 2650 m TV tussen pekeldruk en gesteentedruk te verkleinen tot circa 50 bar. Dit reduceert de zoutkruip en de daarmee samenhangende caverneverkleining (en bodemdaling) in sterke mate.

Naar verwachting moet tijdens de monitoringperiode het effect van een temperatuurverhoging wel duidelijk waarneembaar zijn in het drukverloop van de caverne. omdat in de loop der tijd een temperatuurverschil van bijna 35 °C overbrugd moet worden. Bij conventionele cavernes zou volgens SMRI inzichten deze temperatuurstijging aanleiding kunnen geven tot grote drukstijgingen in de caverne.

Resultaten temperatuur- en drukmonitoring in BAS-2

Na vier jaar observatie zijn in april 2009 de resultaten gepubliceerd (ref.4) van de toename van de temperatuur en de pekeldruk in caverne BAS-2 en van de ontwikkeling van vorm en volume van de caverne op basis van echometingen. De temperatuur in de caverne is inmiddels opgelopen tot 88 °C, een toename van 23 °C in 4,5 jaar, oftewel een overbrugging van 66% van de aanvankelijke temperatuurkloof van 35 °C. De cavernedruk was gestegen tot 30 bar beneden lithostatisch (een toename van slechts 20 bar). De volgens SMRI normen te verwachten grote drukstijging tot wellicht boven de limietwaarde van de zoutsterkte is dus in de praktijk van de afgesloten caverne volstrekt uitgebleven. In oktober 2009 heeft FRISIA een sonar herhalingsmeting van het ingesloten volume van caverne BAS-2 uitgevoerd. Het gemeten volume bedraagt opnieuw circa 208.000 m³, wat betekent dat het volume tijdens de observatieperiode sinds 2004 niet noemenswaardig veranderd is. Het monitoren van het druk- en temperatuurverloop van caverne BAS-2 duurt voort. Na 2009 is de pekeldruk nauwelijks toegenomen.

De waargenomen temperatuuroverbrugging van 66% na 4,5 jaar is geheel in lijn met de resultaten van een thermodynamische studie naar temperatueffecten in pekelgepulde zoutcavernes (ref.20), waarin een formule voor de karakteristieke opwarmtijd t_c van een cilindervormige caveerne is gegeven:

$$t_c = (V_c/10^5)^{2/3} \cdot a \cdot \exp\{-0,5(\ln[(A/A_0)/b])^2\},$$

met: t_c = tijdsinterval, waarin 75% van het aanvankelijke temperatuurverschil is overbrugd,
 V_c = open cavern volume [m^3],
 $A = H/D$, met H cavernehoogte [m] en D cavernediameter [m],
 $a = 4,67$; $b = 1,97$; en $A_0 = 0,91$.

Aan deze formule liggen de volgende thermische zouteigenschappen ten grondslag: de warmtegeleiding κ bij 100 °C is circa 6 W/(m.°C) en de temperatuurvereffeningscoëfficiënt k is $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 94,6 \text{ m}^2/\text{jaar}$ (ref.19).

Het open cavernevolume van BAS-2 met $V_c = 208.000 \text{ m}^3$ heeft ongeveer een cilindervorm met een doorsnede van 37 m en een hoogte van 195 m. Voor een verhouding $A = H/D = 5.3$ wordt berekend $t_c = 5,3$ jaar. Het waargenomen temperatuurpunt [66% na 4,5 jaar] en het karakteristieke opwarmpunt [75% na 5,3 jaar] liggen beide op een asymptotische kromme naar 100% temperatuuregalisatie (35 °C kloof overbrugd), een situatie die na 11 à 12 jaar wordt bereikt.

Uit de drukwaarnemingen in caveerne BAS-2 blijkt dat de pekeldruk maar langzaam toeneemt. De caverneverkleining door zoutkruip speelt bij de iets minder dan lithostatische pekeldruk in caveerne BAS-2 slechts een ondergeschikte rol. De drukverhoging wordt voornamelijk veroorzaakt door de volume-expansie van de opwarmende pekel. De toenemende pekeldruk blijft evenwel ruimschoots beneden de limietwaarde, waarbij de cavernestabiliteit in het gedrang zou kunnen komen. Die kritische limietwaarde ligt meer dan 20 à 25 bar boven de locale lithostatische druk volgens de permeabiliteitscriteria getoond in bijlage 12.

Temperatuurdaling in het zout tijdens de actieve zoutwinning

Hieronder volgt een eenvoudige thermodynamische beschouwing van de gemiddelde indringdiepte van de afkoeling van het zoutlichaam op het moment van de beëindiging van de actieve waterinjectie in de caveerne. Gedurende ongeveer 8 jaar tijd is er 13,7 miljoen m^3 zoet water van gemiddeld 35 °C (indampingswater uit de Frisia fabriek) in de caveerne geïnjecteerd en is 1,55 miljoen m^3 zout door drukverschillen voornamelijk vanuit de zijwanden in de caveerne geschoven en opgelost. Het oplossen van zuiver zout is een endotherm proces met een oploswarmte $L_{NaCl} = -10 \text{ kJ/kg}$ onder cavernecndities (ref.21). De negatieve invloed hiervan op de temperatuur wordt buiten beschouwing gelaten, omdat in het opgeloste Stassfurt steenzout van BAS-2 ook 1 à 3 % gelamineerd anhydriet aanwezig is (ref.22), dat een aanzienlijk exotherm oplosproces vertoont met $L_{CaSO_4} = 162 \text{ kJ/kg}$.

De warmteuitwisseling tussen het volledige boorputtraject en het omringende gesteente is eveneens van ondergeschikt belang vergeleken bij de warmtestromingen in het zoutlichaam rond de caveerne (ref.23). Er wordt daarom aangenomen dat het puttraject van 2,6 km lengte geen netto energiebijdrage levert aan de in- en uitgaande vloeistofstromen.

Ter vereenvoudiging van de warmteberekening wordt de cilindervormige caveerne omgezet in een equivalente bolvormige caveerne met hetzelfde volume en dezelfde diepte van het middelpunt. Dit levert een bol met straal $R = 42,5 \text{ m}$ op. Op de diepte van het bolmiddelpunt op 2680 m TV is de oorspronkelijke zouttemperatuur T_0 circa 100 °C, zodat de maximale temperatuurdaling ΔT in het zout gemiddeld over de hoogte van de bol 35 °C bedraagt. Er

wordt conservatief aangenomen dat op het aanvangstijdstip $t = 0$ van de winning de caverne al de volledige grootte heeft bereikt (stationaire winning) en dat de cavernepengel en wand een constante temperatuur van $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ hebben. De warmteafgifte van het in de caverne geschoven zoutvolume van $1,55$ miljoen m^3 wordt verwaarloosd. Steenzout heeft een soortelijke warmte $c_s = 0,875\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ (ref.21). De afkoeling bedraagt maximaal $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, zodat hierdoor $0,10\cdot 10^{12}$ kJ aan warmte aan de caverne is geleverd. Water heeft een soortelijke warmte $c_w = 4,19\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$. Gedurende de zoutwinning is het injectiewater netto $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ opgewarmd en heeft de waterinjectie van $13,7$ miljoen m^3 in totaal circa $1,72\cdot 10^{12}$ kJ aan warmte aan de zoutformatie onttrokken. De bijdrage van de zoutconvergentie hieraan is slechts $5,8\%$.

De temperatuur T in het zout wordt als functie van afstand r tot het bolcentrum en tijd t [jaar] als volgt berekend (ref.21):

$$T(r,t) = T_0 - \frac{R}{r} \cdot \text{erfc}\left(\frac{r - R}{\sqrt{4kt}}\right), \quad \text{voor } r \geq R,$$

met: $R = 42,5\text{ m}$

$T_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $\frac{R}{r} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

$k = 94,6\text{ m}^2/\text{jaar}$ (temperatuurvereffeningscoëfficiënt)

$\text{erfc} =$ complementaire errorfunctie met $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$, integratie van $x^2 \rightarrow 0$.

Na 8 jaar productie levert dit op: $T(r,8) = 100 - \frac{1487,5}{r} \cdot \text{erfc}\left(\frac{r-42,5}{55}\right)$. Voor $\text{erfc}(2) = 0,00468$ bedraagt $r = 152,5\text{ m}$ en is de zouttemperatuur op die afstand $T(152,5;8) > 99,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. De afkoeling van het zout is dus circa 110 m doorgedrongen in de zoutformatie rond de bolvormige caverne.

In het geval van een cilindervorm is het wandoppervlak van de caverne veel groter dan bij een bol, namelijk 34872 m^2 in plaats van 22698 m^2 , een toename met een factor $1,54$. De warmteuitwisseling vindt over een groter oppervlak en een grotere hoogte plaats, waardoor het afkoelingsfront in het horizontale vlak gelijkmatiger, maar minder dan 110 m diep vanaf de cavernewand, in de zoutformatie zal doordringen.

De waterinjectie heeft in totaal circa $1,72\cdot 10^{12}$ kJ aan warmte aan de zoutformatie onttrokken. Dit vergt minimaal een warmtestroom q van $0,2\text{ W}/\text{m}^2$ vanuit het zout door de cavernewand. Bij een warmtegeleiding κ van steenzout van 5 à $6\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ is daarvoor in het zout vlakbij de caverne een temperatuurgradiënt van minimaal $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ nodig. Aan die voorwaarde wordt zeker voldaan, omdat de gemiddelde gradiënt circa $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ bedraagt bij een berekende grens van het afkoelingsgebied minder dan 110 m verwijderd van de cavernewand.

Verhoogde compressibiliteit van de caverne BAS-2

Een verklaring voor het ondanks thermische volume-expansie gematigde drukverloop in de afgesloten caverne BAS-2 is de volgende. Vanwege de langdurige stationaire winningsfase is het zoutlichaam rondom de caverne onder invloed van voortdurende kruip circa 26 m opgeschoven in de richting van de caverne. Door deze voortdurende en grote volumeverplaatsingen ontstaan micro-openingen in het zout (dilatatie, ref.13). De samendrukbaarheid (compressibiliteit) en de porositeit van het zout zijn daardoor in een relatief groot gebied rondom de caverne significant groter dan het geval is bij ondieper gelegen, conventioneel producerende cavernes met vergelijkbare cavernevolumes zonder significante zoutkruip.

Uit bijna jaarlijks uitgevoerde druktesten in de caverne kwam inderdaad een verhoogde compressibiliteit naar voren, evenals een verlaagde lithostatische druk in de onmiddellijke omgeving van de caverne (ref.3). De verhoogde compressibiliteit en de verhoogde porositeit van het zout, evenals de verlaagde lokale lithostatische druk voorkomen een snelle

drukverhoging van de cavernepekkel ondanks de thermische expansie van de pekkel. Er zijn echter een dalende trend in de compressibiliteit en een verhoging van de lithostatische druk naar de originele waarden waarneembaar. Beide ontwikkelingen duiden op een geleidelijk herstel van de zoutsterkte rondom de caverne. In de afgelopen jaren is de pekeldruk echter niet noemenswaardig verder opgelopen. Vermoedelijk is de nabijgelegen caverne BAS-1, waarin tot nu toe een drukdeficit van 65 bar wordt gehandhaafd, hiervan de oorzaak.

Permeatie van pekkel in het zoutgesteente

Door de volume-expansie ontstaat er meer pekkelvolume waarvoor in de caverne geen ruimte is. Onder bijna lithostatische druk sijpelt het extra pekkelvolume via kristalvlakken geleidelijk weg in het omringende zoutgesteente, vooral in opwaartse richting omdat daar de lithostatische druk lager wordt. Dit indringings- en weglekproces wordt permeatie of migratie genoemd. De carnalliethoudende zoutlaag, de anhydrietlaag en de honderden meters dikke Leine steenzoutlaag boven de caverne verhinderen dat er in korte tijd een grote hoeveelheid pekkel kan weglekken naar de (veel) poreuzere, vloeistofdoorlatende deklagen boven het Leine zout. In hoofdstuk 4 worden de mogelijke gevolgen van pekelpermeatie verder geanalyseerd aan de hand van caverne BAS-3, die in september 2014 hard ingesloten en definitief verlaten is.

3.2 Abandonnering caverne BAS-3

Het definitief hard afsluiten van zeer diepgelegen cavernes heeft nog niet eerder plaatsgevonden in Nederland en slechts in een geval in Europa (Vauvert, Frankrijk). Er zijn nog nauwelijks standaard industriënormen beschikbaar voor dit soort operaties. De zeer diepe ligging van caverne BAS-3 en de specifieke geologische situatie, zoals de aanwezigheid van een carnalliethoudende zoutlaag vlak boven de caverne, vergen extra aandacht.

Geen doorgaande breuk door zoutpakket boven caverne mogelijk

In sectie 3.1 zijn de praktijkresultaten van een quasi harde afsluiting van caverne BAS-2 besproken. De overvloedige pekkel, die het gevolg is van volume-expansie door pekkelopwarming en van caverneverkleining door zoutkruip, blijkt in de omstandigheden van caverne BAS-2 zo gelijkmatig door het omringende zoutlichaam te worden opgevangen dat de pekeldruk in de caverne slechts langzaam oploopt naar een eindwaarde iets beneden lithostatische druk.

De pekeldruk blijft daarmee ruimschoots beneden de limietwaarde, waarbij het omringende zout kan gaan breken en scheuren. Daardoor is de kans op het ontstaan van een doorgaande breuk vanuit de caverne door het Stassfurt en Leine zout naar de poreuze, vloeistofdoorlatende gesteentelagen boven het zoutlichaam zo goed als uitgesloten. Er kan geen sprake zijn van het snel en ongecontroleerd ondergronds leeglopen van de caverne. Dit geldt eveneens voor caverne BAS-3.

Geen lekpad langs boorput

Omdat de boorput alle gesteentelagen successievelijk heeft doorboord vormt zij in principe een zwakke plek tussen maaiveld en caverne. Via de boorput zou een lekpad vanuit de caverne naar hoger gelegen gesteentelagen kunnen ontstaan. De cementatie van de mantelbuis van boorput BAS-3 is echter probleemloos verlopen, zodat er geen zorgen zijn over de cementkwaliteit. Bovendien raakt gedurende de winningsperiode het traject van de boorput in de Zechstein zoutformatie geheel door kruipend zout ingesloten. De stalen verbuizing van de boorput is goed bestand tegen de maximale externe druk van het kruipende zout. Langs de buitenkant van de boorput zal naar verwachting geen lekpad ontstaan. Dit aspect wordt verder toegelicht in bijlage 19, paragraaf 5.

De binnenkant van de verbuizing wordt tijdens het definitief verlaten van de boorput afgesloten met mechanische pluggen en met cementkolommen in overeenstemming met de geldende regelgeving op dit gebied. Bij een correcte technische uitvoering van deze maatregelen is ook een lekpad via de binnenkant van de boorput naar maaiveld praktisch uitgesloten.

Verwachtingsmodel voor caveerne squeezeën migratie van pekels

Het overtollige pekervolume sijpelt onder bijna lithostatische druk via kristalvlakken geleidelijk weg uit de caveerne in het omringende zoutgesteente, vooral in opwaartse richting, omdat naar boven toe de lithostatische druk lager is. De pekels komt terecht in het nog beschikbare porievolume van het zoutgesteente. De doorlaatbaarheid (permeabiliteit) van het zout neemt toe zodra de pekeldruk in de poriën groter wordt dan de gesteentedruk in het zout. Er ontstaan nieuwe migratiepaden in de vorm van micro openingen langs de zoutkristalvlakken en de effectieve zoutporositeit neemt verder toe in de vorm van secundaire porositeit. De permeatie en migratie van pekels in het zoutdak van de caveerne verloopt min of meer in de vorm van een omgekeerde kegel met een tophoek van ongeveer 45 graden ten opzichte van de verticaal. Als het zoutdak met pekels verzadigd is migreert de pekels verder in de carnalliethoudende Stassfurt zoutlaag en daarna in de enigszins poreuze anhydrietlaag en de honderden meters dikke Leine steenzoutlaag boven de Stassfurt zoutlaag. Het migratieproces verloopt echter zeer traag.

Volgens modellering van het abandonneringsproces (zie hoofdstuk 4) duurt het duizenden jaren voordat de caveerne door zoutkruip volledig is dicht gedrukt. Dit convergentieproces wordt ook squeezeëgenoemd. De bovenliggende zoutlagen verhinderen dat er in korte tijd een grote hoeveelheid pekels kan weglekken naar de veel poreuzere en meer doorlaatbare deklagen boven het Leine zout. Het gehele squeezeproces verloopt dus uiterst traag en feitelijk risicoloos zonder bodemdaling van betekenis of andere schadelijke gevolgen op de omgeving in de komende honderden tot duizenden jaren.

Verwaarloosbare compactie van de caveerne-sump na abandonnering

De huidige sump onder het open volume van caveerne BAS-3 is staartvormig met een lengte van ruim 300 m. De sump bestaat uit een poreuze massa van niet-oplosbare bestanddelen afkomstig uit de opgeloste zoutlaag. De porositeit voor modellering is geschat op 28,5%. De poriën van de sump zijn gevuld met circa 21.300 m³ pekels (ref.1). Vanwege de grote zoutkruip is de sumpstaart volledig omgeven door opdringend zout onder vrijwel lithostatische druk, dat de poreuze sump onder druk zet. De pekels in de poriën staat in directe verbinding met de vrije pekels in de caveerne. Na abandonnering neemt de pekeldruk in de caveerne en dus ook in de poriën van de sump snel toe naar vrijwel lithostatische waarden. Deze snelle druktoename verhindert dat het porievolume van de sump samengedrukt kan worden (compactie). Het is dus zeer onwaarschijnlijk dat er vanuit de sump pekels in de caveerne gedrukt wordt. De pekels in de sump blijft na abandonnering van de caveerne gebonden in de poriën.

Invloed van de carnalliethoudende zoutlaag (carnalliet) op permeatieproces en pekeltypes

In de top van de Stassfurt zoutlaag bevindt zich een carnalliethoudende zoutlaag met een dikte van ongeveer 50 m. Uit de laatste holruimtemeting in caveerne BAS-3 van december 2011 bleek dat het kegelvormige steenzoutdak van caveerne BAS-3 in de punt nog slechts 6 m dik was. Daarboven bevindt zich de carnalliethoudende zoutlaag. Door NG Consultants zijn de gevolgen onderzocht van het in contact komen van de halietpekels uit de caveerne met deze carnalliethoudende zoutlaag (ref.5). Op basis van metingen in het boorgat en naar analogie van vergelijkbare zoutvoorkomens in noordwest Europa heeft men twee representatieve zoutsamenstellingen vastgesteld. De gemiddelde concentratie carnalliet in het carnalliethoudende pakket is 30%, maar er zijn ook pakketten met een concentratie van 55%

aangetroffen. Voor deze twee zoutconcentraties zijn de volumebalansen bepaald in het geval dat 1 m³ halietpekel doordringt in de carnalliethoudende zoutlaag. De balansen zijn getoond in bijlagen 4a en 4b en worden hieronder kort toegelicht.

Bijlage 4a geeft aan dat bij een concentratie van 30% carnallietzout 1 m³ binnengedrongen halietpekel 3,53 m³ carnalliethoudend zoutgesteente aantast. Daarbij vindt er een omzetting plaats van halietpekel naar carnallitische pekkel en ontstaat er 4,68 m³ aan materie, wat betekent dat er een netto volumetoename van 0,15 m³ (3,3%) heeft plaatsgevonden. Deze 4,68 m³ materie bestaat uit 2,09 m³ carnallitische pekkel en uit 3,63 m³ los gepakt gesteentemateriaal, voornamelijk steenzout (1,92 m³), dat niet oplosbaar is in carnallitische pekkel. Het steenzout bestaat uit twee fracties, namelijk primair vrijgekomen haliet uit de carnalliethoudende zoutlaag en geprecipiteerd haliet afkomstig van de pekkelomzetting. Het los gepakte materiaal heeft een volume van 3,63 m³ en vult daarmee het aangetaste gesteentevolume (3,53 m³) meer dan op. De porositeit van het losgepakte materiaal bedraagt ongeveer 28,5% (bulking factor 1,4), waarin 1,04 m³ carnallitische pekkel gebonden zit. Er blijft dus een volume van 1,05 m³ (2,09 - 1,04) aan vrij verplaatsbare carnallitische pekkel over, dat verder zal migreren naar de bovenliggende anhydrietlaag en het Leine zout.

Bijlage 4b geeft aan dat bij een concentratie van 55% carnallietzout 1 m³ binnengedrongen halietpekel 2,06 m³ carnalliethoudend zoutgesteente aantast. Er ontstaat 3,18 m³ aan materie, wat een netto toename van 0,12 m³ (4%) betekent. Deze 3,18 m³ materie bestaat uit 2,09 m³ carnallitische pekkel en uit 1,54 m³ los gepakt primair en door omzetting neergeslagen steenzout en ander onoplosbaar materiaal. Het los gepakte residu (1,54 m³) vult het aangetaste volume (2,06 m³) slechts gedeeltelijk op. Er zit 0,44 m³ carnallitische pekkel gebonden in de poriën (28,5%) van het neergeslagen residu. Er is een vrij carnallitische pekkelvolume van 1,65 m³ aanwezig (2,09 - 0,44). Daarvan drijft 0,52 m³ (2,06 - 1,54) als een pekkelbel boven op het residu en 1,13 m³ (1,65 - 0,52) migreert verder naar het bovenliggende anhydriet en Leine steenzout. Naarmate de concentratie aan carnallietzout groter is ontstaat er per m³ binnengedrongen halietpekel meer vrije carnallitische pekkel.

Een belangrijke consequentie van de aanwezigheid van de carnalliethoudende zoutlaag boven de caverne is dat er tijdens de migratie van de halietpekel uit de caverne een omzetting plaatsvindt naar carnallitische pekkel. Het is dus dit type pekkel dat verder migreert door het anhydriet gesteente en het Leine steenzoutpakket en uiteindelijk terecht komt in de beter doorlatende deklagen boven het Leine steenzout. In hoofdstuk 4 worden de verwachte spreiding en tijdsduur van dit migratieproces verder uitgewerkt.

Eigenschappen van de gesteentelagen boven het Zechstein zoutpakket

In bijlage 5 is een meer gedetailleerde stratigrafie getoond van het Zechstein zoutpakket en de opeenvolgende gesteentelagen erboven (de deklagen), waarheen op de lange duur door permeatie en migratie de carnallitische pekkel kan afvloeien. In de onderstaande Tabel 1 zijn de diepteligging in ware verticale diepte t.o.v. NAP en enkele gesteentemechanische eigenschappen van de opeenvolgende gesteenten gespecificeerd (ref.1).

De bovenste Zechstein laag ZE-IV is een kleisteen, die ook enkele laagjes anhydriet bevat, maar geen haliet. Deze laag sluit aan op de Onder-Bontzandsteen, die bestaat uit een zanderige kleisteen. Beide lagen worden hydrodynamisch als een geheel opgevat, met een 10 à 40 keer grotere porositeit dan haliet. Met een totale dikte van 126 m heeft dit pakket een grote opnamecapaciteit voor de uit het Leinezout (Haliet ZE-III) migrerende carnallitische pekkel.

Boven de Onder-Bontzandsteen bevindt zich een voor pekkel moeilijk doordringbaar kleigesteente, de Zurich schalie (vh. Coevorden schalie genoemd), met een dikte van 86 m.

Het is daarom hoogst onwaarschijnlijk dat de carnallitische pekkel ooit door dit gesteentepakket migreert. Mocht dat na duizenden jaren toch het geval zijn, dan vangt de poreuze Vlieland zandsteen erboven deze pekkel op. Boven de Vlieland zandsteen bevindt zich opnieuw een vrijwel ondoordringbaar, zeer dik kleisteenpakket, de Vlieland schalies. Daarboven ligt nog een dik Krijt pakket, bestaande uit Texel- en Ommelanden kalk- en kleisteen en daarboven de Tertiaire kleilagen.

Gesteente	Diepte [mTVD NAP]	Dikte [m]	Dichtheid [kg/m ³]	Young's modulus [MPa]	Poisson ratio
Quartair	0-563	563	1950	125	0,25
Tertiair	563-1107	544	2300	125	0,25
Krijt	1107-1523	416	2250	1500	0,25
Vlieland schalie	1523-1844	321			0,25
Vlieland zandsteen	1844-1891	47	2230	2000	0,25
Zurich schalie	1891-1977	86			
Onder-Bontzandsteen	1977-2080	103	2230	2000	0,25
Kleisteen (ZE-IV)	2080-2103	23			0,25
Leine Halië (ZE-III)	2103-2275	172	2185	11000	0,35
Anhydriet (ZE-III)	2275-2333	58	2900	10000	0,25
Carnalliet (ZE-II)	2333-2384	51	1600	5500	0,35
Halië (ZE-II)	2384-2800	416	2185	11000	0,35
Basisgesteente	2800	-	2700	25000	0,30

Tabel 1: BAS-3 stratigrafie en gesteente-eigenschappen (ref.18).

Voor de volledigheid wordt er hier nog op gewezen dat er in het gehele, vrijwel vlakliggende gesteentepakket boven de zoutlagen, waaruit Frisia zout wint, geen doorgaande breuken of andere breuken van betekenis zijn aangetroffen (ref.16). Door de aanwezigheid van al deze absorberende, dan wel nauwelijks doordringbare gesteentelagen kan het uitgesloten worden, dat de uit een hardoefgesloten caverne ontsnapte pekkel ooit via de gesteentelagen het maaiveld zal bereiken.

Directe verbinding tussen caverne BAS-3 en de carnalliethoudende zoutlaag

Vermoedelijk begin 2012 is de caverne BAS-3 in direct contact gekomen met de bovenliggende carnalliethoudende zoutlaag (ref.2). De consequentie van het directe contact van haliëpekkel met de carnalliethoudende laag is dat het carnalliet preferentieel oplost, de pekkel carnallitisch wordt onder vorming van een precipitaat van steenzoutkristallen en de onoplosbare fractie van de carnalliethoudende laag vrijkomt. Het precipitaat en het vrijgekomen onoplosbare materiaal vallen geheel of gedeeltelijk naar de bodem van de caverne, waarbij de caverne dichtslibt en er een nieuwe plattere caverne ontstaat met een aangetaste carnallietlaag. Dit proces wordt in hoofdstuk 4 nader bestudeerd.

Vooruitlopend hierop wordt al de conclusie vermeld dat er geen bijzondere of onacceptabele risico's aan de communicatie met de carnalliethoudende laag verbonden zijn. Een goede praktijkindicatie hiervoor zijn de resultaten van continue GPS metingen boven caverne BAS-3. In bijlage 11 zijn de meetresultaten tot juli 2014 getoond. Gedurende het conversieproces in 2012, noch in de volgende jaren is er sprake van een wijziging in het verloop van de bodemdaling. Al vanaf begin 2010 vertoont de daling een vaste trend van 2 mm/jaar.

Samenvatting en conclusies gesteentemechanische beschouwingen

Hoewel in hoofdstuk 4 nog een gevoeligheidsanalyse van de bodemdaling aan maaiveld voor variaties in gesteentemechanische condities wordt gepresenteerd, kan men al een aantal duidelijke conclusies trekken uit de voorgaande gesteentemechanische beschouwingen. Deze conclusies hebben uitsluitend betrekking op het definitief verlaten en afsluiten van de zeer diep gelegen cavernes van Frisia onder de specifieke geologische omstandigheden ter plaatse.

Hoofdconclusies:

- 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 de langdurige stationaire winningsfase, veroorzaakt de volume-expansie van de opwarmende caveernepekkel slechts een geleidelijke en gematigde drukverhoging in de caveerne.
- 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.
- Vanwege de carnalliethoudende zoutlaag boven de afgesloten caveerne zal de uit de caveerne weglekkende halietpekkel omgezet worden in carnalitische pekkel. Dit type pekkel migreert verder in het Leine zoutpakket.
- In geval van een open verbinding tussen de winningscaveerne en de bovenliggende carnallitiet komt halietpekkel in direct contact met de carnallitiet in die zoutlaag en vindt een continue conversie van halietpekkel naar carnallitische pekkel plaats, totdat alle pekkel is geconverteerd. Daaraan zijn geen bijzondere of onacceptabele risico's verbonden. Ook leiden de open verbinding en het conversieproces niet tot een grotere bodemdaling dan in de situatie met een intact cavernedak tussen caveerne en carnallitiet.
- Niet of nauwelijks poreuze, dikke schalielagen uit de Trias en Krijtperiode zijn aanwezig tussen de Zechstein zoutformatie en het maaiveld. Vanwege de afwezigheid van doorgaande breuken vormen die gesteentelagen zoveel effectieve barrières, dat de carnallitische pekkel niet de Tertiaire of Quartaire aardlagen kan bereiken.
- Men mag op goede gronden aannemen dat er via de buitenzijde van de boorput geen lekpad zal optreden vanuit de caveerne naar hoger gelegen poreuze gesteentelagen. Door toepassing van de juiste afsluitende technieken geldt dit ook voor de binnenkant van de boorput.

4 Modellering van permeatie- en migratieprocessen

Ingenieursbureau Well Engineering Partners (WEP) in Hoogeveen heeft een computermodel ontwikkeld om het gedrag van een caveerne na abandonnering en het proces van opwarming en pekelpermeatie te voorspellen (ref.1). Er is een basismodel opgesteld, dat een zeer aannemelijke situatie en gang van zaken beschrijft. Aanvullend is een gevoeligheidsanalyse van het basismodel uitgevoerd, waarbij diverse condities en alternatieven zijn onderzocht op hun invloed op het abandonneringsproces.

Aanvullend heeft  van de Technische Universiteit Clausthal (Duitsland) een "second opinion" uitgebracht. Hij heeft een alternatief permeatiemodel, dat is gebaseerd op de zg. LUBBY-2 zoutkruipwet en Darcy-stroming door een poreus gesteente, toegepast op een representatieve situatie met betrekking tot caveerne BAS-3 (ref.6). De resultaten van de -studie hebben geleid tot een aanscherping van het WEP-abandonneringsmodel.

4.1 Modellerings door WEP

Basismodel caverne BAS-3

In bijlage 6a is getoond hoe het basismodel is vormgegeven op basis van een echometing van maart 2009. Het gemeten open cavernevolumen bedraagt circa 450.000 m³. Het computermodel berekent het convergentieproces (squeeze) van caverne BAS-3 in jaarlijkse stappen met behulp van een niet-lineair zoutkruipmechanisme (power law). Omdat het squeeze potentieel in de diepere delen van de caverne groter is dan bovenin, is het cavernemodel opgesplitst in vier compartimenten en een sumpstaart. Als dikte van het zoutdak tot de carnalliethoudende zoutlaag is 40 m genomen. In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de deelvolumes en de diepteligging van de modelcompartimenten en de sump.

BAS-3 basismodel (ref. sonar 2009)	Gemiddelde diepte (m TV)	Deelvolumen (m ³)	Drukdeficit re lithostatisch (bar)
C1	2444	50.000	25,3
C2	2464	110.000	27,2
C3	2484	140.000	29,1
C4	2504	150.000	31,0
Sumpstaart	2600	21.300	40,1

Tabel 2: BAS-3 basismodel, gebaseerd op de echometing van maart 2009.

Naar analogie van waarnemingen in testcaverne BAS-2 (zie § 3.1) gaat het rekenmodel uit van een drukdeficit in de pekel. Ter hoogte van de 130 casing schoen op 2408 m TV NAP wordt een onderdruk van 21,9 bar ten opzichte van de lithostatische druk aangenomen. Dit resulteert in een pekel-referentiedruk van 495,8 bar (2408x0,215-21,9). Het gemiddelde drukdeficit in de respectievelijke modelcompartimenten is in Tabel 2 gegeven. In de beginfase van de afsluiting wordt met deze drukdeficiten een over de modellen gesommede caverneconvergentie berekend van bijna 90 m³ per jaar. Het volume aan squeezepekel verdeelt het model over de aanwezige poriën in het dakgesteente, dat een veronderstelde secundaire porositeit van 0,2% heeft. Het geologische model is opgebouwd uit zuiver horizontaal gelegen gesteentelagen met constante dikte.

Gemodelleerde pekelmigratie

In het WEP model wordt op basis van ideale zwaartekrachtomstandigheden verondersteld dat de pekelmigratie de vorm van een omgekeerde kegel heeft met een tophoek van 45° ten opzichte van de verticaal. De top van de omgekeerde kegel wordt gepositioneerd in het zwaartepunt van het open cavernevolumen op een diepte van 2489 m TV. Stapsgewijs worden met het verstrijken der jaren de poriën van het zoutdak volgedrukt met squeezepekel.

In bijlage 6b is een geïdealiseerde eindsituatie van de pekelmigratie door de volledige Zechstein formatie weergegeven. In werkelijkheid hellen de getoonde gesteentelagen circa 3 graden opwaarts naar het noordoosten en zal de dikte van de zoutlagen ook enigszins variëren. De permeatiekegel zal, afwijkend van in de figuur weergegeven, de neiging vertonen zich iets meer in noordoostelijke richting en minder in zuidwestelijke richting uit te breiden.

De volgende beschouwing bevat de rekenresultaten van het WEP basismodel. De aannames over drukdeficit, zoutkruipmechanisme, secundaire porositeit en kegelvorm introduceren onbekende onzekerheden in de getallen, die men daarom als *indicatief* dient op te vatten.

Na circa 15 jaar bereikt de pekel de onderkant van de carnalliethoudende zoutlaag op een diepte van 2384 m TVD NAP. Het zoutdak in de ZE-II laag bevat dan ongeveer 1500 m³

halietpekkel in de poriën. Vervolgens migreert de pekkel in de carnalliethoudende zoutlaag (aanneمة 30% carnallietzout) en wordt onder volumevergroting omgezet in carnallitische pekkel. Per m^3 binnengedrongen halietpekkel verlaat circa $1,05 \text{ m}^3$ carnallitische pekkel de carnalliethoudende zoutlaag (zie volumebalans in bijlage 4a). De afgeknotte kegel in de carnallietlaag heeft een bruto volume van circa 2,7 miljoen m^3 en een aanvankelijk porievolume van circa 5500 m^3 . Bij een gelijkmatig horizontaal permeatiefront duurt het ruim 60 jaar voordat de carnallitische pekkel de anhydrietlaag bereikt, waarvan de onderkant op een diepte van 2333 m TVD NAP ligt. Ruim 75 jaar na abandonnering migreert vervolgens dit type pekkel zonder oplos- of conversieprocessen door de droge poriën van het anhydrietgesteente (porievolume circa 10.500 m^3 bij 0,2% porositeit) en bereikt bij een gelijkmatig permeatiefront na ongeveer 125 jaar de dikke Leine steenzoutlaag. Deze bevindt zich in het diepte-interval 2275 - 2103 m TVD NAP en heeft eveneens een secundaire porositeit van 0,2%. Het porievolume bedraagt circa 93.500 m^3 .

Na circa 1300 jaar zijn alle poriën in de opeenvolgende afgeknotte kegels in het Zechstein zoutpakket door migratie opgevuld met carnallitische pekkel. De hele kegel heeft een totaal volume van circa 55 miljoen m^3 . Volgens het basismodel bevindt zich dan ongeveer 0,11 miljoen m^3 gemigreerde pekkel in de poriën van het zoutpakket. De caverneconvergentie gaat voort, waardoor er na afloop van circa 1300 jaar carnallitische pekkel uit het zoutpakket gaat afvloeien naar de poreuze ZE-IV kleisteen en Onder-Bontzandsteen op een diepte van 2103 m TVD NAP. In bijlage 7 is het verloop van de berekende caverneconvergentie per jaar voor de eerste 5000 jaar getoond.

Pekelconversie in carnallietlaag

Het pekkelconversieproces in de carnallietlaag vraagt nog enige toelichting. Per m^3 binnengedrongen halietpekkel wordt 3,53 m^3 carnalliethoudend gesteente aangetast en deels opgelost. Dit volume wordt volledig opgevuld met los gepakt onoplosbaar residu met circa 28,5% porositeit, waarin 1,04 m^3 gebonden pekkel zit. Het residu bestaat voor het grootste gedeelte uit steenzout, dat uit de binnengedrongen pekkel neerslaat (precipitaat) op het moment dat carnallitische pekkel gevormd wordt. Er is geen ruimte meer voor vrije pekkel in de carnallietlaag. De vrije carnallitische pekkel ($1,05 \text{ m}^3$) vloeit meteen verder naar hoger gelegen gesteentelagen. Zodra het squeezeproces in de halietcaverne ten einde loopt ontstaat geen vrije pekkel meer. De nog aanwezige pekkel in de poriën van het residu staat onder lithostatische druk. Het residu ondersteunt het omringende zoutlichaam in hoge mate, waardoor er nauwelijks potentieel aanwezig is voor compactie. Het pekkelvolume zit gevangen in de poriën en zal ook op de zeer lange termijn (duizenden jaren) niet verder migreren naar de poreuze deklagen boven het zoutpakket. De pekkel is blood volume geworden.

Het open cavernevolumة bij abandonnering van BAS-3 bedraagt feitelijk circa 475.000 m^3 in plaats van 450.000 m^3 . Dit iets grotere volume is berekend uit de laatste echometing van december 2011, waarvan een dwarsdoorsnede is getoond in bijlage 8. Er is tijdens het complete squeeze- en migratieproces voldoende carnalliet aanwezig om alle migrerende halietpekkel om te zetten in carnallitische pekkel. Immers, de kegelsnede in de carnallietlaag heeft een bruto volume van circa 2,7 miljoen m^3 . Om dat volume geheel op te lossen is ongeveer 0,8 miljoen m^3 halietpekkel nodig. Vanwege de volumevergroting door pekkelconversie wordt het volume aan vrije carnallitische pekkel, dat op den duur in de ZE-IV kleisteen en Onder-Bontzandsteen afvloeit, gecorrigeerd met een factor 0,95 ter bepaling van het werkelijke volume aan gemigreerde halietpekkel uit de caverne.

Bodemdaling door pekelmigratie

Gedurende het migratieproces door het zoutpakket staat de migrerende pekkel onder lithostatische druk en ontstaat er nog geen bodemdaling. Zodra de pekkel in de ZE-IV kleisteen aankomt kan hij zich breed verspreiden en loopt de pekeldruk terug naar veel lagere,

hydrostatische waarden. Vanaf dat moment gaat er effectief hoge-druk pekervolume uit het zoutstelsel verloren en treedt er bodemdaling op. In bijlage 7 is het tijdsverloop van de bodemdaling en de hoeveelheid bodemdaling getoond. Volgens het basismodel treedt er pas bodemdaling op circa 1300 jaar na definitieve afsluiting van de caverne. Het potentieel aan bodemdaling als gevolg van het volledig dichtsquezen van caverne BAS-3 en onder aanname, dat ook de secundaire porositeit van het zoutpakket zich na vele duizenden jaren uiteindelijk weer sluit, bedraagt maximaal 5 cm ($10,5 \times 10^{-6} \times 475.000$ cm).

Omdat het dichtsquezen van de caverne en het proces van pekermigratie zoveel duizenden jaren in beslag neemt krijgt het kruipende zout waarschijnlijk de tijd om vanaf kilometers afstand naar de verdwijnende caverne te bewegen onder invloed van een zwakke lineaire zoutkruip. In dat geval wordt de bodemdaling over een veel groter gebied uitgespreid dan nu het geval is. De maximaal te verwachten bodemdaling in het diepste punt van de schotel boven de caverne zou daarom weleens veel minder kunnen zijn, zelfs in die mate dat de huidige bodemdaling als gevolg van de actieve zoutwinning van de afgelopen jaren vrijwel opgeheven zal worden.

4.2 Gevoeligheidsanalyse met WEP-modelvarianten

4.2.1 Modelvariant met een instortend steenzoutdak

In het kader van een gevoeligheidsanalyse is er een aantal modelvarianten onderzocht. De belangrijkste variant bestaat uit de situatie dat het cavernedak na productiebeëindiging of abandonnering instort. Door de instorting verkrummt het steenzoutdak. De brokstukken vallen neer op de bodem van de caverne. Het cavernevolume verplaatst zich daarbij in zijn geheel naar boven. In dit geval migreert dus niet alleen de halietpekel, maar ook de caverne als geheel. De halietpekel komt in direct contact met de carnalliethoudende zoutlaag, waarbij carnalliet preferentieel oplost in de halietpekel en de haliet uit de gevormde carnallitische zoutoplossing neerslaat (precipitaat). Ook wordt de carnalliethoudende zoutlaag niet meer ondersteund en stort ook gedeeltelijk in. Bij de instorting en oplossing van carnalliet, gepaard gaande met precipitatie van haliet en andere residuen, zet de niet-oplosbare fractie van het zoutgesteente uit (Dulkingögenoemd). Een veel gebruikte Dulking factor is 1,4. Dat houdt in dat er uit 1 m³ onoplosbaar massief zoutgesteente 1,4 m³ losgepakt materiaal ontstaat met een porositeit van circa 28,5%. Dit is ook het geval in de volumebalansen van bijlage 4.

Vorming nieuwe caverne in carnalliet

De oorspronkelijke caverne BAS-3 had na productiebeëindiging een open volume van circa 475.000 m³ aan vrije halietpekel. Als de carnalliethoudende zoutlaag 30% carnallietzout bevat vormt zich daarin na de verbrekking en gedeeltelijke oplossing van de carnalliethoudende zoutlaag een platte schijfvormige caverne juist onder de anhydrietlaag (zie stratigrafie bijlage 6). Per m³ binnengedrongen halietpekel wordt 3,53 m³ carnalliethoudende zoutlaag aangetast en er ontstaat 4,68 m³ aan materie (vloeistof en vaste stof), waarbij een volumetoename van 0,15 m³ optreedt (zie bijlage 4a). In totaal wordt er 1,7 miljoen m³ carnalliet aangetast.

De carnalliet zoutlaag heeft een bruto dikte van circa 51 m. Als in deze laag 1,7 miljoen m³ zout cilindervormig zou worden aangetast ontstaat een nieuwe caverne met een hoogte van 51 m en een straal van ongeveer 100 m. Uit de holruimtemeting van december 2011, getoond in bijlage 8, blijkt echter dat een bodemstraal van 100 m aan de ruime kant is voor wat betreft een ingestort halietdak. De grootste gemeten cavernestraal is circa 50 m op een diepte van 80 m onder de carnalliet. Als het cavernedak *plugvormig* zou instorten bedraagt de bodemstraal slechts 50 m. Dit laatste voor Frisia onrealistische geval met kleine straal en voortgezette plugvormige instorting, waardoor er over grote hoogte een schoorsteenvormige puinkolom ontstaat, wordt onder voorbehoud uitgewerkt in bijlage 19. Als het halietdak

kegelvormig zou instorten onder een hoek van 45° zou de bodemstraal maximaal 80 m bedragen. Bij een nieuwe caveerne in de vorm van een omgekeerde, afgeknottede kegel met een hoogte van 51 m en een aangetast zoutvolume van 1,7 miljoen m³ is de topstraal R ≈ 120 m. De aanname, dat er in de carnallitiet een *cylindervormige* caveerne zou ontstaan met R = 100 m, is voor modelleringsdoeleinden voldoende geschikt.

De totale inhoud van de oude en nieuwe caveerne samen bedraagt 2,15 miljoen m³. Er ontstaat een totaalvolume van circa 1 miljoen m³ (475.000x2,09) aan carnallitische pekkel en een volume van 1,7 miljoen m³ (475.000x3,63) aan los gepakt onoplosbaar materiaal, waarin circa 0,5 miljoen m³ (1,04/3,63 x 1.724.000) carnallitische pekkel gebonden zit. Dit onoplosbaar materiaal vult de oorspronkelijke caveerne geheel op en de nieuwe schijfvormige caveerne grotendeels. Er resteert een volume van 0,5 miljoen m³ aan vrije carnallitische pekkel, waarvan circa 72.000 m³ (0,15x 475.000; ≈ 4% van het totaalvolume) ontstaan is als gevolg van volume uitzetting door de conversie van halietpekkel naar carnallitische pekkel.

Versnelde pekkelpermeatie vanwege volumetoename tijdens conversie

Het extra pekkelvolume van circa 72.000 m³ past niet in de inhoud van de oude en nieuwe caveerne samen en zal dus elders heen moeten. De samendrukbaarheid van pekkel is gering en de pekeldruk zal toenemen. Uit de insluittest van caveerne BAS-2 (zie sectie 3.1) is gebleken dat de pekeldruk in de afgesloten caveerne nogal langzaam toeneemt. Dit blijkt te worden veroorzaakt door een verhoogde compressibiliteit van het zout en een verlaagde lithostatische druk in de onmiddellijke omgeving van de caveerne. Ervan uitgaande dat rond caveerne BAS-3 er ook sprake is van een verhoogde compressibiliteit en verhoogde porositeit (dilatatie) van het zout, evenals een verlaagde lokale lithostatische druk (-21,9 bar) kan een deel van het door conversie ontstane extra pekkelvolume worden geborgen in het zoutpakket rondom de oorspronkelijke caveerne BAS-3. De rest zal naar de bovenliggende lagen migreren, zodra de pekeldruk de aldaar heersende lithostatische druk bereikt.

Twee aandachtspunten bij de versnelde pekkelpermeatie zijn:

- 1) de vraag of het Zechstein zoutpakket in korte tijd (hooguit enkele jaren) veel pekkel probleemloos kan accommoderen zonder dat de gesteente fracturing druk bereikt wordt, en
- 2) hoe zal de anhydrietlaag gesteentemechanisch reageren op de onderliggende nieuwe caveerne in de carnalliethoudende zoutlaag en op een verhoogde vloeistofdruk in de poriën als gevolg van de overmaat aan gevormde carnallitische pekkel?

Aan beide punten wordt hieronder een beschouwing gewijd.

1) Afwijkend permeatiepatroon carnallitische pekkel

Als er in slechts enkele jaren tijd onder (boven)lithostatische druk carnallitische pekkel in het omringende zoutgesteente geperst wordt, zal het permeatiepatroon er vermoedelijk *niet* kegelvormig uitzien, maar bolvormig rondom de plaatsen waar de overmaat aan pekkel ontstaat. De nieuwe schijfvormige caveerne heeft een hoogte van 51 m en een straal van 100 m. Het permeatielichaam zal ongeveer een zelfde vorm als de nieuwe platte caveerne aannemen. Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke spreiding van de permeatie wordt een standaard secundaire zoutporositeit van 0,2% genomen en een te bergen pekkelvolume van 72.000 m³. Hiervoor is als bergingsvolume een zoutlichaam nodig met een inhoud van 36 miljoen m³. De inhoud van de nieuwe caveerne is 1,7 miljoen m³, hetgeen verwaarloosbaar is ten opzichte van het benodigde zoutlichaam aan bergingsvolume. Derhalve kan dit lichaam voorgesteld worden als een afgeronde schijf met dezelfde straal als de nieuwe caveerne (R = 100 m) en een hoogte 2r, waarbij r de straal is van de halve cirkel aan de uiteinden van de afgeronde schijf. De inhoud van een dergelijk lichaam bedraagt in formulevorm:

$$V = 2 \cdot r \cdot (R^2 + r^2) + \frac{2}{3} \cdot R^2 \cdot r^3$$

Invullen van $V = 36.10^6 \text{ m}^3$ en $R = 100 \text{ m}$ geeft een waarde voor $r = 133 \text{ m}$. In bijlage 9, figuur (a), is de vermoedelijke ligging van het permeatiegebied getoond. Het symmetrische lichaam heeft een hoogte van 265 m en een grootste straal van $R+r = 233 \text{ m}$. De grootste horizontale spreiding van het permeatiefront treedt op in de carnallitiet en bedraagt minder dan 235 m. Afgezien van de carnallitische pekkel in de nieuw gevormde platte caverne is alle gemigreerde pekkel gebonden in de poriën en kan zonder een externe aandrijving niet vrij bewegen. Vanwege de enigszins hellende ligging van de zoutlagen zal het permeatiefront een geringe trend vertonen zich asymmetrisch hellingopwaarts in noordoostelijke richting te ontwikkelen.

2) Stabiliteit anhydrietdak van nieuwe caverne

Er bevindt zich een volume van circa 0,43 miljoen m^3 (498.750- 71.250) aan vrije carnallitische pekkel onder de anhydrietlaag. Dit cavernesegment met vrije pekkel heeft bij een cirkelvormig dak met een straal van 100 m een gemiddelde hoogte van circa 13,5 m. De bovenliggende anhydrietlaag is 58 m dik (zie Tabel 1). Met behulp van het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium is de stabiliteit van het anhydrietdak onderzocht. Het dak wordt opgevat als een alzijdig ingeklemde cirkelvormige plaat, die in verticale richting gelijkmatig wordt belast (ref.7). 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]

μP = druktekort in pekkel aan het dak ten opzichte van lithostatisch [MPa]

ϕ = hoek van inwendige wrijving van dakgesteente [°]

C = cohesie van het dakgesteente [MPa]

P_{cav} = pekeldruk in caverne [MPa].

In bijlage 10 zijn de rekenresultaten voor anhydriet grafisch getoond. De minimaal vereiste dikte van het anhydrietdak voor permanente dakstabiliteit is voor drie verschillende dakoverspanningen berekend. De toegepaste breuksterktewaarden voor anhydriet zijn een cohesie van 4 MPa en een hoek van inwendige wrijving van 47° (ref.24). Omdat de bovenstaande analoge modellering een aanzienlijke vereenvoudiging inhoudt van de werkelijke, complexe spanningstoestand in het gesteente rondom de pekkelgevulde caverne is het aanbevelenswaardig minstens een veiligheidsfactor 2 in acht te nemen.

Bij een dikte van de anhydrietlaag van 58 m blijven dakoverspanningen tot minstens 200 m stabiel, zelfs bij het maximaal mogelijke drukdeficiet re lithostatisch van 22,5 MPa en met toepassing van een veiligheidsfactor 2 (200%). In de WEP modellering van de BAS-3 caverne-abandonnering wordt standaard een drukdeficiet van $\mu P = 2,19 \text{ MPa}$ verondersteld. Voor de lange termijn is deze benadering te conservatief, omdat het verstoorde oorspronkelijke spanningspatroon in de Zechstein zich langzaam herstelt en het drukverschil in de loop der tijd naar vrijwel nul tendeert. Het is dus praktisch uitgesloten dat het anhydrietdak van de nieuwe caverne door mechanische overbelasting zal instorten.

Voortzetting pekelpermeatie vanuit nieuwe caverne en versnelde bodemdaling

Na de fase van pekkelconversie zal een proces van pekelpermeatie op gang komen. Het permeatieproces wordt nu aangedreven door de convergentie van de nieuwe platte caverne. De geringe hoogte en minder diepe ligging van deze caverne maken de convergentie veel minder krachtig dan die van de oorspronkelijke caverne. Daartegenover kruipt het carnallitische zout bij vergelijkbare drukverschillen ongeveer een factor 20 à 30 sneller dan haliet. Vanuit een conservatieve benadering wordt verondersteld, dat de voortgang van de

pekelpermeatie gelijk is aan die in het basismodel en dat ongeveer hetzelfde migratiepatroon zal optreden.

In bijlage 9, figuur (a), is de verdere ontwikkeling van de permeatie getoond. Opgemerkt wordt dat de beginsituatie nu anders is dan bij het basismodel van sectie 4.1. Het bovenliggende anhydriet en Leine zoutpakket zijn immers binnen enkele jaren al over een gemiddelde hoogte van circa 125 m doordrenkt tot een diepte van 2208 m TV (zie stratigrafie Tabel 1) met de overmaat aan carnallitische pekkel. De zich ontwikkelende afgeknotte permeatiekegel daarboven ligt in het Leinezout en heeft een resterende hoogte h van ongeveer 105 m, met een bodemstraal r van circa 220 m en een topstraal R van 325 m. De afgeknotte kegelinhoud is $V = \frac{\pi}{3} h \cdot (R^2 + Rr + r^2)$. Invullen van de waarden voor h , r and R geeft $V = 24,8$ miljoen m^3 met een porievolume van circa 50.000 m^3 (porositeit 0,2%). De carnallitische pekkel bereikt nu bij een gelijkmatig horizontaal permeatiefront *na ongeveer 550 jaar* (50.000/90) de poreuze ZE-IV kleisteen op een diepte van 2103 m TVD NAP.

Kans op hydraulic fracturing van anhydrietdak

Een aspect dat nadere aandacht vraagt is of er hydraulische fracturing in het anhydrietdak kan optreden vanwege een hoge poriedruk door binnendringende pekkel.

In horizontale boorgaten, die in een uitsluitend door de zwaartekracht bepaald spanningsveld liggen, is een verwaarloosbaar kleine overdruk μP t.o.v. de hydrostatische druk veelal voldoende om een verticale trekbreuk te veroorzaken (ref.15, $\mu P = 3\bar{\sigma}_h \bar{\sigma}_v \leq 0$, als $\bar{\sigma}_v = 0,25$). Buiten de rand van het anhydrietdak is de spanningssituatie in het dak enigszins vergelijkbaar met die van een horizontaal boorgat. Aan de rand is de situatie anders, omdat daar het anhydriet in contact staat met de carnallitiet, waarin een isotrope spanningstoestand heerst met grote horizontale spanningen $\bar{\sigma}_h$, die een verticale fracturing tegenhouden. De platte caverne onder de anhydrietbank bevat pekkel onder bijna lithostatische druk. In een eerdere WEP modelstudie is als druk genomen: lithostatisch minus 21,9 bar. De carnallitische pekeldruk op 2333 m diepte (onderkant anhydriet) bij een overburden gradiënt van 0,215 bar/m is 480 bar (502-21,9). De pekkel dringt de poriën van de anhydriet binnen. Het indringproces hangt af van de eigenschappen van de anhydriet.

Enige anhydriet-kenmerken zijn: porositeit circa 0,5%, permeabiliteit gelijk aan haliet ($\approx 10^{-20} m^2$), Poisson constante circa 0,3 (zodat $\bar{\sigma}_{h,eff} = 0,43 \bar{\sigma}_{v,eff}$), gemiddelde diepte 2300 m, cohesie (treksterkte) maximaal 40 bar, welke in de volgende beschouwing slechts voor de helft wordt meegenomen. Anhydriet is een hard gesteente, dat ingeklemd zit in een ductile zoutmassa, waardoor natuurlijke scheurvorming niet uit te sluiten valt.

De locale lithostatische druk aan de onderkant van de anhydrietbank bedraagt circa 502 bar en $\bar{\sigma}_{v,eff} = 502 - P_{pore}$. De anhydriet kan loodrecht op de kleinste hoofdspanning een toename van de poriedruk $\mu P_{pore} = 2 \bar{\sigma}_{h,eff} = 0,86 \bar{\sigma}_{v,eff}$ opvangen, voordat hydraulic fracturing in verticale richting zal optreden, waardoor $P_{frac} = P_{pore} + \mu P_{pore} + \frac{1}{2} C = 522 \pm 0,14 \bar{\sigma}_{v,eff}$.

Er zijn nu twee mogelijke situaties voor het pekkelindringingsproces:

1. De poriën zijn droog (vaak het geval; door compactie en uitdroging van gips ontstaat anhydriet). De oorspronkelijke poriedruk is nul, dus $\bar{\sigma}_{v,eff} = 502$ bar en de fracturing druk bedraagt $522 \pm 0,14 \cdot 502 = 452$ bar. De beschikbare carnallitische hoge-druk pekkel (gereduceerd 480 bar, maximaal 502 bar) dringt de lege poriën of de van nature aanwezige breukjes in de anhydrietbank binnen, en gezien het drukverschil met P_{frac} leidt dit tot hydraulic fracturing.

- De poriën zijn gevuld met pek (waarschijnlijk halietpek vanwege afzetting in mariene omgeving). Bij een verzadigde pekgradient van 0,12 bar/m bedraagt de hydrostatische poriedruk op 2333 m diepte 280 bar. De fracturing druk bedraagt $P_{\text{frac}} = P_{\text{hydr}} + 2 \bar{\sigma}_{\text{h,eff}} + \frac{1}{2} C = 280 + 0,86 \bar{\sigma}_{\text{v,eff}} + 20 = 300 + 0,86 (502-280) = 491$ bar, terwijl de pekeldruk 480 bar bedraagt. De binnendringende carnallietpek zal waarschijnlijk geen trekbreuken in de anhydriet veroorzaken.

Het beschreven indringingsproces is een lokaal proces als gevolg van de typische kenmerken van de anhydriet. In de dikke zoutlagen, waartussen de anhydriet zit ingeklemd, kan onder de gegeven omstandigheden geen hydraulische fracturing optreden.

Einde pekelpermeatie indien anhydrietdak zou verbrekken (sponswerking)

Als de poriën in het anhydrietdak droog zijn is de kans groot dat er fracturing door binnendringende pek optreedt. Het dak verkrumelt gaandeweg, waarbij bulking optreedt. De caveerne met vrij volume verplaatst zich naar boven. Tijdens het instortingsproces houdt de omhoogkruipende restcaveerne steeds minder vrij volume over. Door het bulkingfenomeen wordt de omhoog kruipende caveerne uiteindelijk geheel opgevuld met verbrokkelde materiaal, dat de bovenliggende gesteentelagen ondersteunt en verdere instorting tegengaat. Bij een bulking factor van 1,4 en een gelijkmatige dakverbrekking stopt het proces van cavernemigratie al in de anhydrietlaag ruim voor de overgang van anhydriet naar Leine zoutlaag, namelijk na ongeveer 34 m. Als de bulking factor kleiner mocht zijn dan 1,23 zet de instorting door tot aan het Leinezout ($13,5/0,23 = 58,7 > 58$ m).

Het hydraulisch aangedreven instortingsproces van de anhydriet zal naar verwachting bij aankomst in het Leine zoutpakket vanzelf stoppen, omdat het zout een grote mechanische draagkracht heeft en geen hydraulische fracturing toelaat. In bijlage 9, figuur (b), is de aldus ontstane eindsituatie afgebeeld. Eigenlijk vormt de Leinezoutlaag in mechanisch opzicht het ultieme dak van het cavernesysteem.

De pek in de poriën staat onder lithostatische druk. Doordat er na afloop van het instortingsproces geen vrij pekervolume meer aanwezig is en het verbrokkelde materiaal het omringende zoutlichaam in hoge mate ondersteunt zal er geen potentieel meer aanwezig zijn voor compactie van het puinmateriaal. Het eindresultaat is dat het pekervolume gevangen zit in de poriën van het puinmateriaal en dat het ook op de zeer lange termijn (duizenden jaren) niet verder zal migreren naar de poreuze deklagen boven het zoutpakket. De pek in de poriën is *trapped volume* geworden. Een interessante conclusie is dat vanuit milieuoogpunt deze modelvariant, waarin het cavernedak tot het allerlaatste toe voortgaat met instorten heel gunstig is, omdat er aan maaiveld geen bodemdaling meer kan ontstaan.

4.2.2 Andere modelvarianten

In geval van ondiep gelegen cavernes (<500 m TVD) is een schoorsteenvormig instortend cavernedak regelmatig waargenomen met verticale kruipsnelheden tot wel 15 à 18 m per jaar. Onder Frisia condities met cavernes op grote diepte is dit een gesteentemechanisch hoogst onwaarschijnlijk (onrealistisch) scenario. Deze modelvariant wordt onder voorbehoud in bijlage 19 desondanks uitgewerkt om meer inzicht te krijgen in de eventuele *hydrodynamische processen* in de poreuze ZE-IV kleisteen en Onder-Bontzandsteen.

De gevoeligheid van het basismodel is verder onderzocht (ref.1) op basis van variaties in de volgende aspecten:

1. Zoutkruipmechanisme (lage en hoge lineaire kruipvariant)
2. Drukverschil tussen caveerne en zoutlichaam
3. Sump-porositeit en samendrukbaarheid

4. Vorm van de bodemdalingschotel
5. Secundaire zoutporositeit en hoek van de permeatiekegel
6. Concentratie van carnallietzout.

Deze modelvarianten worden hier niet in detail uitgewerkt. Voornamelijk de eindresultaten worden in de volgende sectie samengevat. Bij de varianten 3 en 6 volgt wel enige extra toelichting, omdat die gevolgen hebben voor het maximale extra pekelvolume, dat uit de Zechstein formatie weggedrukt zou kunnen worden in de poreuze Bontzandsteen, indien er namelijk op geologische tijdschaal geen blijvend opslaatporievolume kan bestaan.

4.2.3 Samenvatting resultaten gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden hieronder kort samengevat.

1. In het basismodel is een niet-lineair zoutkruipmechanisme toegepast en bedraagt de pekelpermeatie in de beginfase ongeveer 90 m^3 per jaar. Lineaire zoutkruip versnelt het squeeze- en permeatieproces aanzienlijk. In geval van lineaire kruip bedraagt in de beginfase de caverneconvergentie ongeveer 1000 m^3 per jaar voor een lage lineaire kruipvariant en 5000 m^3 per jaar voor een hoge lineaire kruipvariant. In dit laatste, niet aannemelijke geval wordt de caverne in ongeveer 500 jaar geheel leeggedrukt en bedraagt de bodemdaling als gevolg van permeatie in de eerste 100 jaar na afsluiting ongeveer 2,5 cm.
2. In het basismodel is de pekeldruk in BAS-3 permanent 21,9 bar lager dan de gesteentedruk genomen. Als men in het basismodel dit drukverschil varieert tussen 0 en 30 bar heeft dat nauwelijks effect op de snelheid van het squeezeproces. Echter, de invloed van dit drukverschil is zeer duidelijk aanwezig in geval van lineaire zoutkruip. Voor het (irreële) geval van hoge lineaire zoutkruip wordt bij 30 bar drukverschil een bodemdaling van 3 cm na 100 jaar berekend.
3. In het basismodel heeft de sumpstaart een porositeit van 28,5% en een porievolume van circa 21.000 m^3 , dat niet samendrukbaar wordt verondersteld en daardoor niet bijdraagt aan de permeatie (gebonden porievolume). Als men daarentegen aanneemt dat de porositeit van de sump in de loop der tijd ook dichtgedrukt wordt, bedraagt de totale pekelpermeatie in de beginfase ongeveer 100 m^3 en wordt de bodemdaling na 5000 jaar 0,25 cm groter.
4. In het basismodel wordt een verhouding tussen caverneconvergentie en bodemdaling toegepast van 1,1 cm daling in het diepste punt van de schotel per 100.000 m^3 weggelekte pekel. Sinds jaren wordt boven de cavernes BAS-1 en BAS-2 een verhouding van 0,95 à 1,05 cm daling per 100.000 m^3 waargenomen. Deze kleinere verhoudingen hebben geen effect op de caverneconvergentie zelf, maar maken de berekende bodemdaling in het diepste punt 5 à 10% kleiner.
5. In het basismodel is een secundaire porositeit van 0,2% aangenomen en een permeatiekegel met een tophoek van 45° met de verticaal. Als men de porositeit verkleint tot 0,02% kan slechts weinig pekelvolume opgeslagen worden in de zoutlagen en heeft de kegelhoek geen invloed meer. De bodemdaling bedraagt 3 cm na 5000 jaar. Als men de porositeit vergroot tot 2% (hoge schatting) heeft de kegelhoek een grote invloed, omdat er in dat geval veel squeezepekel in de poriën van de zoutlagen opgeslagen wordt. Er treedt dan pas bodemdaling op voor smalle migratiekegels met een tophoek kleiner dan 20° . Als de kegel een schoorsteenvorm aanneemt (tophoek kleiner dan 5°) is de daling na 5000 jaar vergelijkbaar met de situatie bij een veel kleinere secundaire porositeit.
6. In het basismodel is een concentratie van 30% carnallietzout toegepast. Als men een concentratie van 55% veronderstelt wordt er meer vrije carnallitische pekel gevormd in

de carnalliehouddende zoutlaag. Daardoor verloopt het proces complexer dan in het basismodel met 30% concentratie, zoals hierna wordt uiteengezet.

Toelichting met betrekking tot de analysevarianten 3 en 6:

A) Volledige sumpcompactie en gevolgen hogere carnallietconcentratie (55%)

De sumpstaart heeft een porositeit van 28,5% en een porievolume van circa 21.000 m³. Als door compactie alle halietpekel uit de sumpstaart gedrukt wordt is het totaalvolume aan halietpekel dat door de carnallietlaag wegvloeit niet 475.000 m³, maar 496.000 m³.

Bij concentraties tot 30% carnalliet vormt zich geen vrije pekel in de carnallietlaag, bij hogere concentraties wel. Uit de volumebalans van bijlage 4b voor 55% carnalliet volgt dat per m³ binnengedrongen halietpekel 2,06 m³ carnalliehouddend gesteente wordt aangetast. Dat volume wordt gevuld met 1,54 m³ residu, waarin 0,44 m³ pekel gebonden zit. De rest van het opgeloste volume bevat 0,52 m³ (2,06-1,54) vrije pekel. Er vormt zich dus bovenin de opgeloste carnalliehouddende zoutlaag een nieuwe caveerne met vrije pekel. Er is inclusief volume uitzetting door pekelconversie 2,09 m³ (1,65+0,44) carnallitische pekel gevormd, zodat circa 1,13 m³ (1,65-0,52) pekel meteen verder migreert naar hogere gesteentelagen.

Migratie door intact cavernek

Als alle halietpekel uit de oorspronkelijke sump en caveerne door een *intact* zoutdak is gemigreerd, bevindt zich in de carnallietlaag (55% carnalliet) uiteindelijk een platte caveerne met een vrij volume van 0,26 miljoen m³ (0,52x496.000) aan carnallitische pekel en een in de nieuwe sump gebonden volume van 0,22 miljoen m³ (0,44x496.000). Een door conversie vergroot volume van 0,56 miljoen m³ (1,13x496.000) is intussen door permeatie afgevoerd richting top Zechstein. In het basismodel heeft de permeatiekegel in de top van de carnallietlaag een diameter van circa 300 m, zodat de caveerne een kolomhoogte van 3,7 m aan vrije pekel heeft. De pekel staat onder lithostatische druk, zodat het drukdeficiet vrijwel nul is. Ondanks de grote overspanning en met toepassing van een forse veiligheidsfactor 2, blijft het anhydrietdak absoluut stabiel, zoals uit de grafiek in bijlage 10 blijkt.

De zich ontwikkelende nieuwe caveerne met residu-ump in de carnalliet heeft geen invloed op het verloop van het squeezeproces van de oorspronkelijke caveerne en de sumpcompactie. Als men nu aanneemt dat er op *geologische* tijdschaal helemaal geen blijvend *lood* porievolume in de Zechstein kan bestaan, zal ook vanuit de nieuw gevormde caveerne door convergentie en sumpcompactie alle carnallitische pekel uiteindelijk in de poreuze Bontzandsteen boven het Leine zout terechtkomen. Het betreft een extra pekervolume van circa 0,5 miljoen m³ ((0,52+0,44)x496.000). De gevolgen voor de bodemdaling worden in de hieronder volgende sectie B behandeld.

Situatie waarbij caveerne in open verbinding staat met carnalliet

Indien de caveerne BAS-3 een open verbinding heeft met de carnalliet (de huidige situatie) maakt dit het migratieproces niet wezenlijk anders. Maximaal 496.000 m³ halietpekel (incl. sump) stroomt door de carnalliet en migreert als geconverteerde carnallitische pekel met vergroot volume naar de Bontzandsteen. Alleen de tijdschaal is nu iets korter door het versnelde oplosproces in de carnallietlaag en vanwege een hogere vrije pekerekolom met meer convergentie. Als in afwijking van sectie 4.2.1 een carnallietconcentratie van 55% wordt aangenomen, wordt 1 miljoen m³ (496.000x2,06) carnalliet aangetast. De carnalliet laagdikte is 51 m, zodat de nieuwe caveerne een gemiddelde straal van afgerond 80 m heeft.

De totale inhoud van de oude en nieuwe caveerne samen bedraagt 1,5 miljoen m³ (0,496+1,0). Er ontstaat een totaalvolume van circa 1 miljoen m³ (496.000x2,09) aan carnallitische pekel en een volume van 0,76 miljoen m³ (496.000x1,54) aan los gepakt onoplosbaar materiaal,

waarin 0,2 miljoen m³ (0,44x496.000) carnallitische pekkel gebonden zit. Het onoplosbare materiaal vult de oorspronkelijke caveerne geheel op, maar de nieuwe schijfvormige caveerne slechts met 0,27 miljoen m³ (764.000-496.000). Er is in de nieuwe caveerne een vrij volume aan carnallitische pekkel aanwezig van 0,75 miljoen m³ (1.022.000-268.000) met een kolomhoogte van 37,6 m vergeleken met 3,7 m in de situatie zonder dakdoorbraak.

Er resteert nog een pekkelvolume van circa 65.000 m³ (1.036.700-754.000-218.200 = 0,13x496.000), dat ontstaan is als gevolg van volume-uitzetting door de conversie van halietpekkel naar carnallitische pekkel. Dit relatief kleine restvolume wordt in korte tijd in het omringende zoutgesteente geperst en heeft een zelfde spreidingspatroon als getoond in bijlage 9, figuur (a). Als op *geologische* tijdschaal al het pekkelvolume (vrij en poriegebonden) uit de Zechstein zoutformatie zou verdwijnen betreft dit een effectief volume van circa 1 miljoen m³ (218.200+754.000). In de volgende secties worden de resulterende bodemdaling en de veilige bergingscapaciteit van de Bontzandsteen beschouwd.

B) Theoretisch meer bodemdaling bij 55%-variant

De 55%-variant met integrale compactie van de beide sumps in haliet en carnallitiet kan de grootte van de uiteindelijke bodemdaling beïnvloeden. In totaal wordt effectief, dat wil zeggen gecorrigeerd voor volumeëxpansie door pekkelconversie, een volume van 496.000 m³ halietpekkel en 476.00 m³ extra carnallitische pekkel uit de Zechstein formatie gedrukt, in totaal dus 972.000 m³. Het bodemdalingspotentieel is nu groter dan in het standaardgeval. Hierbij worden echter twee kanttekeningen gemaakt: 1) de tijdspanne van dit proces is zeker vele duizenden jaren langer ten opzichte van het basismodel, omdat het squeezenpotentieel van de zeer platte caveerne met vrije pekkel in de carnallitiet gering is, en 2) vanwege de zeer lange geologische tijdschaal vindt er komafvlakking plaats. De kans dat de komdiepte veel meer dan de standaardwaarde van 5 cm zal bereiken is daarom praktisch nihil.

C) Veilig bergbaar carnallitisch pekkelvolume in de poreuze Bontzandsteen (absolute worst case)

In het uiterste geval kan circa 1 miljoen m³ carnallitische pekkel als gevolg van opeenvolgende oplos- en migratieprocessen terecht komen in de poreuze Bontzandsteen. Op geologische tijdschaal zal een bruto volume van circa 19,5 miljoen m³ Bontzandsteen (5% porositeit) gevuld worden met carnallitische pekkel. Vanwege dichtheidsverschillen blijft de carnallitische pekkel in de onderste regionen van de poreuze Bontzandsteen hangen. Stel dat de pekkel zich verspreidt over een afstand van 1 km, dan raken de poriën van de Bontzandsteen slechts over een hoogte van iets meer dan 6 m gevuld met carnallitische pekkel. Het uit de poriën verdrongen zoute water kan zich in de Bontzandsteenlaag verspreiden over een resterende hoogte van circa 120 m en in horizontale richting over een afstand van kilometers zonder noemenswaardige drukverhoging.

Er is wel een bepaalde bovengrens aan het veilig bergbare carnallitische pekkelvolume in de poreuze Bontzandsteen. Het probleemloos bergen van circa 1 miljoen m³ carnallitische pekkel vereist volgens bovenstaand rekenvoorbeeld een nogal wijd bufferlichaam, namelijk een platte schijf met een straal van circa 1 km. Als gevolg daarvan dienen geheel leeglopende cavernes met een volume in dezelfde orde van grootte als van caveerne BAS-3 bij voorkeur circa 1 km van elkaar verwijderd te liggen om op *geologische* tijdschaal een veilige en probleemloze berging te waarborgen. In de Frisia praktijk is deze ruimtelijke spreiding het geval, mede als neveneffect van in vergunningen opgelegde voorwaarden tot beperking van cumulatieve maaiveld-daling tijdens de zoutwinning uit de cavernes. Uit deze absolute worst case-benadering blijkt dat de boven de Bontzandsteen gelegen Zurich schalie het eigenlijke hydraulische dak van het cavernesysteem vormt

4.2.4 Algehele conclusies gevoeligheidsanalyse met WEP-modelvarianten

De algehele conclusie uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse is dat de onderzochte varianten geen wezenlijk andere uitkomst voor de bodemdaling aan maaiveld opleveren dan het basismodel.

De enige uitzonderingen zijn:

- 1) een hoge lineaire kruipvariant (ref.1) en/of een cavernedak met open verbinding naar de carnallitiet, die beide een snellere maar in absolute zin geen grotere naijlende bodemdaling veroorzaken, en
- 2) de variant met een concentratie van 55% carnallietzout en integraal compacterende sumps, die potentieel iets meer bodemdaling oplevert.

Tenslotte wordt geconcludeerd, dat de *Zurich schalie* in hydraulisch opzicht het eigenlijke *Ölakövan* van het cavernesysteem vormt, zoals de Leine haliet (ZE-III) in mechanisch opzicht het globale *Ölakövan* het systeem vormt.

4.3 'Second opinion' permeatie- en migratieprocessen

Het door WEP ontwikkelde computermodel bestaat in essentie uit de zogenaamde Norton-Hoff zoutkruipwet, die is afgestemd op de convergentiewaarnemingen in caveerne BAS-1 als functie van de cavernedruk tijdens de stationaire winningsfase van de caveerne.

Modelling Lux/TU Clausthal

Een alternatief permeatiemodel dat is gebaseerd op de zogenaamde LUBBY-2 zoutkruipwet en Darcy-stroming door een poreus gesteente, is enige jaren geleden ontwikkeld door professor Lux van de Technische Universiteit Clausthal (Duitsland). In opdracht van Frisia heeft Lux dit model toegepast op een representatieve situatie met betrekking tot caveerne BAS-3 (ref.6). Vooraf zijn de modeleigenschappen door simulatie afgestemd op de gemeten pekeldrukken van de ingesloten caveerne BAS-2, waarbij ook rekening is gehouden met de opwarming van de pekels in de caveerne na insluiting. De LUBBY-2 kruipwet is geijkt op basis van een lage lineaire kruipvariant. Vervolgens is het permeatiemodel aangepast aan de situatie van caveerne BAS-3. Alle berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van een rotatiesymmetrisch eindige-elementen model.

Resultaten Lux-model voor caveerne BAS-3

De belangrijkste resultaten voor caveerne BAS-3 worden hieronder kort samengevat.

- Uit de simulatie is een best passende secundaire porositeit in de permeatiezone van 1% naar voren gekomen.
- De pekelpermeatie vindt plaats vanaf een cavernedrukniveau, dat 35 bar lager is dan de oorspronkelijke gesteentedruk rond de caveerne.
- De permeatie gaat de eerste tientallen jaren na afsluiting relatief snel vanwege de opwarming van de pekels. Na 50 jaar is het infiltratiefront tot bijna 100 m boven het cavernedak gevorderd. Na 100 jaar is echter al een stabiele situatie ontstaan, waarin de permeatie nog slechts met ongeveer 4 mm per jaar voortgaat.
- Na 100 jaar afsluiting is ongeveer 30.000 m³ pekels in het zoutlichaam rond en boven de caveerne gedrukt, daarna verloopt dit proces veel langzamer.
- Ongeveer 55.000 jaar na abandonnering bereikt het infiltratiefront de poreuze Bontzandsteen boven de Leine zoutlaag.

Veel snellere voortgang infiltratiefront in WEP-model

In het WEP basismodel bereikt het infiltratiefront al na ongeveer 1300 jaar de poreuze Bontzandsteen in vergelijking met 55.000 jaar in het Lux-model. Het WEP model is daarmee

een factor 42,5 conservatiever dan het Lux model. Eén oorzaak voor de veel snellere doorbraak van pekkel naar de Bontzandsteen in het WEP model ligt in de lagere secundaire porositeit in de permeatiezone, die een factor 5 kleiner is dan bij Lux. De keuze voor een porositeit van 0,2% zou de doorbraaktijd in het Lux model reduceren tot 11.000 jaar. Dat is nog steeds een factor 8,5 langzamer dan in het WEP basismodel.

De tweede oorzaak voor de snelheidsverschillen ligt in een andere benadering van de voortgang van het permeatieproces. In het Lux-model remt de voortdurende vorming van nieuwe secundaire porositeit in het gesteente de voortgang van het infiltratiefront (de permeatiesnelheid) sterk af, namelijk gemiddeld over het hele hoogte- en breedtebereik van de permeatiekegel met een factor 8,5. Deze remmende factor reduceert in evenredige mate de caverneconvergentie. Volgens Lux kost de vorming van de elkaar opvolgende nieuwe micro-migratiepaden tussen de zoutkristallen energie in de vorm van een lokaal en tijdelijk drukverlies in de migrerende pekkel. Om in de zoutmatrix kristaldislocaties te vormen en open te houden, waarlangs de pekkel vervolgens in de vorm van een Darcy stroming verder kan migreren, is dus op microschaal energie nodig, die op macroschaal de caverneconvergentie afremt. Omdat zich een kegelvormig migratiepatroon in drie dimensies ontwikkelt, treedt bovendien verder verwijderd van de caverne uitsmering en verzwakking op van het aandrijfmechanisme van de migratie (de "squeeze motor" in de caverne). Op vergelijkbare wijze heeft Bérest (ref.19) Darcy's wet toegepast ter bepaling van de evenwichtsdruk van de pekkel in een afgesloten caverne door gelijkstelling van convergentie en Darcy permeatie.

Permeatie in WEP-model uitsluitend bepaald door caverneconvergentie

In het WEP-model zit geen expliciet afremmend Darcy stromingsproces. De permeatie wordt uitsluitend bepaald door de cumulatieve caverneconvergentie (squeeze motor) uit de diverse modellagen. De convergentie is een functie van het drukdeficit, dat in het centrum van een gemodelleerde cavernelaag aanwezig verondersteld wordt tussen de pekeldruk en de lithostatische druk op gelijke diepte op enige afstand van de caverne (zie Tabel 2). De convergentie zorgt voor een continue pekelpermeatie in het omringende zoutlichaam, zolang er vrij verplaatsbaar pekkelvolume voorhanden is.

Vanuit fysisch oogpunt is het WEP concept, waarin uitsluitend de "squeeze motor" de snelheid van het migratieproces in een zoutlichaam bepaalt, een zeer eenvoudig concept. De vraag is echter of de berekende uitzonderlijk grote squeezevolumes in geval van hoge lineaire zoutkruip fysische realiteitswaarde hebben. Een cruciale parameter, die in het WEP-model bepalend is voor het totale squeezevolume per tijdseenheid, is het veronderstelde drukdeficit in de pekkel. In hoofdstuk 5 wordt het WEP-squeezemodel diepgaand geanalyseerd.

Drukafhankelijke zoutpermeabiliteit

In bijlage 12 is voor drie verschillende criteria voor zoutpermeabiliteit als functie van de effectieve korrelspanning getoond, dat de permeabiliteit van het zout sterk toeneemt indien de pekeldruk in de poriën van het zout uitstijgt boven de locale lithostatische druk. Bij 1 MPa (10 bar) 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 locale lithostatische druk ten opzichte van de pekelaandrijving vanuit dieper gelegen caverneregionen. In homogeen zout zal de permeatie voornamelijk in opwaartse richting plaatsvinden, omdat dat de weg van de minste weerstand is. Als vanwege verontreinigingen in het zout de porositeit en permeabiliteit plaatselijk en tijdelijk groter zouden zijn, waardoor het permeatiefront sneller kan vorderen dan de squeeze motor aan pekkel levert, zal de pekeldruk terugvallen tot waarden beneden de lithostatische druk. Echter, de WEP squeeze motor "draait" aangedreven door het opgelegde drukdeficit, onbeïnvloed door de processen hogerop gewoon door. De druk aan het permeatiefront stijgt weer en de permeatie herneemt haar loop.

5 Herziening WEP-squeezemodel

5.1 WEP 'squeeze motor'

Zoals in sectie 4.3 is toegelicht, is de WEP squeeze- en permeatiemodellering vanuit fysisch oogpunt een zeer eenvoudig concept, omdat daarin uitsluitend de caverneconvergentie (squeeze motor) bepalend is voor de snelheid, waarmee de pekelmigratie in een zoutlichaam voortgaat.

Relatief kruipmodel

Het WEP basismodel uit sectie 4.1 is een *relatief* kruipmodel met uitsluitend een niet-lineaire zoutkruiprelatie volgens een Norton-Hoff machtsfunctie. De referentiekruip is gebaseerd op waarnemingen tijdens de stationaire winningsfase in de Frisia caverne BAS-1. In Tabel 3 zijn de kenmerkende getallen samengevat (ref.1). Het drukdeficit $\Delta P_{ref} = (P_o - P_i)$, met P_o de gesteentedruk in het omringende steenzout (lithostatische druk) en P_i de pekeldruk in de caverne (halmotatische druk).

Steenzout		BAS-1 referentie	
Referentie squeeze snelheid	$dV_{sq,ref}$	700,8	m ³ /dag
Activeringsenergie	Q_1/R	6201	K
Zouttemperatuur	T_{ref}	376	K
Gemiddelde cavermediepte	D_{ref}	2760	m
Drukdeficit caverne	ΔP_{ref}	22,7	MPa
Cavernevolume	V_{ref}	424.000	m ³
Niet-lineaire exponent Norton-Hoff	n_1	3,6	-

Tabel 3: Squeeze referentiegegevens van de stationaire winning in caverne BAS-1

Voor andere waarden van cavernevolume V , drukdeficit ΔP en temperatuur T kan de bijbehorende squeeze snelheid dV_{sq} (squeeze motor) als volgt uit de referentiegegevens berekend worden:

$$dV_{sq} = dV_{sq,ref} \cdot (V/V_{ref}) \cdot (\Delta P/\Delta P_{ref})^{3,6} \cdot (e^{-Q_1/RT}/e^{-Q_1/RT_{ref}}) \quad [m^3/dag].$$

Algemeen kruipmodel voor cilindrische cavernes

Als het drukdeficit ΔP erg klein wordt (< 2 à 3 MPa), zoals het geval is bij ingesloten cavernes, is kruipmodellering als een combinatie van lineaire en niet-lineaire convergentieprocessen theoretisch meer op zijn plaats dan een louter niet-lineair mechanisme. In dat geval past WEP een Norton-Hoff twee-componenten formule toe om de zoutkruip van een cilindervormige caverne te berekenen volgens (ref.25):

$$\frac{\dot{V}}{V} = \sqrt{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{n_1} (P_o - P_i) \right]^{n_1} A_1 + \sqrt{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{n_2} (P_o - P_i) \right]^{n_2} A_2,$$

waarin: $\dot{V}$ = convergentievolumen van de caverne (squeeze) per tijdseenheid

V = cavernevolume

n_1 = niet-lineaire exponent > 1

A_1 = temperatuurafhankelijke modelcoëfficiënt voor niet-lineaire zoutkruip

n_2 = lineaire exponent = 1

A_2 = temperatuurafhankelijk modelcoëfficiënt voor lineaire zoutkruip
 P_i = pekeldruk in caverne
 P_o = locale gesteentedruk in het omringende steenzout.

De temperatuurafhankelijkheid van de modelcoëfficiënten wordt bepaald door de relatie $e^{-Q/RT}$, met $Q/R = 6201$ K. In Tabel 4 zijn twee parametersets gegeven, die in een studie naar het insluitgedrag van caverne BAS-2 zijn toegepast (ref.26).

Parameter	Lage lineaire kruip (LL-variant)	Hoge lineaire kruip (HL-variant)	Eenheid
A_1	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$0,58 \cdot 10^{-7}$	$\text{MPa}^{-n_1}/\text{dag}$
n_1	3,6	3,6	-
A_2	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$\text{MPa}^{-n_2}/\text{dag}$
n_2	1	1	-

Tabel 4: BAS-2 modelvariabelen voor twee GeoDelft zoutkruipvarianten bij 373 K (100 °C).

Voor de parameterset van Tabel 4 heeft WEP onderzocht hoe representatief de zoutkruip-modelvarianten zijn voor de convergentiesnelheden, die in caverne BAS-1 onder diverse omstandigheden zijn waargenomen (ref.1). In de bijlagen 13 (a) en 13 (b) zijn de convergentiesnelheden op jaarbasis getoond als functie van het drukdeficit in het middelpunt van de caverne. Alle waarnemingen zijn genormaliseerd ten opzichte van een cavernevolumen van 300.000 m³.

In bijlage 13 is de best fit een zuiver niet-lineair kruipmodel (NL-variant), dat het beste aansluit bij de waarnemingen, met als parameters $A_1 = 1,55 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-4}/\text{dag}$ en $n_1 = 4,0$. De extrapolated curve is de standaard NL-kruipvariant gecalibreerd met de referentiegegevens van BAS-1. Uit bijlage 13 blijkt, dat voor alle drukverschillen de modelvarianten LL en HL de waargenomen convergentiesnelheden in caverne BAS-1 niet goed beschrijven. Bij grote drukverschillen zijn de kruipsnelheden te laag en bij kleine drukverschillen (< 100 bar) te hoog. Deze afwijkingen gelden in significante mate voor de HL-variant, maar ook de LL-variant wijkt in het lage drukbereik meer dan 50% af (te veel kruip) van de best passende modellering (best fit) van de waarnemingen.

Zoutkruipmodellering caverne BAS-3

De coëfficiënten A_1 en A_2 zijn sterk temperatuurafhankelijk. De temperatuur in de caverne wordt berekend met de formule: $T = 273 + 10 + 0,034 \cdot D$ [K]. Het middelpunt van caverne BAS-3 ligt op een diepte D van circa 2480 m TV, waarvoor een temperatuur van 367 K (94 °C) wordt berekend. De coëfficiënten A_1 en A_2 uit Tabel 4 worden vanwege de lagere temperatuur gereduceerd met een factor 1,35 ($=e^{-6201/373}/e^{-6201/367}$) (ref.18).

Indien men het algemene kruipmodel ook wil gebruiken voor een louter niet-lineaire modellering, moeten A_1 en n_1 expliciet bekend zijn. Een berekening met behulp van de referentiewaarden van Tabel 3 levert op $n_1 = 3,6$ en $A_1 = 1,75 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-3,6}/\text{dag}$ bij 376 K. Omrekening naar de BAS-3 temperatuur geeft een reductiefactor 1,5 ($=e^{-6201/376}/e^{-6201/367}$) en $A_1 = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-3,6}/\text{dag}$ (standaard NL-variant). Zo kan men ook de best fit variant omrekenen naar BAS-3 omstandigheden. Hierbij is de reductiefactor van 1,35 van toepassing. De best fit NL-variant heeft als parameters $n_1 = 4$ en $A_1 = 1,15 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^{-4}/\text{dag}$.

Tabel 5 geeft voor de vier verschillende zoutkruipvarianten een specificatie van de modelparameters om het squeezevolume van caverne BAS-3 op dagbasis te berekenen.

Parameter	Standaard NL	Best fit NL	LL-variant	HL-variant	Eenheid
A ₁	1,2 10 ⁻⁷	1,15 10 ⁻⁷	1,1 10 ⁻⁷	0,43 10 ⁻⁷	MPa ⁻ⁿ¹ /dag
n ₁	3,6	4,0	3,6	3,6	-
A ₂	0	0	0,74 10 ⁻⁶	3,8 10 ⁻⁶	MPa ⁻ⁿ² /dag
n ₂	1	1	1	1	-

Tabel 5: Modelparameters BAS-3 convergentie voor vier zoutkruipvarianten bij 367 K (94 °C).

In de berekening van het convergentievolumen van de afgesloten caveerne is uitgegaan van een gemiddeld drukdeficiet van 21,9 bar tussen de pekeldruk en de lokale gesteentedruk ter hoogte van de 130-casing schoen (ref.1). In het WEP basismodel met alleen een niet-lineair (relatief) zoutkruipmechanisme bedraagt in de beginfase van de afsluiting van caveerne BAS-3 de berekende caveerneconvergentie ongeveer 90 m³ per jaar. Daarbij zijn de drukdeficiten toegepast, die vermeld staan in Tabel 2 van sectie 4.1.

In andere modelvarianten zijn ook de lineaire zoutkruipcomponenten meegenomen. Bij kleine drukdeficiten versnelt lineaire zoutkruip het squeeze- en permeatieproces aanzienlijk. Voor de lage lineaire kruipvariant bedraagt de berekende caveerneconvergentie in de beginfase ongeveer 1000 m³ per jaar en voor de hoge lineaire kruipvariant zelfs 5000 m³ per jaar. In dit laatste geval wordt de caveerne BAS-3 in ongeveer 500 jaar geheel leeggedrukt.

Accomodatie permeatiepekeldak in zoutdak

De vraag is of het zoutlichaam boven de afgesloten caveerne deze grote convergentievolumes als rekenresultaat van WEP- zoutkruipmodellering wel kan absorberen. Het vermogen van het zoutlichaam tot pekellacomodatie wordt globaal onderzocht met de laminaire stromingswet van Darcy:

$$\dot{V} = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{A}{\Delta l} \cdot \Delta P,$$

waarin: $\dot{V}$ = uitstromingsdebiet van squeeze motor [m³/s]

K = permeabiliteit van zoutlichaam [m²]

η = pekelviscositeit [Pa.s]

A = oppervlak caverne dak [m²]

$\Delta P / \Delta l$ = drukgradiënt van pekeldak in zoutlichaam [Pa/m].

Als parameterwaarden worden gebruikt: $\eta = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s en $A = 7854$ m² (caverne dakstraal 50 m). De waarde K voor de zoutpermeabiliteit wordt als volgt bepaald. Het WEP-model gaat uit van een pekeldruk van -2,19 MPa ten opzichte van de lokale gesteentedruk ter hoogte van de 130-casing schoen. Uit bijlage 12 volgt, dat de zoutpermeabiliteit bij een pekeldruk-deficiet uitermate gering is, namelijk $K \approx 10^{-21}$ m² (1 nanoD).

Vanwege de pekellonderdruk is er géén positieve drukgradiënt $\Delta P / \Delta l$. Er is welbeschouwd nauwelijks tot geen pekelpermeatie in het zout mogelijk, althans niet via vrije Darcy stroming. Zolang zich geen overdruk in de pekeldak opbouwt door convergentie of pekelopwarming, is de zoutcaverne praktisch gesproken lekdicht, afgezien wellicht van enige capillairewerking van de primaire porositeit tussen de zoutkristalvlakken, waardoor alsnog een verwaarloosbare hoeveelheid pekeldak in het zout terecht kan komen.

5.2 Heroriëntatie op drukdeficit en zoutkruip in WEP model

5.2.1 Herbeschouwing drukdeficiten

Gesteentemechanische drukverhoging van de pekel

Uit de echometing in bijlage 8 blijkt, dat de squeeze motor bij BAS-3 feitelijk bestaat uit een pekelskolom van circa 100 m hoogte. Als zich op de bodem van de afgesloten caveerne uiteindelijk een evenwicht ontwikkelt tussen de druk in het zoutgesteente en in de caveernepekels veroorzaakt dit aan het zoutdak van de afgesloten caveerne gedurende vele jaren een *pekelloverdruk* van circa 1 MPa ten opzichte van de daar heersende lithostatische druk. Uit bijlage 12 volgt, dat de permeabiliteit van het zout dan toeneemt tot $K \approx 10^{-19} \text{ m}^2$ (0,1 > D). Voor elk modelvariant van de zoutkruip heeft de zoutpermeabiliteit dezelfde vergroete waarde, aangezien de potentiële pekelloverdruk aan het dak langdurig (en maximaal) 1 MPa bedraagt.

In het WEP-model (ref.1) wordt uitgegaan van een pekelloverdruk van -2,19 MPa ten opzichte van de gesteentedruk ter hoogte van de casing schoen, die zich in het dak van de afgesloten caveerne bevindt. Deze aanname is feitelijk onjuist. De pekeldruk ter plaatse van het dak is vanwege de squeeze motor in principe een overdruk van +1 MPa. Uit representatieve druktesten in een grote zoutcaveerne (ref.14) is echter gebleken, dat er aan het dak van een caveerne slechts een zeer geringe pekelloverdruk ten opzichte van de omringende lithostatische druk in het zoutlichaam handhaafbaar is. De zoutpermeabiliteit fluctueert en vergroot met de pekelloverdruk in die mate, dat er gemiddeld over de tijd een soort evenwicht ontstaat, waarbij er nauwelijks sprake kan zijn van een overdruk in de pekels aan het zoutdak.

De door WEP berekende hoeveelheden squeezepekels zijn structureel overmatig groot omdat er voor een onrealistisch drukdeficit is gekozen. In feite is de overdruk aan het dak nihil en bestaat de squeeze motor uit een kracht van circa 1 MPa, die vanuit de bodem van de caveerne in de vorm van een drukdeficit opereert.

Tijdelijke thermische drukverhoging van de pekels

Door opwarming zet de ingesloten pekels uit en neemt de pekeldruk aan het zoutdak toe. Bij de insluiting van caveerne BAS-3 begin 2010 was de caveernepekels ongeveer 30 °C koeler dan de oorspronkelijk zouttemperatuur op die diepte. Volgens de echometing in bijlage 8 is de caveerne vrijwel bolvormig. De caveerne heeft een vrij pekelsvolume V_c van circa 475.000 m³ en een straal van circa 48 m.

De karakteristieke opwarmtijd t_c van een bolvormige caveerne wordt als volgt berekend: $t_c \approx (V_c)^{2/3}/400$ (ref.19). Voor caveerne BAS-3 levert dit op: $t_c \approx 15$ jaar, oftewel, de cavernetemperatuur zal in circa 15 jaar tijd met 22,5 °C (75%) toenemen. Dat betekent een gemiddelde temperatuurstijging van 1,5 °C/jaar. Na die tijd zal de snelheid van de temperatuurstijging afzakken vanwege het afnemende temperatuurverschil met het omringende gesteente. Na circa 30 jaar zal de temperatuurkloof grotendeels overbrugd zijn.

De thermische uitzettingscoëfficiënt van pekels bedraagt $\alpha \approx 4,4 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$. In de eerst 15 jaren na afsluiting bedraagt de gemiddelde temperatuurtoename circa 1,5 °C/jaar en zet de pekels ongeveer 315 m³ per jaar uit. In een hermetisch afgesloten caveerne zou de pekelsexpansie tot een drukverhoging van circa 1 MPa/°C leiden (ref.19). Echter, als gevolg van de thermische verhoging van de pekeldruk van 1,5 MPa ten opzichte van de locale gesteentespanning wordt het jaarlijkse overschot aan opwarmende pekels alzijdig in het zoutlichaam weggedrukt. Het bolvormige caveerne-oppervlak bedraagt circa 29.000 m². Bij een veronderstelde zoutporositeit van 0,2 % zal de verdrongen pekels aanvankelijk met ongeveer 5 m per jaar het zoutlichaam

binnendringen. Wanneer de temperatuurkloof gedicht is zal circa 6000 m³ expansiepekkel alzijdig in een bolschil van circa 45 m dikte in het zoutlichaam zijn doorgedrongen.

Na circa 30 jaar is het permeatieproces door pekelopwarming uitgewerkt en blijft alleen de squeeze motor als drukverhogend proces over. Het permeatie-effect van de squeeze motor is vooral in het dak van de caverne aanwezig.

5.2.2 Realistische drukdeficiten en nieuwe zoutkruipmodellering

Om de resulterende squeezevolumes uit het WEP model meer realiteitsgehalte te geven, dienen zowel het squeezeproces als de cavernegeometrie te worden aangepast.

Bij een squeeze motor van 10 bar is de aanname van een drukdeficit $\Delta P = (P_o - P_i) \approx 10$ bar een logisch uitgangspunt. In de stabiele evenwichtstoestand van een afgesloten caverne zal de pekkel op het hoogste punt van de caverne zeker geen drukdeficit ten opzichte van de locale gesteentedruk vertonen, maar eerder een minime overdruk als gevolg van de squeeze motor. Als het zoutdak in caverne BAS-3 nog intact zou zijn geweest, zou dit punt ongeveer ter plaatse van de 13^e casing schoen op een diepte van 2408 m TV hebben gelegen. Het maximale drukdeficit van 10 bar treedt daarom juist op ter hoogte van de circa 100 m dieper gelegen top van de sump. Men kan de situatie realistisch benaderen door in het gemodificeerde WEP-model alle drukdeficiten te berekenen voor een conditie van 0 bar drukverschil op de referentiediepte van 2408 m TV.

Verder dient de cavernegeometrie in overeenstemming te worden gebracht met de resultaten uit de laatste echometing getoond in bijlage 8. In Tabel 6 zijn de nieuwe invoergegevens voor de cavernemodellering samengevat.

BAS-3 nieuw model (ref. sonar 2011)	Gemiddelde diepte (m TV)	Deelvolumen (m ³)	Drukdeficit re lithostatisch (bar)
C1	2429	55.000	2,0
C2	2452	80.000	4,2
C3	2479	290.000	6,7
C4	2504	51.000	9,1
Sumpstaart	2600	21.300	18,2

Tabel 6: BAS-3 herzien model, gebaseerd op de echometing van december 2011. De pekkel in de sumpstaart zit gebonden in de poriën en kan niet vrij bewegen.

Bij de zeer kleine drukverschillen tussen cavernepékkel en zoutformatie, gespecificeerd in Tabel 6, kan theoretisch niet volstaan worden met een louter niet-lineaire kruipmodellering. Het convergentieproces is een combinatie van lineaire en niet-lineaire zoutkruip. Men dient er echter rekening mee te houden, dat de GeoDelft LL en HL modelvarianten uit de Tabellen 4 en 5 niet goed aansluiten bij de convergentiewaarnemingen van caverne BAS-1, zoals duidelijk blijkt uit de figuren van bijlage 13.

Met behulp van het nieuwe cavernemodel is het effect van een aantal kruipvarianten nader onderzocht.

1. Het zuiver niet-lineaire kruipmodel geeft onrealistische resultaten. In bijlage 14 is het berekende permeatievolume op jaarbasis voor een periode van 100.000 jaar getoond. De permeatie bedraagt vanaf 2010 een verwaarloosbare 0,6 m³/jaar en neemt na tienduizenden jaren nauwelijks af. Vanwege de geringe cumulatieve permeatie treedt zelfs na 100.000 jaar nog geen bodemdaling op.

2. Toepassing van de GeoDelft LL-NL combinatievariant levert een ingrijpend ander beeld op. In bijlage 15 is het resultaat getoond. In de beginfase bedraagt de permeatie circa 230 m³/jaar en al na circa 500 jaar treedt de eerste bodemdaling op.
3. De derde variant gaat uit van het feit dat de curve van de LL-variant onvoldoende aansluit bij de BAS-1 waarneming bij een drukverschil van 75 bar. Bij kleinere drukverschillen wordt de afwijking verhoudingsgewijs snel groter ten opzichte van de best fit curve. In de derde variant is de lineaire kruip daarom een factor 4 kleiner genomen dan in de GeoDelft LL-variant ($A_2 = 0,185 \cdot 10^{-6}$ MPa/dag). Het modelresultaat is getoond in bijlage 16. In de beginfase bedraagt de permeatie iets minder dan 60 m³/jaar en na circa 2000 jaar treedt de eerste bodemdaling op.
4. De vierde variant is ontleend aan de modelresultaten van Lux (zie sectie 4.3). Als in het Lux-model voor de porositeit van de permeatiekegel 0,2% wordt genomen, zoals in alle WEP modellering het geval is, bedraagt de doorbraaktijd van de pekel naar de poreuze Bontzandsteen (begin bodemdaling) circa 11.000 jaar. Door de GeoDelft lineaire kruip met een factor 20 te verminderen ($A_2 = 0,037 \cdot 10^{-6}$ MPa/dag) wordt een modelresultaat bereikt, dat goed overeenkomt met de bevindingen van Lux, zoals de figuur in bijlage 17 aantoont.

Uit de voorgaande beschouwingen en variantenanalyse kan men ten aanzien van het eenvoudige WEP squeeze-model het volgende concluderen:

- Het squeezemodel dient standaard een combinatiemodel te zijn van lineaire en niet-lineaire zoutkruip.
- De pekeldruk in het dak van een afgesloten caverne dient identiek aan de lokale gesteentedruk te worden genomen (drukdeficit 0 bar), zodat de squeezemotor uitsluitend van onder uit de caverne het permeatieproces aandrijft.
- Bij de zeer geringe drukdeficiten in een afgesloten caverne wordt de kracht van de squeezemotor kritisch bepaald door de temperatuurafhankelijke modelcoëfficiënt A_2 voor lineaire zoutkruip.
- Alvorens een caverne definitief te verlaten dient men pekelafloeitesten bij een zo hoog mogelijke caverndruk uit te voeren om aan de hand van de resultaten de kritische modelcoëfficiënt A_2 betrouwbaar te kunnen calibreren.
- Het WEP squeezemodel is wat betreft het resulterende aanvangstijdstip van de bodemdaling een conservatief model. De voortgang van de pekelpermeatie wordt uitsluitend bepaald door de squeezemotor. Er is geen sprake van remmende factoren zoals Darcy-achtige stromingsprocessen in het zoutlichaam, die het aanvangstijdstip zouden kunnen vertragen.

6 Risico-analyse definitieve afsluiting caverne BAS-3

Op basis van de praktijkresultaten uit de insluittest van caverne BAS-2 en de modellering en gevoeligheidsanalyse van de permeatie- en migratieprocessen worden geen grote risico's verwacht met betrekking tot het definitief afsluiten van caverne BAS-3. De verwachte bodemdaling is sterk vertraagd en gespreid in de tijd over honderden tot duizenden jaren. Indien de gemiddelde carnallietconcentratie niet meer dan 30% is, bedraagt de uiteindelijke bodemdaling maximaal 5 cm. De uit het zoutlichaam afvloeiende carnallitische pekel, volgens het basismodel naar verwachting pas na 1300 jaar, wordt in de diepe ondergrond opgevangen. Er kan geen pekel naar maaiveld weglekken, indien de boorput volgens de huidige regelgeving effectief wordt afgesloten. De technische afdichting van de boorput BAS-3 vindt voorlopig alleen plaats in het onderste gedeelte tot aan het punt waar de side track naar de nieuwe caverne BAS-3-Original wordt geplaatst.

Omdat tot nu toe de industrie nauwelijks ervaring heeft opgedaan met het afsluiten van zeer diep gelegen cavernes heeft WEP al eerder een inventarisatie en analyse gemaakt van mogelijke risicofactoren (ref.1). De volgende risicofactoren zijn onderzocht:

1. Grotere en snellere bodemdaling dan voorspeld
2. Ontstaan van instortingskrater aan maaiveld
3. Onbeheersbare pekelluitstroming aan maaiveld door lekkende boorput
4. Vervuiling van ondiepe drinkwatervoerende zandlagen door weglekkende pekelluit
5. Bodemtrillingen
6. Invloed van processen in en rond de afgesloten caveerne BAS-3 op de nieuwe boorput en caveerne BAS-3-Original.

De grootte van het risico wordt bepaald door een combinatie van de kans van optreden van de gebeurtenis en de mogelijke gevolgen van deze gebeurtenis voor mens, bebouwing en infrastructuur, en milieu. Zonder in detail op de genoemde risicofactoren in te gaan is uit de analyse gebleken dat de kans van optreden van deze factoren nul tot zeer klein is. Ook de gevolgen lopen van verwaarloosbaar tot gering.

Met betrekking tot risicofactor no.1 heeft deze studie enige aanvullende inzichten opgeleverd. In het geval van een ingestort cavernedak en voortgezette pekelpermeatie vanuit de nieuw gevormde, platte caveerne in de carnallietlaag bereikt de carnallitische pekelluit na ongeveer 550 jaar de poreuze Bontzandsteen (zie sectie 4.2.1). De grootte van de zeer lange-termijn bodemdaling wordt ook nog bepaald door de carnallietconcentratie. Als de gemiddelde concentratie 55% bedraagt neemt de maximale bodemdaling in het diepste punt van de dalingskom mogelijk op geologische tijdschaal toe naar iets meer dan de standaardwaarde van 5 cm uit het basismodel (zie sectie 4.2.3 B).

Met betrekking tot risicofactor no.6 wordt hier vermeld dat de nieuwe boorput BAS-3- Original boven de Zurich schalie wordt afgetakt. Na harde afsluiting van de huidige caveerne BAS-3 is bovendien geen bodembeweging van betekenis meer te verwachten. De kortste afstand tussen de nieuwe caveerne en de afgesloten caveerne bedraagt circa 500 m.

In bijlage 18 is een ondergrondse dwarsdoorsnede op schaal getoond met het geplande boortraject van de put BAS-3-Original en de vermoedelijke hydraulische situatie in het jaar 2115 rondom caveerne BAS-3, die in open verbinding staat met de carnalliethoudende zoutlaag erboven. Na 100 jaar is circa 9000 m³ (100x90) pekelluit ingedrongen in de poriën van de Leine zoutformatie. Met een porositeit van 0,2% raakt 4,3 miljoen m³ Leine zout doordrenkt. Naar analogie van het pekelpermeatiepatroon in sectie 4.2.1 zal de afgeknotte kegel een hoogte van bijna 25 m bereiken, oftewel de permeatie is na 100 jaar maximaal doorgedrongen tot een diepte van 2183 m TV (2208-25). De geplande afgetakte boring en nieuwe caveerne komen te liggen in een sector van de Zechstein formatie, die in hydraulisch opzicht na 100 jaar nog geheel niet is aangetast door de ontwikkelingen in en rond caveerne BAS-3.

De afstand tussen de huidige caveerne BAS-3 en de nieuwe caveerne BAS-3-O is ongeveer gelijk aan de afstand tussen de caveerne BAS-1 (lage druk tot 2009) en de sinds eind 2004 ingesloten, onder hoge-druk staande caveerne BAS-2. Tussen die cavernes is nooit een hydraulische verbinding ontstaan en er is alleen een vermoeden dat er enige wederzijdse beïnvloeding van de cavernedrukken heeft bestaan via gesteentemechanische spanningsoverdracht. De dwarsdoorsnede van bijlage 18 plaatst de winningsoperaties en complexe abandonneringsaspecten van de diepe Frisia cavernes in een juist en realistisch perspectief ten opzichte van het op grote afstand gelegen maaiveld.

7 Samenvattende conclusies

Met betrekking tot het definitief verlaten van caveerne BAS-3 volgt nu een samenvatting van de belangrijkste resultaten en conclusies uit de analyses met een basismodel, een herzien squeezemodel en diverse modelvarianten. Waar Bontzandsteen in de tekst staat wordt bedoeld: het gecombineerde 126 m dikke poreuze gesteentepakket van de ZE-IV kleisteen en de Onder-Bontzandsteen.

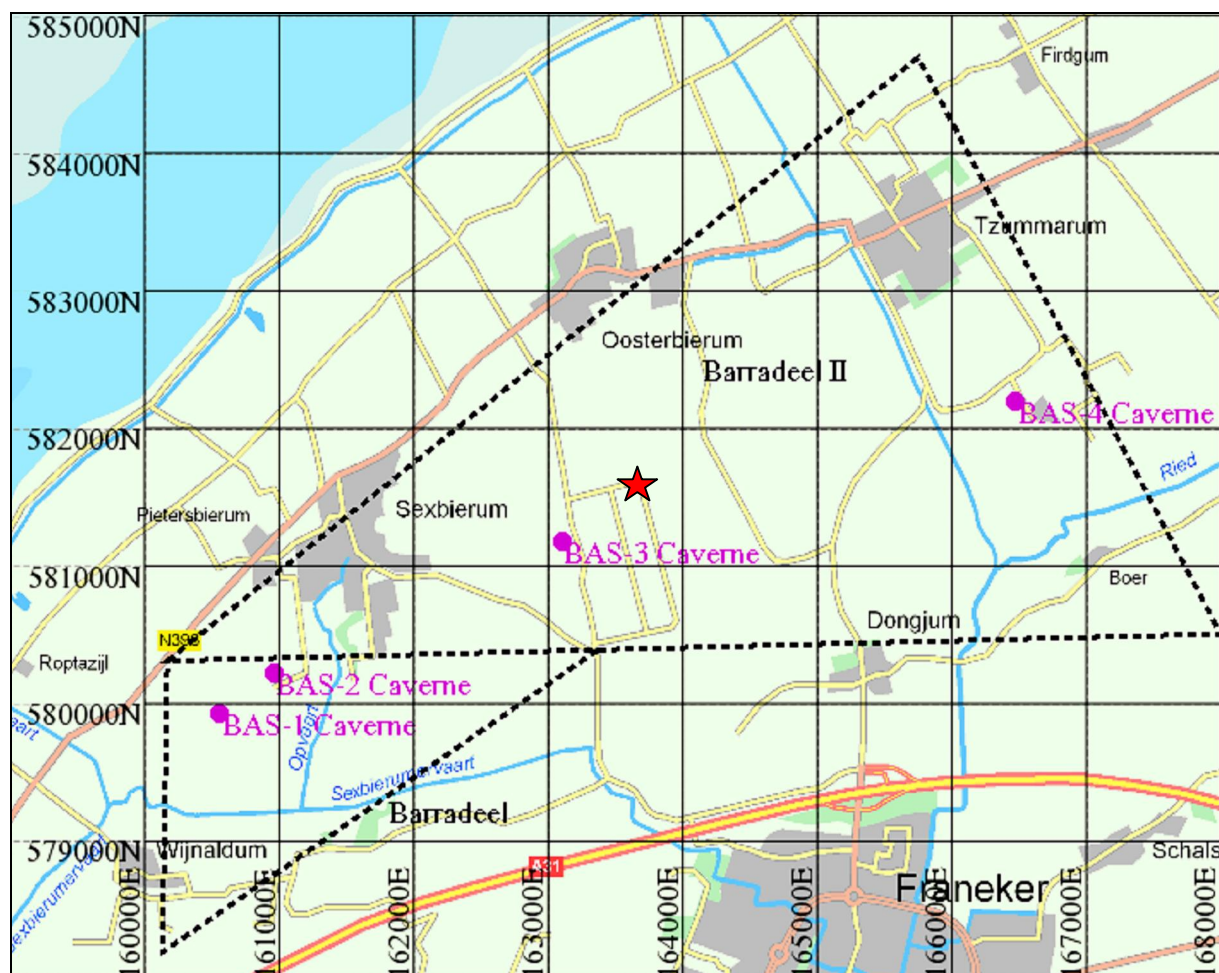
1. Bij de zeer geringe drukverschillen in een afgesloten caveerne tussen pekeldruk en gesteentedruk in het zout wordt de kracht van de WEP squeezemotor kritisch bepaald door de temperatuurafhankelijke modelcoëfficiënt A_2 voor lineaire zoutkruip.
2. Alvorens een caveerne definitief te verlaten dient men pekelafluoitesten bij zo hoog mogelijke cavernedrukken uit te voeren om aan de hand van de resultaten de kritische modelcoëfficiënt A_2 betrouwbaar te kunnen calibreren.
3. Het WEP squeezemodel is wat betreft het berekende aanvangstijdstip van de bodemdaling een conservatief model. De voortgang van de pekelpermeatie wordt uitsluitend bepaald door de squeezemotor. Er is geen sprake van remmende factoren zoals Darcy-achtige stromingsprocessen in het zoutlichaam, die het aanvangstijdstip zouden kunnen vertragen.
4. De doorbraak van het halietskak van een caveerne, waardoor de halietspek uit de caveerne versneld converteert naar carnallitische pek, leidt niet tot bijzondere of onacceptabele risico's. Wel ontstaat in de carnallitietlaag een nieuwe, platte caveerne met een verwachte diameter van ongeveer 200 m.
5. Tijdens de pekconversie ontstaat veel verkrumeld, in carnallitische pek onoplosbaar, residu met een porositeit van ongeveer 28,5%. Dit materiaal ondersteunt het omringende zout en zal nauwelijks compacteren. De in de poriën aanwezige pek zit daardoor blijvend gebonden en is doodvolume geworden.
6. Een door dakdoorbraak versnelde conversie naar carnallitische pek veroorzaakt vermoedelijk een afwijkend permeatiepatroon, waarbij er zich in de carnallitietlaag in korte tijd een lateraal permeatiefront zal ontwikkelen met een straal van maximaal 235 m gerekend vanaf de boorput. Ook zal de carnallitische pek sneller de poreuze Bontzandsteen bereiken en dan bodemdaling veroorzaken. Maar, dit leidt niet tot een grotere bodemdaling dan in de situatie zonder dakdoorbraak.
7. Het dak van de in de carnallitietlaag ontstane nieuwe caveerne wordt gevormd door een anhydrietlaag. Dit anhydrietskak zal niet bezwijken, uitgezonderd de situatie dat de poriën in de anhydrietlaag in de oorspronkelijke toestand droog zouden zijn (dan poriedruk nul en kans op hydraulische fracturing). De boorput BAS-3 is in september 2014 geheel drukloos gemaakt door middel van een eerste cementbarrière. De caveerne staat nu op lokale lithostatische druk, zodat mechanische overbelasting van het anhydrietskak volstrekt uitgesloten wordt geacht.
8. In het minder waarschijnlijke geval dat het anhydrietskak door een hydraulische fracturing proces zou bezwijken, ontstaat zoveel nieuw verkrumeld materiaal, dat alle nog vrije pek er definitief in gebonden wordt en verdere verbrekking zal stoppen. Als de drukfactor van het anhydriet voldoende groot is ($bf > 1,25$) stopt het proces nog voordat de Leine zoutlaag bereikt wordt.

9. Als de gesteenten boven de caverne bezwijken totdat het hele vrije pekervolume is opgevuld met verbrokkeld materiaal, is alle vrije pekervolume geworden. Dat is de meest gunstige ontwikkeling, omdat er dan geen pekervolume meer uit de Zechstein naar de poreuze Bontzandsteen kan afvloeien. Er zal daardoor ook geen bodemdaling op de korte- of lange termijn meer optreden.
10. Een risico-analyse heeft uitgewezen, dat de onderzochte risicofactoren waarschijnlijk niet optreden en dat de gevolgen verwaarloosbaar tot gering zijn.
Een onderzochte factor wordt hier apart vermeld: de definitief verlaten caverne BAS-3 vormt geen risico voor de afgetakte boorput en caverne BAS-3-Original.
11. Niet of nauwelijks permeabele, dikke schalielagen uit de Trias en Krijtperiode, tussen de Zechstein zoutformatie en het maaiveld gelegen, vormen zoveel barrières, dat de carnallitische pekervolume niet de Tertiaire of Quartaire aardlagen kan bereiken.
12. Een effectief en over voldoende lengte afgecementeerde boorput zal geen lekpad naar maaiveld kunnen vormen, ook niet als het onderste gedeelte van de verbuizing zou afbreken als gevolg van een doorbraak van het caverne dak. De boorput BAS-3 is in september 2014 reglementair afgecementeerd tot boven de Zurich schalie.

8 Referenties

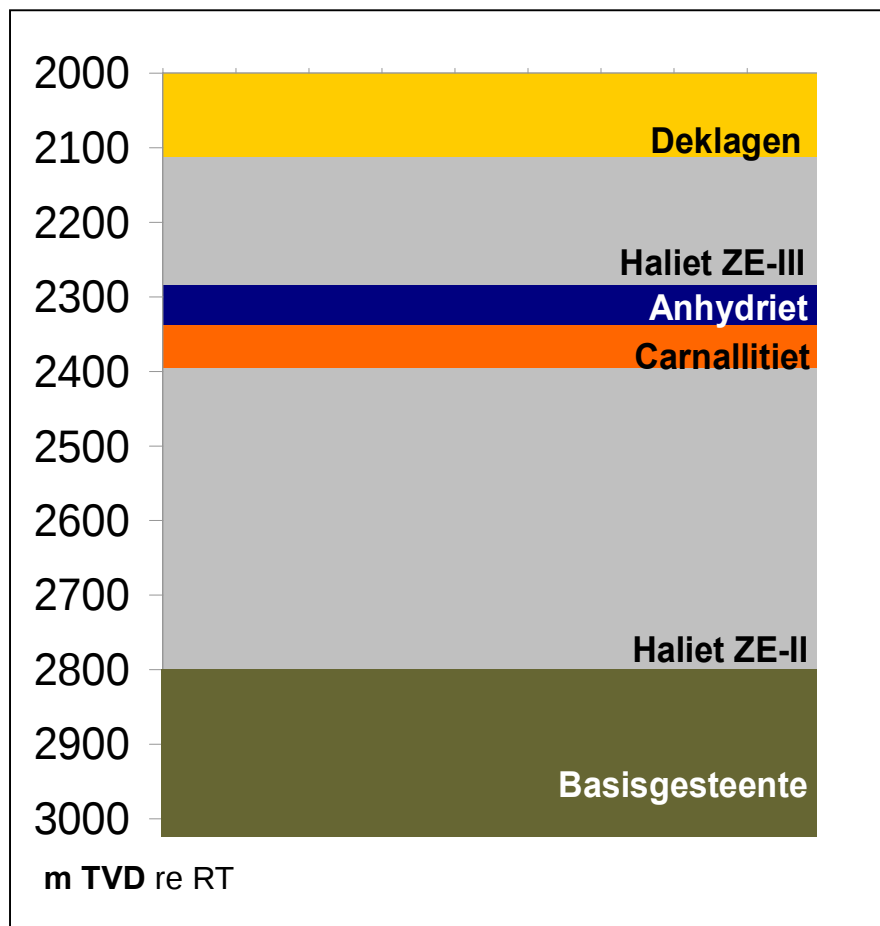
1. Frisia cavern abandonment BAS-3, Final v.17, esco/Frisia Zout BV, 24 December 2010.
2. Addendum Carnallitic Brine Conversion BAS-3, esco/Frisia Zout B.V., September 2012.
3. BAS-2 high pressure shut-in monitoring period, Frisia Zout B.V., 10 May 2010.
4. Abandonment of an extremely deep cavern at Frisia Salt, H. van Heekeren et al., SMRI Spring 2009 Technical Conference, Krakow, Poland, April 2009.
5. Frisia Bericht: Lösekinetik von Carnallitschichten im Rahmen von Stilllegungsszenarien, N.G. Grüşchow, Sondershausen, maart 2010.
6. Untersuchung der konvergenzinduzierten zeitlichen und räumlichen Soleinfiltration aus der Kaverne BAS-3 in das anstehende Steinsalzgebirge, Abschlussbericht, K.-H. Lux en R. Wolters, TU Clausthal, december 2010.
7. Ronde schijven en platen, P.Hoogenboom, Sectie Constructiemechanica, TU Delft, februari 2008.
8. Permeability prediction based on fractal pore-space geometry, H. Pape et al., Geophysics, Vol.64, No.5, 1999, pp.1447-1460.
9. The feasibility of CO₂ storage in the depleted P18-4 gas field offshore the Netherlands, R. Arts et al., Int.J.Greenhouse Gas Control, 2012.
10. An in situ creep test in advance of abandoning a salt cavern, B. Brouard, SMRI Fall Conference, Berlin, Germany, October 2004.
11. Review of static and dynamic compressibility issues relating to deep underground caverns, P. Bérèst et al., Int.J. Rock Mech Min Sci., 1999, pp 36:1031-1049.
12. Compressibility of sandstones, R.W. Zimmerman, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1991.
13. Development of damage and permeability in deforming rock salt, O. Schulze et al., Engineering Geology 61 (2001), pp.163-180.
14. High pressure cavern analysis, R. Rokahr et al., SMRI Research Project Report No.2002-2, October 2002.
15. Applied rock mechanics (TA 4120 I), J.P.A. Roest, TU Delft, 2001.
16. Geological Atlas of the Subsurface of the Netherlands ñ Onshore, NITG-TNO, 2004.
17. Technische Bijlage bij Meet- en regelprotocol winningsplan Barradeel IIö esco/Frisia Zout B.V., In voorbereiding.
18. Convergence and stability simulations for the BAS-3 cavern, J.P. Puijsma, GeoDelft report 400133-0006 v03, March 2007.
19. A salt-cavern abandonment test, P. Bérèst et al., SMRI Spring 1999 Meeting, Las Vegas, USA, April 1999.
20. Thermal effects in salt caverns, Karimi-Jafari et al., SMRI Spring 2007 Meeting, Basel, Switzerland, May 2007.
21. Influence of the leaching phase on the mechanical behavior of salt caverns, B. Brouard et al., SMRI Spring 1997 Meeting, Cracow, Poland, May 1997.
22. Geological Report of Salt Formations BAS#2, R. Rohleder, KBB, Hannover, July 1995.
23. Temperature modeling during salt cavern leaching process, A. Rouabhi et al., SMRI Spring 2007 Conference, Basel, Switzerland, April 2007.
24. Persoonlijke mededeling gebaseerd op BGR onderzoek, W. Paar, AkzoNobel, Hengelo, 2012.
25. A simple method for modeling the pressure build up or flow of an abandoned solution well, L.van Sambeek, SMRI Spring Meeting, Austin, TX, 1990.
26. Shut-in gedrag en stabiliteit Frisia caveerne, J.P.Puijsma, GeoDelft rapport CO-400132-0006 v02, juli 2005.

Bijlage 1: Ligging van vergunninggebieden Barradeel en Barradeel II



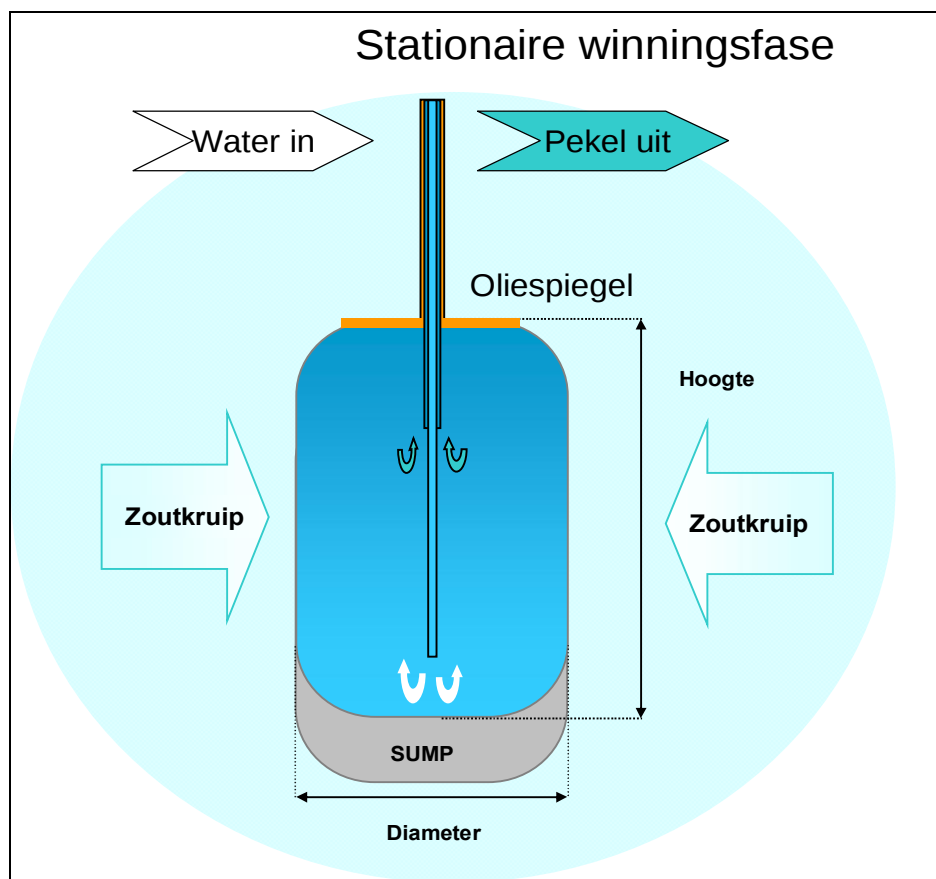
De vergunninggebieden zijn weergegeven door de zwart gestippelde driehoeken. Ook de positie van de huidige vier cavernes is aangegeven. De toekomstige caverne BAS-3-Original zal ongeveer 500 m ten noordoosten van de huidige caverne BAS-3 worden aangelegd. De geplande positie heeft de RD-coördinaten X=163.486, Y=581.542, weergegeven door een rode ster.

Bijlage 2: Stratigrafie van Zechstein zoutpakket in Barradeel II



De dieptes op de linkeras zijn aangegeven in m TVD t.o.v. RT (Rotary Table), met RT @ +10 m NAP. In de eerdere 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 3: Stationaire winning van steenzout uit een caverne



Gedurende de stationaire winningsfase geldt: $\text{Pekel uit} = \text{Water in} + \text{Zoutkruip}$. De sumpöop de bodem van de caverne bestaat uit een losgepakte hoop niet in halietpekkel oplosbare bestanddelen, zoals kleisteen en anhydriet.

Bijlage 4: Volumebalansen voor twee concentraties carnallitiet

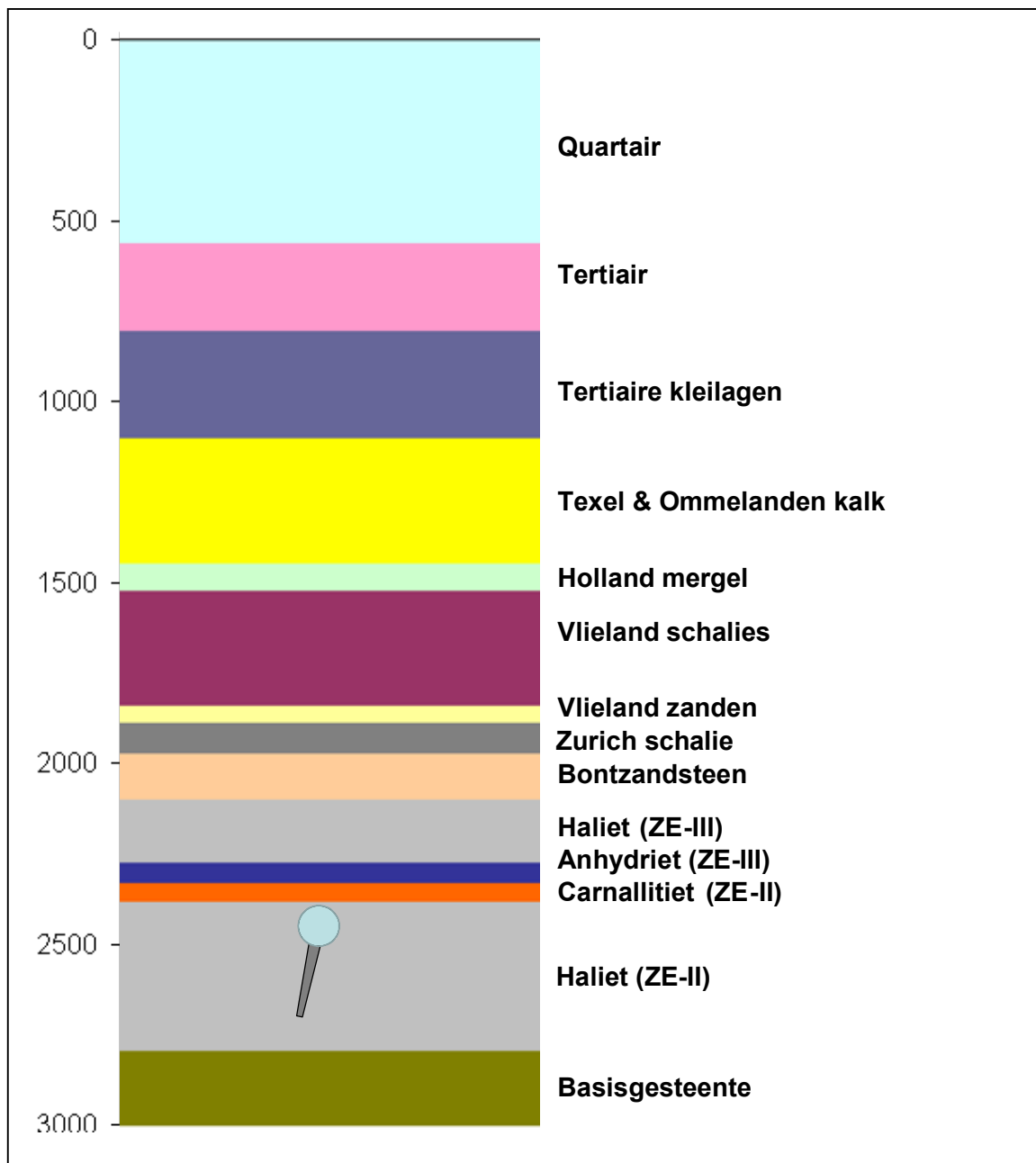
Volumenbilanz:	m ³	Schütt- volumen m ³	Poren- volumen m ³	"Freie" Lösung m ³
Quinäres System; 85°C; 30% iger Carnallitit				
Lösemittel (NaCl Solevolumen)	1,00			
aufgelöstes Carnallitgestein	3,53			
Kieserite: 10 %				
Carnallite: 30 %				
Sylvite: 0 %				
Halite: 53 %				
Insolubles: 7 %				
Summe	4,53			
Gleichgewichtslösung	2,09			1,05
Primärer Kieserit	0,27	0,38	0,11	
Primär+ Zersetzungs-Sylvin	0,22	0,30	0,09	
Primär und Kristallisierter Halit	1,92	2,69	0,77	
Unlösliches (Ton, Anhydrit)	0,18	0,25	0,07	
Summe	4,68	3,63	1,04	

- a) Volumebalans als 1 m³ halietpekel in contact komt met **30%** carnalliethoudend zout. De term "aufgelöstes Carnallitgestein" dient men te interpreteren als "aangetast carnallitiet" waaruit 30% carnalliet wordt opgelost. De rest (70%) is onoplosbaar in carnallitische pekkel en slaat neer als een poreus residu (met bulking factor 1,4).

Volumenbilanz:	m ³	Schütt- volumen m ³	Poren- volumen m ³	"Freie" Lösung m ³
Quinäres System; 85°C; 55% iger Carnallitit				
Lösemittel (NaCl Solevolumen)	1,00			
aufgelöstes Carnallitgestein	2,06			
Kieserite: 10 %				
Carnallite: 55 %				
Sylvite: 0 %				
Halite: 28 %				
Insolubles: 7 %				
Summe	3,06			
Gleichgewichtslösung	2,09			1,65
Primärer Kieserit	0,14	0,20	0,06	
Primär+ Zersetzungs-Sylvin	0,22	0,30	0,09	
Primär und Kristallisierter Halit	0,64	0,90	0,26	
Unlösliches (Ton, Anhydrit)	0,10	0,14	0,04	
Summe	3,18	1,54	0,44	

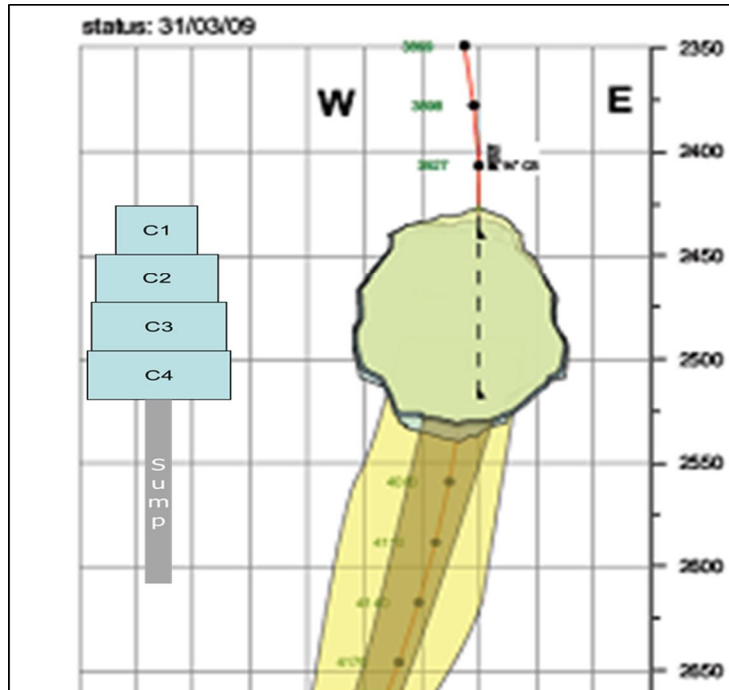
- b) Volumebalans als 1 m³ halietpekel in contact komt met **55%** carnalliethoudend zout.

Bijlage 5: Volledige stratigrafie in de omgeving van caverne BAS-3

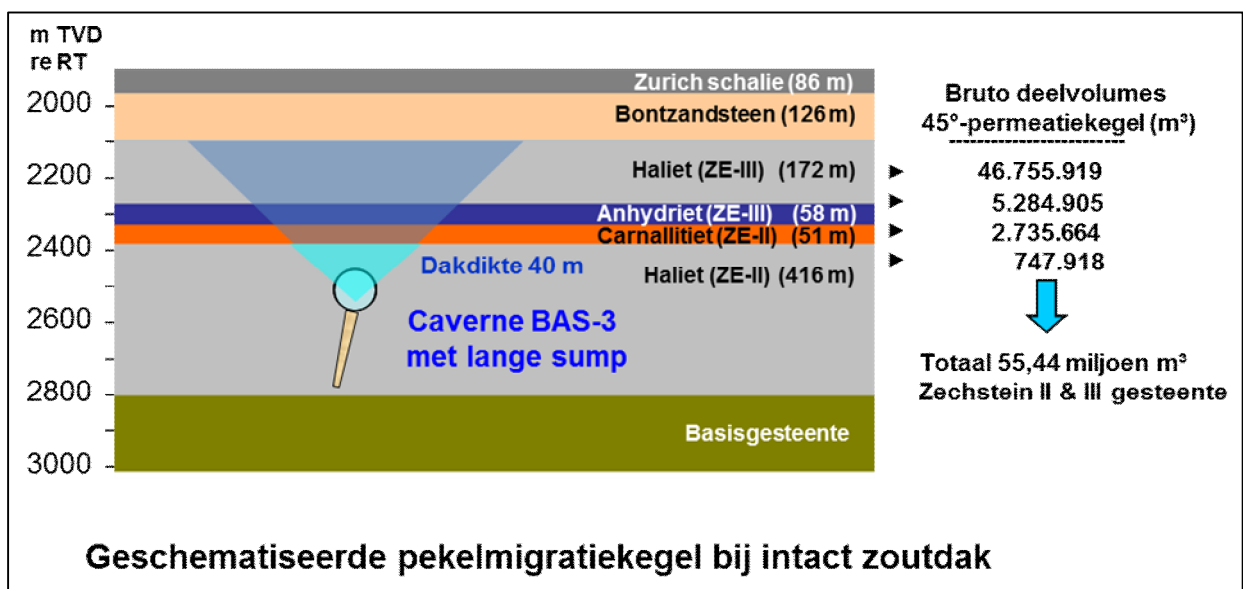


Volledige stratigrafie met diepte-aanduiding in m TVD t.o.v. RT van de gesteenten boven de caverne BAS-3, die weergegeven is als lichtblauwe bol met middelpunt op een diepte van 2489 m (2479 m TV NAP) en met 300 m sumpstaart in grijs eronder. De laag, aangeduid met Bontzandsteen, bestaat uit de poreuze ZE-IV kleisteen en de Onder-Bontzandsteen.

Bijlage 6: WEP-modellering BAS-3 basismodel

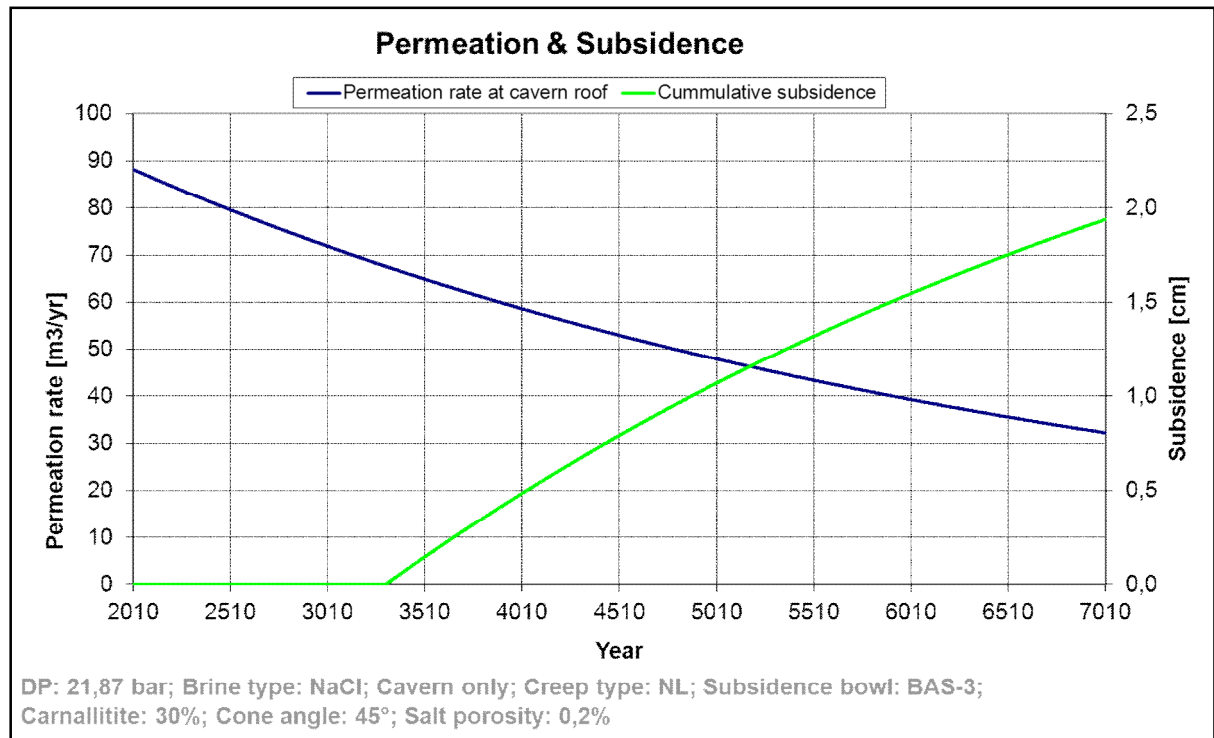


- a) WEP basismodel BAS-3, gebaseerd op de echometing van maart 2009. De modelcaverne is opgebouwd uit 4 compartimenten C1-C4 en een sumpstaart. Het gemeten totale open cavernevolumen C1-C4 bedraagt 450.000 m³. De poreuze sumpstaart heeft een in de poriën gebonden pekervolumen van circa 21.300 m³.



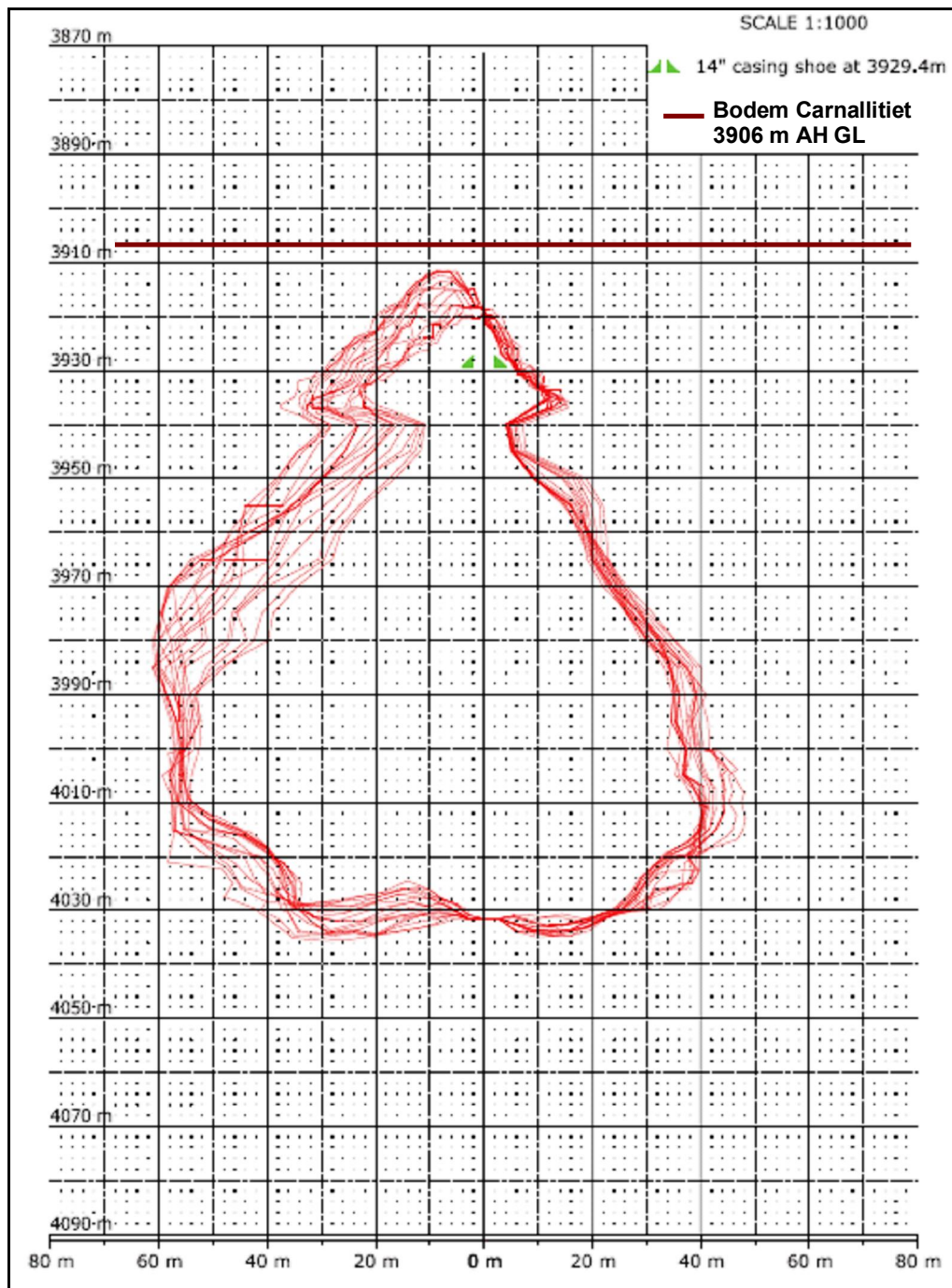
- b) Eindsituatie modellering pekelpermeatie in Zechstein-II & III zoutformatie bij intact steenzoutdak caverne BAS-3. De met Bontzandsteen aangeduide gesteentelaag bestaat uit de ZE-IV kleisteen (23 m) en de Onder-Bontzandsteen (103 m).

Bijlage 7: Ontwikkeling caverneconvergentie en bodemdaling in de loop van 5000 jaar



Permeatievolume per jaar (donkerblauwe curve) en bodemdaling (groene curve) in de loop van 5000 jaar berekend door het basismodel voor caverne BAS-3 vanaf beginjaar 2010. Als standaardporositeit van de hele permeatiekegel met tophoek 45° is 0,2% genomen. Na circa 1300 jaar, gerekend vanaf 2010, treedt de eerste bodemdaling op (ref.1).

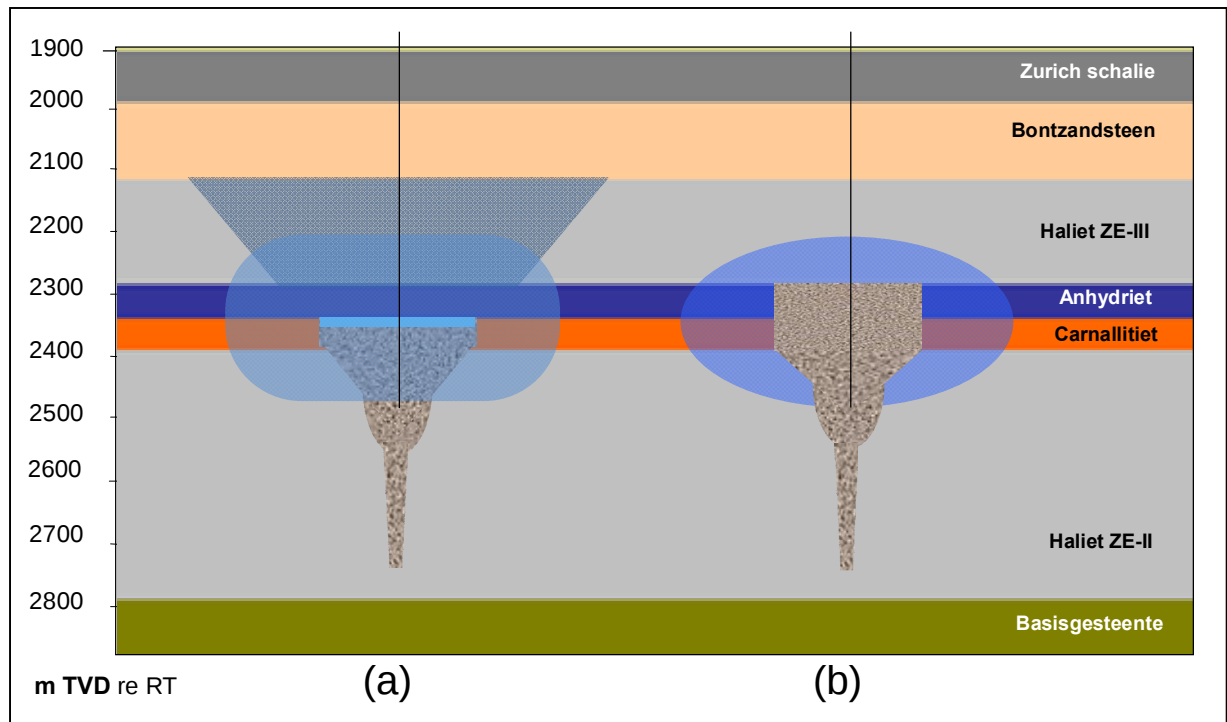
Bijlage 8: Meetresultaat laatste echometing BAS-3 in december 2011



Dwarsdoorsnede van de samengestelde meetresultaten van een echometing vanuit verschillende meethoeken in caverne BAS-3 in december 2011. De diepte is aangegeven in m AH (= m TV + 1522 m). Bodem Carnallitiet ligt op een diepte van 3906 m AH, wat overeenkomt met 2384 m TV NAP (zie Tabel 1). Het gemeten totale pekervolume bedraagt 475.818 m³.

Bijlage 9: Mogelijke werking van anhydrietlaag boven caverne met ingestort steenzoutdak

In onderstaande figuur zijn twee mogelijke vervolgprocessen getoond nadat het steenzoutdak van de oorspronkelijke caverne is ingestort (in afwijking van het basismodel). De diepte is gegeven in m TVD re RT, met RT @ +10 m NAP.



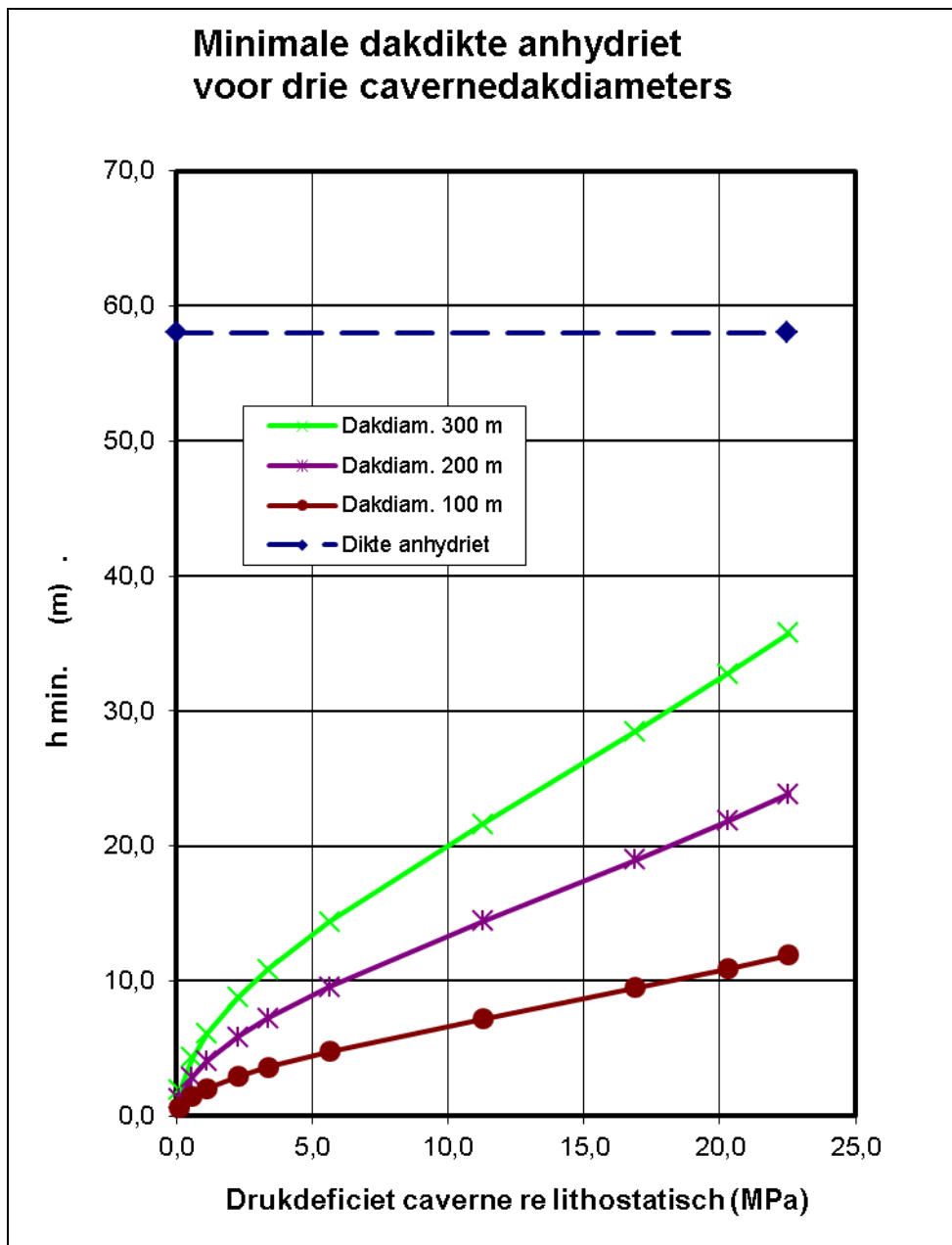
Proces (a): Anhydrietlaag houdt stand, ondanks de aanwezigheid eronder van een nieuwe platte caverne (lichtblauwe kleur), gevuld met vrije carnallitische pekels.

De overmaat aan pekels als gevolg van volume-expansie door pekelsconversie wordt alzijdig en in korte tijd in het omringende gesteente gedrukt (blauwe permeatievlak met ronde einden), in het horizontale vlak tot een afstand van **maximaal 235 m** vanaf de as van de boorput. Daarna volgt lange-termijn permeatie van de vrije pekels volgens een conusvormig patroon (donker grijsblauwe vlak) richting deklagen. De straal van de basis van de omgekeerde kegel ter hoogte van de onderkant Bontzandsteen bedraagt circa 330 m.

Proces (b): Anhydrietlaag bezwijkt.

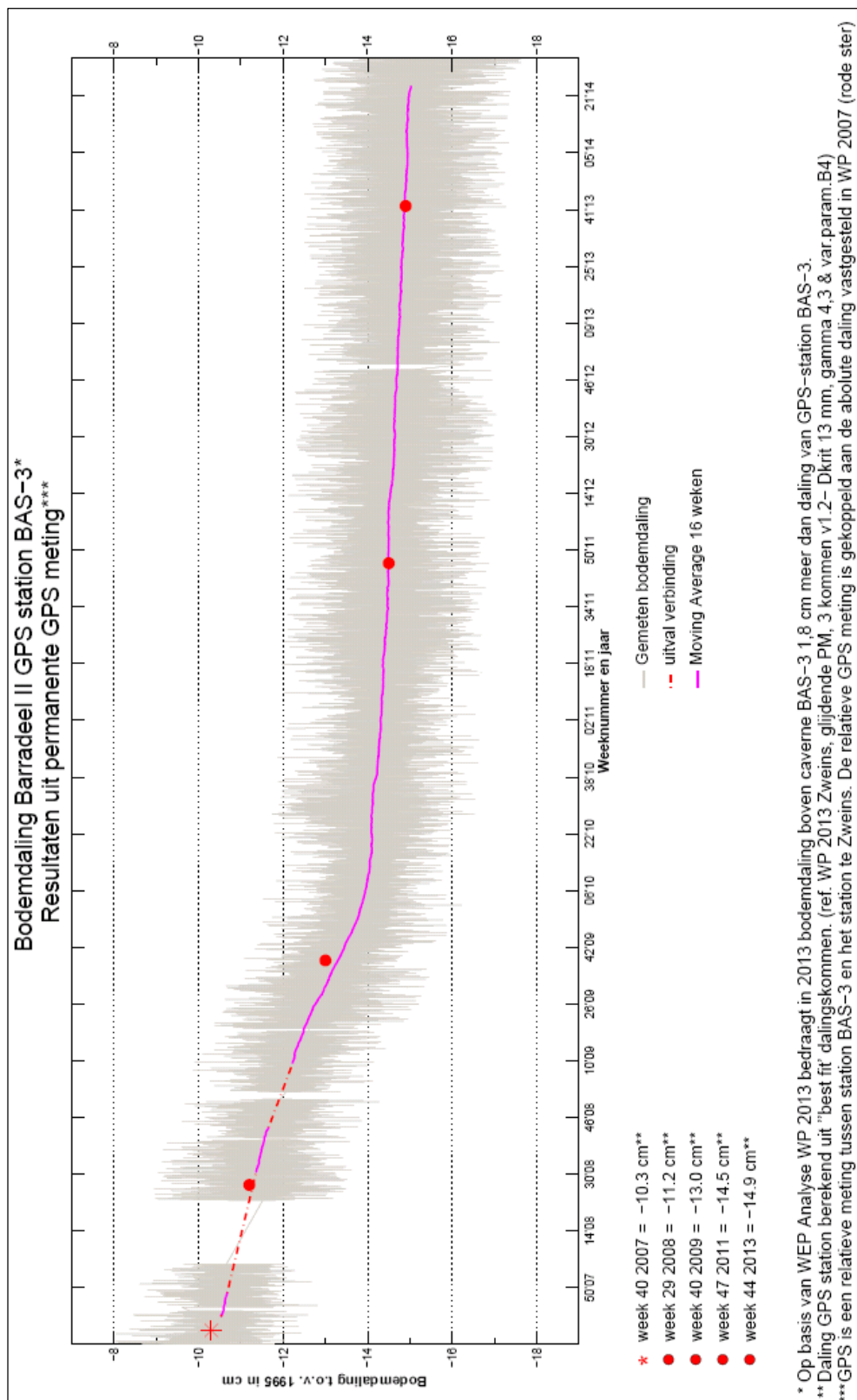
De platte caverne met vrije pekels kruipt verder omhoog, maar verliest snel hoogte door bulking van verbrokken anhydrietgesteente. De lichtblauwe ellipsvormige structuur schetst de mogelijke indringing van de uit volume-expansie ontstane overmaat aan carnallitische pekels in het omringende gesteente. In het horizontale vlak vindt pekelsindringing plaats tot een afstand van **maximaal 235 m** vanaf de as van de boorput. De rest van de carnallitische pekels zit vastgebonden in de poriën van alle ingestorte en verbrokkelde gesteenten.

Bijlage 10: Minimaal voor dakstabiliteit vereiste dikte anhydrietlaag

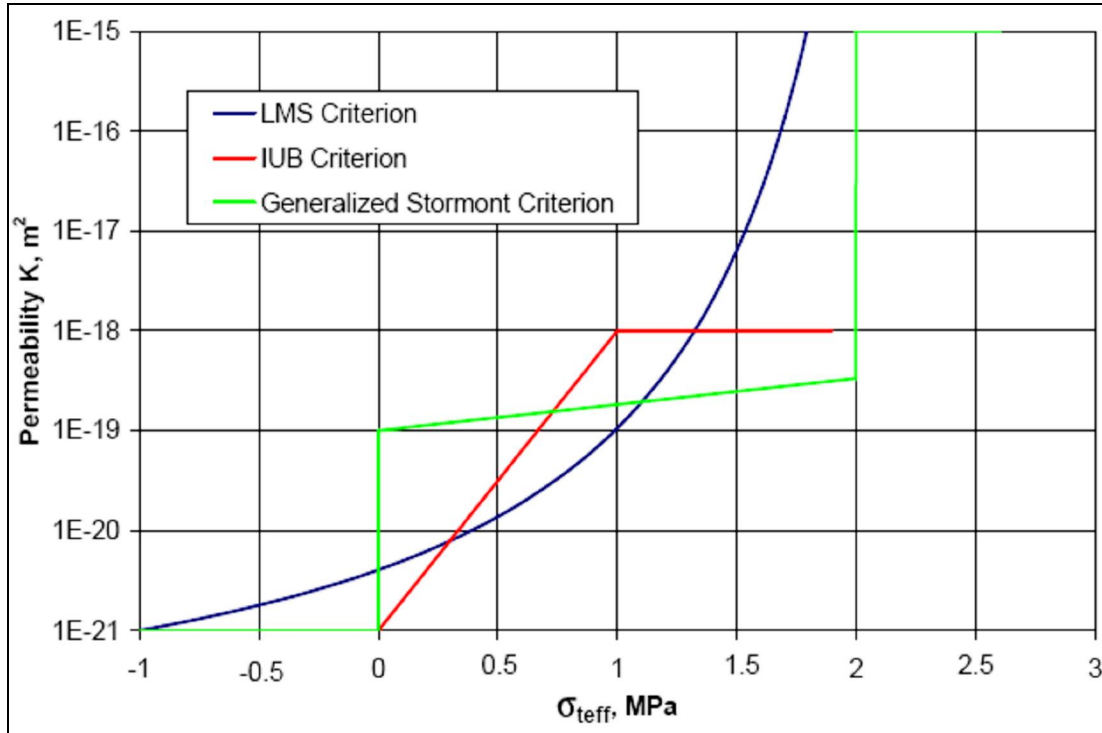


De blauwe stippellijn in de grafiek geeft de dikte van de anhydrietlaag boven caverne BAS-3 weer (58 m, zie Tabel 1).

Bijlage 11: Meetresultaten GPS station BAS-3 (tot juli 2014)



Bijlage 12: Criteria voor zoutpermeabiliteit als functie van σ_{eff}

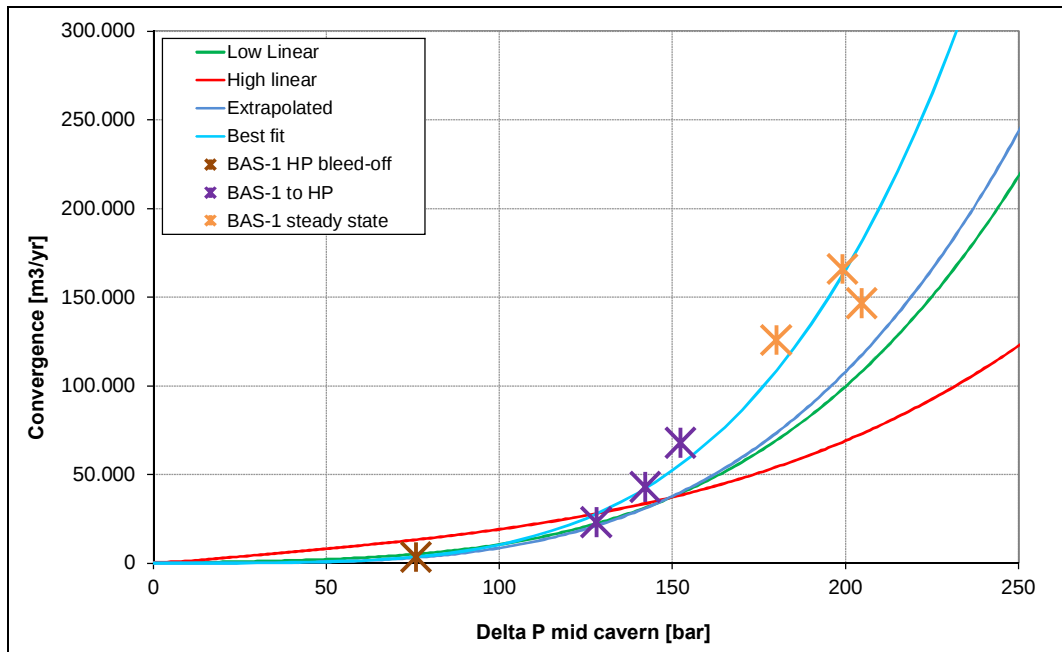


Drie verschillende criteria voor de verandering van de permeabiliteit van steenzout als functie van de effectieve vloeistofspanning in de richting van de vloeistofstroming, waarbij $\tilde{u}_{t,\text{eff}} = P - \tilde{u}_t = -\psi P$. In zout is $\tilde{u}_t$ (t = tangentieel) ongeveer gelijk aan de lokale lithostatische druk en $\tilde{u}_{t,\text{eff}}$ geeft de overdruk van de pekkel in de poriën ten opzichte van de lithostatische druk aan.

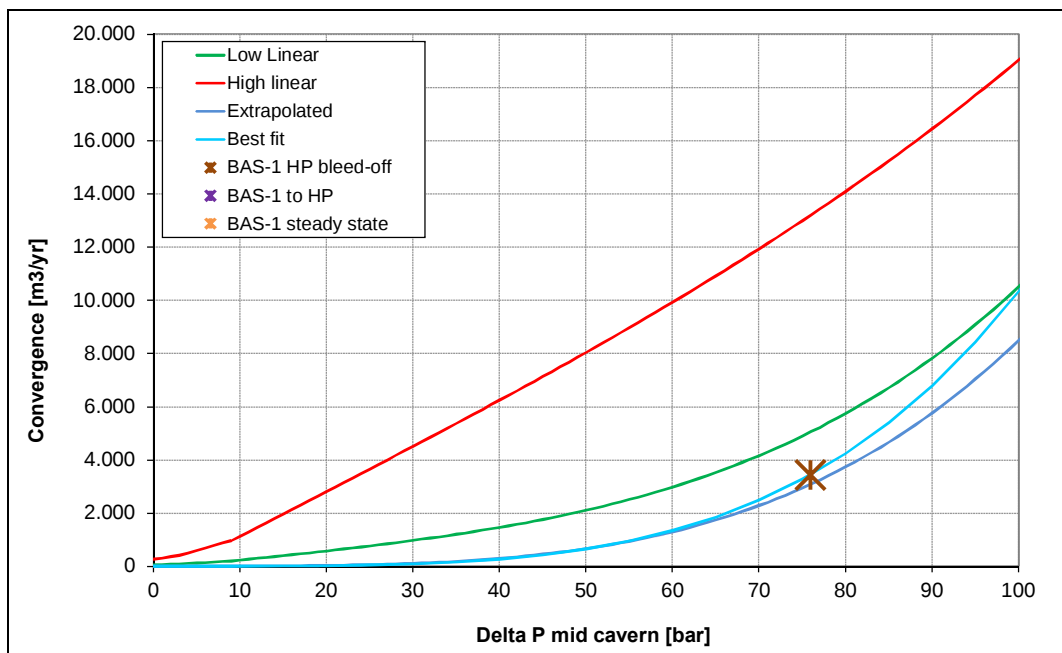
Alle criteria tonen dat de permeabiliteit van het zout snel toeneemt zodra de pekkel een toenemende overdruk ten opzichte van de lokale lithostatische druk krijgt. Bij een overdruk van 1 MPa kan de zoutpermeabiliteit al oplopen naar 10^{-18} m^2 .

(Bron: ref.14).

Bijlage 13: Convergentiewaarnemingen caverne BAS-1

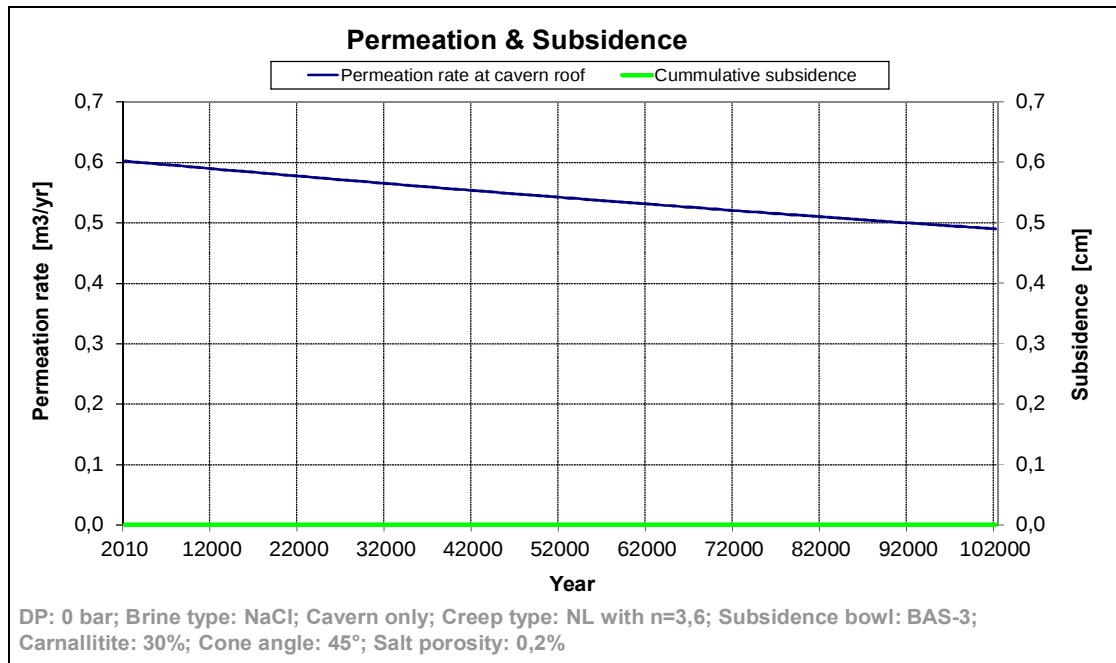


- a) Convergentiesnelheden van caverne BAS-1 op jaarbasis als functie van het drukdeficit in het middelpunt van de caverne (@ 2700 m TV en 100 °C). Alle waarnemingen (sterretjes) zijn genormaliseerd op basis van een cavernevolumen van 300.000 m³ (ref.1).



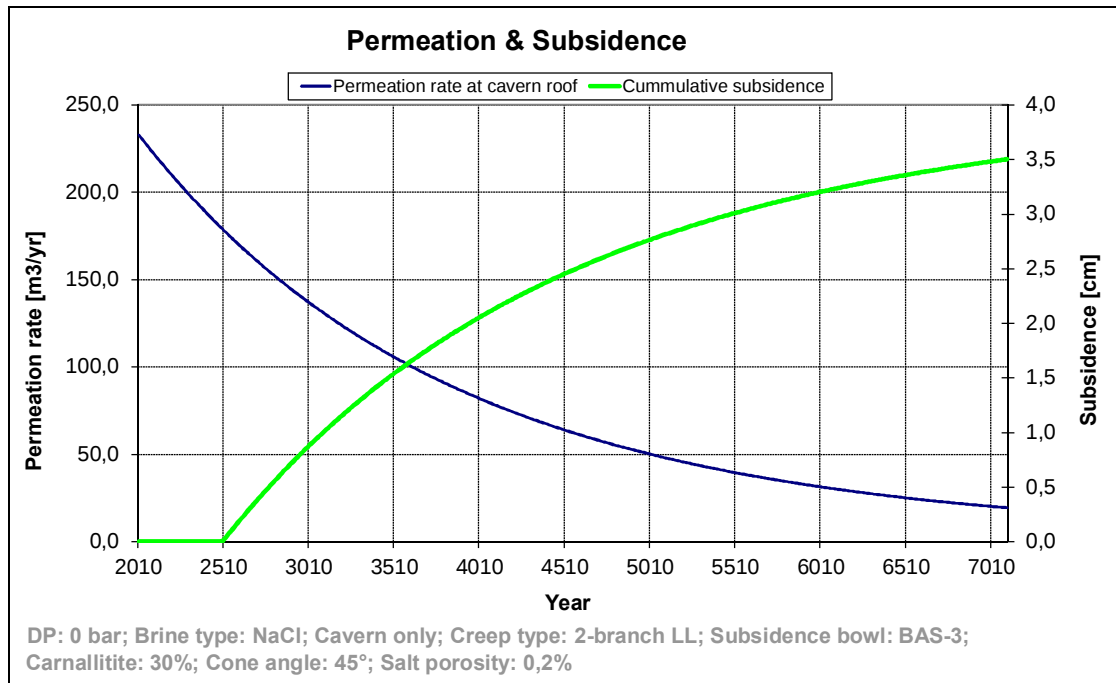
- b) Uitvergroting van drukbereik 0-100 bar uit figuur 3a. De GeoDelft LL- en HL-kruipvarianten berekenen voor dit bereik (veel) meer convergentie dan in de praktijk waargenomen.

Bijlage 14: Permeatie bij niet-lineaire kruip nieuw model BAS-3



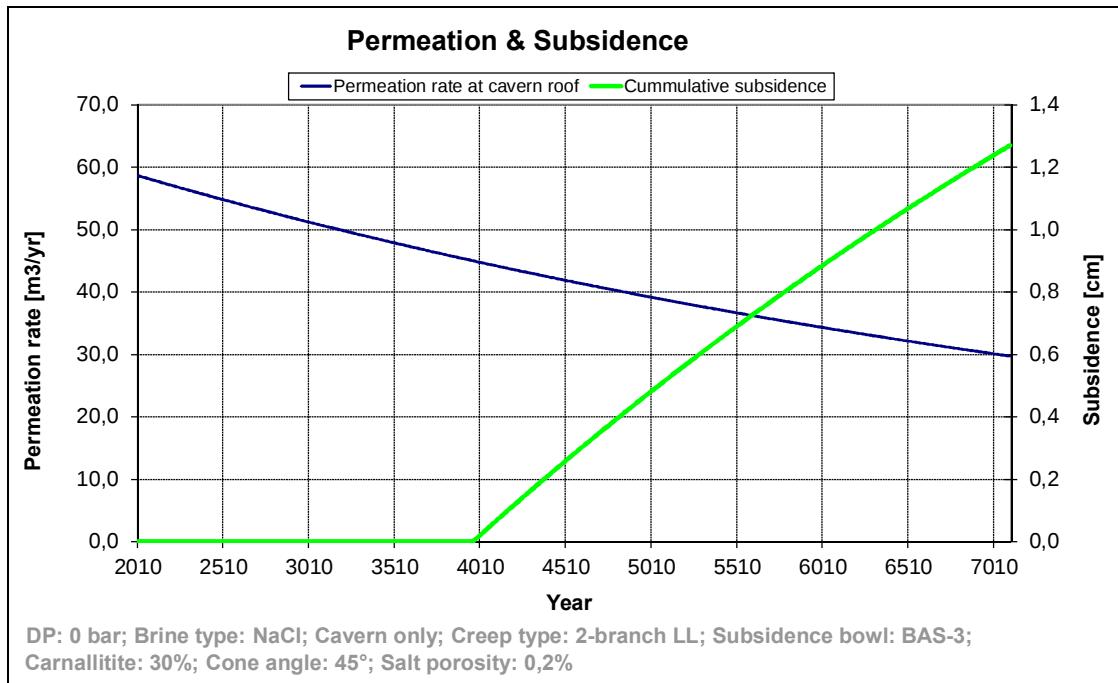
Permeatievolume per jaar (donkerblauwe curve) en bodemdaling (groene curve) in de loop van 100.000 jaar, berekend met behulp van het nieuwe niet-lineaire model voor caverne BAS-3 vanaf beginjaar 2010. Als standaardporositeit van de hele permeatiekegel met tophoek 45° is 0,2% genomen. Zelfs na 100.000 jaar treedt nog geen bodemdaling op.

Bijlage 15: Permeatie bij lage lineaire kruip nieuw model BAS-3



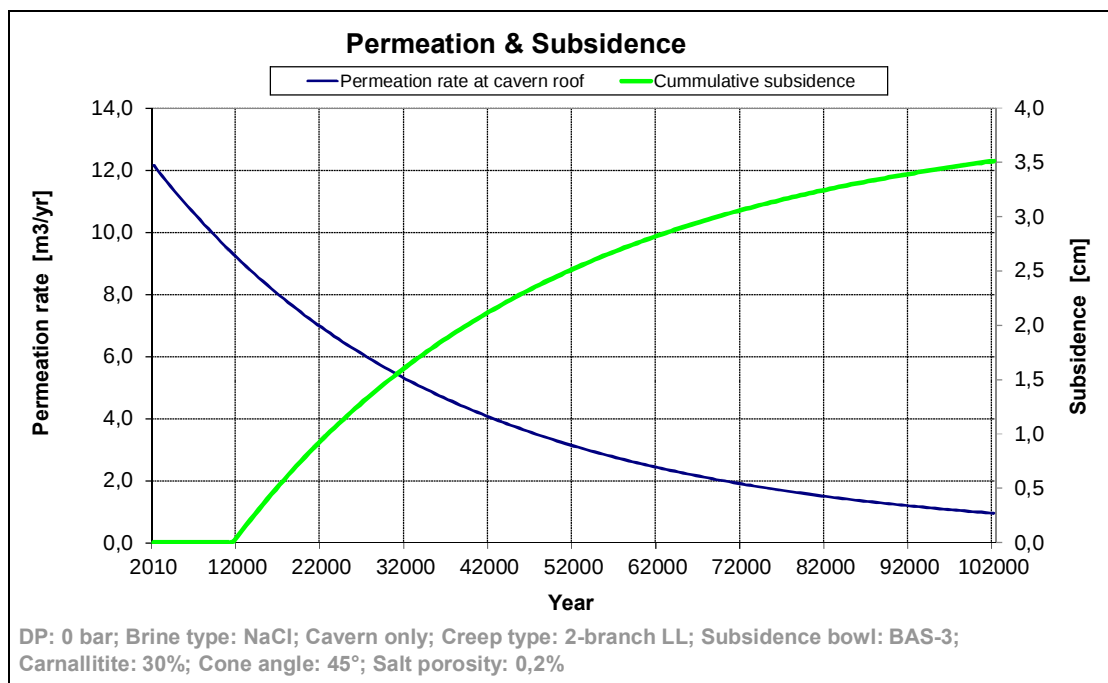
Permeatievolume per jaar (donkerblauwe curve) en bodemdaling (groene curve) in de loop van 5000 jaar berekend met het GeoDelft lage-lineaire kruipmodel voor caverne BAS-3 vanaf beginjaar 2010. Als porositeit van de hele permeatiekegel met tophoek 45° is 0,2% genomen. Na circa 500 jaar treedt de eerste bodemdaling op.

Bijlage 16: Permeatie bij gereduceerde lage lineaire kruip BAS-3



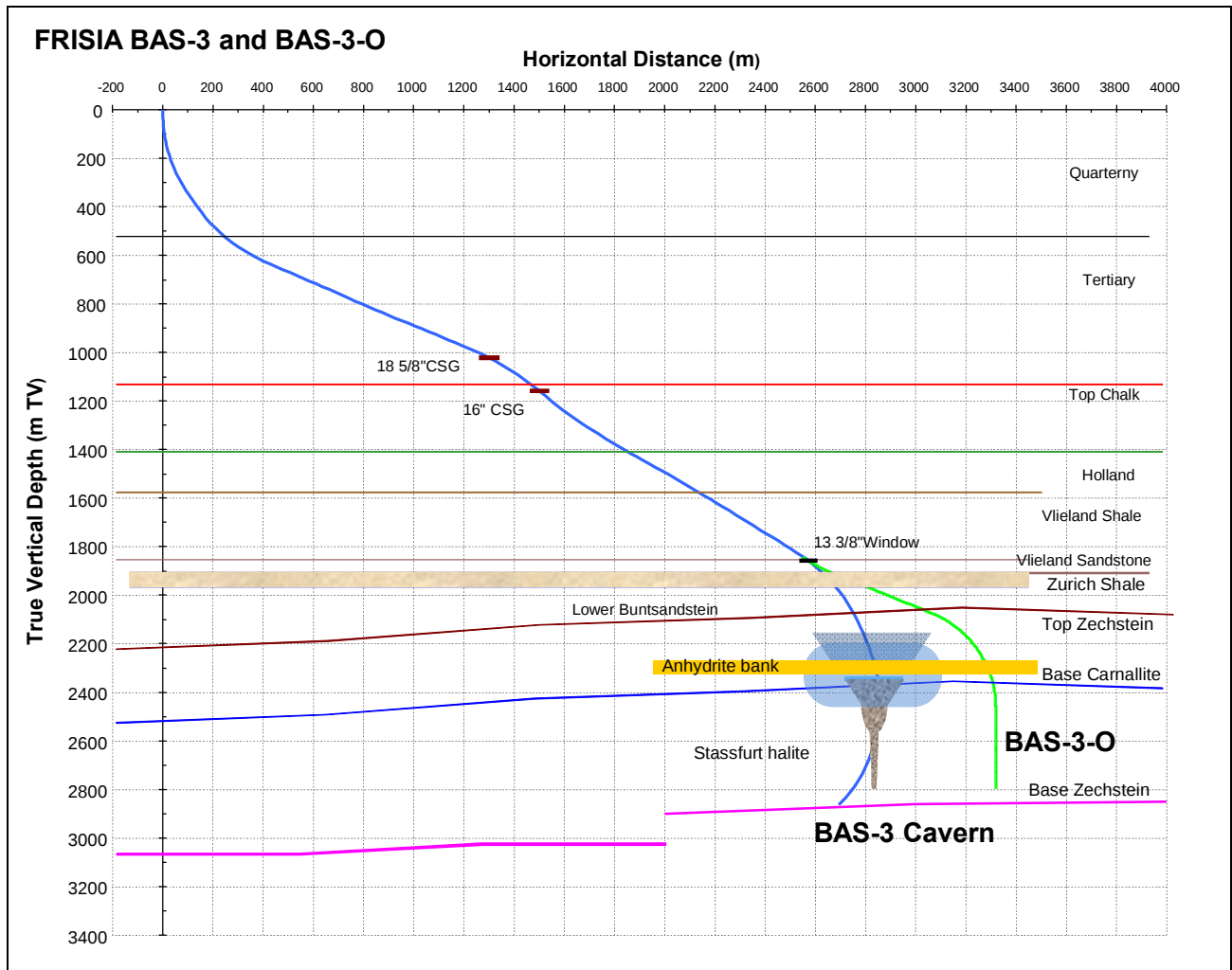
Permeatievolume per jaar (donkerblauwe curve) en bodemdaling (groene curve) in de loop van 5000 jaar berekend met een WEP model met gereduceerde lage lineaire kruip (factor 4) op basis van een BAS-1 HP bleed-off waarneming. Als porositeit van de hele permeatiekegel met tophoek 45° is 0,2% genomen. Na circa 2000 jaar treedt de eerste bodemdaling op.

Bijlage 17: Permeatie bij gecalibreerde lage lineaire kruip BAS-3



Permeatievolume per jaar (donkerblauwe curve) en bodemdaling (groene curve) in de loop van 100.000 jaar berekend met een laag-lineair kruipmodel met een op Lux gebaseerde calibratie (factor 20 reductie t.o.v. GeoDelft). Als porositeit van de hele permeatiekegel met tophoek 45° is 0,2% genomen. Na circa 10.000 jaar treedt de eerste bodemdaling op.

Bijlage 18: Dwarsdoorsnede ondergrond met caverne BAS-3 en boring BAS-3-Original



Dwarsdoorsnede met de in bijlage 9 (a) met betrekking tot caverne BAS-3 afgebeelde situatie in de ondergrond voor de modelvariant met een *open* verbinding tussen de caverne en de carnalliethoudende zoutlaag direct erboven. De grijsblauwe permeatiekegel geeft de verwachte situatie over 100 jaar in 2115 weer. De afgetakte nieuwe boorput en de in de Stassfurt haliet aan te leggen caverne BAS-3-Original vallen ruimschoots buiten de hydraulische invloedssfeer van de definitief afgesloten caverne BAS-3.

Bijlage 19: Hydrodynamische processen in de Bontzandsteen

In geval van ondiep gelegen cavernes (< 500 m TVD) is een schoorsteenvormig instortend cavernedak regelmatig waargenomen met opwaartse kruipsnelheden tot wel 15 -18 m per jaar. Onder Frisia condities met cavernes op grote diepte is dit een gesteentemechanisch irreëel scenario.

1 Doorgaande dakverbrokkeling bij Frisia niet aan de orde

Uit de laatste echometing in BAS-3 van december 2011 kwam een cavernediameter van maximaal 100 m naar voren. Als het steenzoutdak plugvormig zou instorten met een diameter van 100 m en de erop volgende aantasting van de carnalliethoudende zoutlaag zich zou beperken tot de breedte van het ingestorte dak treedt schoorsteenvorming op. Er ontstaat onder de anhydrietlaag een met carnallitische pekkel gevulde caverne met een constante diameter van 100 m. Deze situatie is getoond in figuur 1a.

Indien het anhydrietdak een overspanning van slechts 100 m heeft, is volgens de grafiek in bijlage 10 het anhydrietdak onder alle mogelijke drukdeficieten stabiel, zelfs als de hele boorput langdurig op atmosferische druk aan maaiveld zou staan en het drukdeficiet oploopt naar een maximaal mogelijke waarde van 22,5 MPa.

Het Leinezout zou uitsluitend schoorsteenvormig kunnen bezwijken indien de hele zoutkolom door insluitingen van weinig geconsolideerde klei sterk verzwakt zou zijn, een randvoorwaarde die bij Frisia *niet* voorkomt, gezien de zeer zuivere kwaliteit van het op grote diepte gelegen Leinezout.

2 Invloed bulking factor

In het zuiver hypothetische (irreële) geval dat schoorsteenvorming in de anhydrietlaag en het Leine zout zou optreden, hangt de maximale hoogte van het instortingslichaam af van de bulking factor van het verbrokkelende materiaal.

Voorbeeld:

Bij een conservatieve, lage bulking factor van 1,2 bedraagt de porositeit van het verbrokkelde materiaal ongeveer 17%. Om 475.000 m³ pekkel te bergen in het porievolume is een gebulkt volume van bijna 2,8 miljoen m³ nodig. Bij een gemiddelde straal van slechts 50 m leidt dit tot een schoorsteenhoogte van ongeveer 350 m. Met inbegrip van het restant halietaal, dat ook verbrokkelt, is in de Zechstein formatie een hoogte van ongeveer 300 m beschikbaar, waarin 405.000 m³ pekkel geborgen kan worden. Als de caverne vanwege een doorgaand proces van verbrokkeling uiteindelijk de top van de Zechstein formatie zou bereiken bevindt zich een restant van 70.000 m³ aan vrije carnallitische pekkel over een hoogte van circa 9 m boven in de schoorsteen. Dit stadium is getoond in figuur 1b. De instorting zal zich voortzetten tot aan de poreuze ZE-IV kleisteen op een diepte van 2103 m TVD.

De poriedruk in de puinschoorsteen van de Zechstein formatie is lithostatisch (0,0215 MPa/m). In de ZE-IV kleisteen is de poriedruk iets meer dan hydrostatisch (drukgradiënt 0,011 MPa/m). Zodra de pekkelbel in de buurt komt van de ZE-IV kleisteen en Onder-Bontzandsteen zal het restvolume aan carnallitische pekkel vanwege een drukverschil van circa 22 MPa over het dunne restant Leinezout door dit zout versneld gaan afvloeien naar de poriën van de poreuze gesteenten.

3 Modelling van afvloeiings- en verdringingsproces

De carnallitische pekkel vloeit af naar de poreuze klei- en zandsteen. Het daarbij verdrongen zoute poriewater verspreidt zich naar verderweg gelegen plaatsen in deze gesteenten. Hieronder volgt een oriënterende beschouwing, waarin ter vereenvoudiging van het hydrodynamische proces aangenomen is dat er in de poriën van de ZE-IV kleisteen en de Onder-Bontzandsteen geen pekkelvermenging optreedt, maar uitsluitend 100% verdringing.

3.1 Afvloeiingsproces uit Leinezout

Ter verkrijging van inzicht in het uitstromingsproces van de carnallitische pekkel wordt de uniaxiale laminaire stromingswet van Darcy toegepast op het voorbeeld in sectie 2:

$$\dot{V} = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{A}{\Delta l} \cdot \Delta P_{\max}$$

waarin: $\dot{V}$ = uitstromingsdebiet uit omhoogkruipende caverne [m³/s]

K = permeabiliteit van (verontreinigd) Leinezout [m²]

η = pekkelviscositeit [Pa.s]

A = oppervlak cavernekant [m²]

Δl = afstand tussen cavernekant en bovenkant Leinezout @2103 m TVD [m]

$\Delta P_{\max}$ = maximum overdruk van de cavernepekkel ten opzichte van het zoute water in de poriën van het bovenliggende klei- en zandsteenpakket [Pa].

De volgende parameterwaarden worden gebruikt: $K \approx 10^{-18}$ m² (= 1 μD, ref.10), $\eta = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Pa.s, $A = 7854$ m² (dakstraal 50 m) en $\Delta P_{\max} < 22,5$ MPa (= 2103.(0,0215-0,011)) en geven als relatie tussen debiet en afstand tot de poreuze gesteenten:

$$\dot{V} \approx 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta l^{-1} \text{ [m}^3\text{/s]} = 12,5 \cdot \Delta l^{-1} \text{ [m}^3\text{/dag]} = 4565 \cdot \Delta l^{-1} \text{ [m}^3\text{/jaar]}.$$

Voorbeeld:

Het volume aan vrije, gemigreerde carnallitische pekkel vlak onder de top van het Leinezout bedraagt 70.000 m³. Zelfs als de pekkel de poreuze klei- en zandsteen al tot op 10 m genaderd is, bedraagt de afvloeiing onder de gegeven omstandigheden slechts 456 m³ per jaar. De bulking factor van verbrokkelend Leinezout zorgt per hoogtemeter voor aanzienlijk meer reductie van vrije pekkel, namelijk circa 1300 m³.

Er dienen zich nu twee mogelijke ontwikkelingen aan:

- 1) het vrije restvolume aan onder hoge druk staande pekkel verdwijnt na een finale dakdoorbraak in korte tijd in de poreuze gesteenten, of
- 2) de feitelijke permeabiliteit in het restant Leinezout neemt onder druk zo snel toe (een factor 100 lijkt minstens nodig), dat er gespreid over maanden tot enkele jaren een meer geleidelijke uitstroming naar de poreuze klei- en zandsteen zal plaatsvinden.

3.2 Snelle afvloeiing carnallitische pekkel en verdringingsproces

De porositeit en permeabiliteit van de ZE-IV kleisteen zijn onbekend. De porositeit van de Onder-Bontzandsteen bedraagt 4-8% en de permeabiliteit 1-10 mD (refs.8, 9). Voor het gemak wordt in de volgende beschouwing alleen gesproken over ~~Onder-Bontzandsteen~~ ^{Onder} aanduiding van het 126 m dikke poreuze gesteentepakket, dat bestaat uit zowel de ZE-IV kleisteen als de Onder-Bontzandsteen.

Als de hoge-druk pekels plotseling in contact komt met de poreuze Bontzandsteen neemt de poriedruk daarin zo snel toe dat de Bontzandsteenmatrix over een breed front (diameter >100 m) uit elkaar gedrukt wordt en verbrekt. De Leine dakverbreking zal zich dus voortzetten in de Bontzandsteen. Dit is een gunstig proces, omdat na verloop van tijd al het vrije pekelsvolume gebonden wordt in het gebulke materiaal van de Bontzandsteen.

Voorbeeld:

Stel dat de bulking factor van de Bontzandsteen 1,2 bedraagt, dan is circa 412.000 m³ verbrekt gesteente nodig om 70.000 m³ vrije carnallitische pekels te binden. Als de instorting een gemiddelde diameter 100 m heeft blijft de hoogte van de uiteindelijke instorting in de Bontzandsteen beperkt tot 50 m.

Ontwikkeling spanningspatroon in Bontzandsteen

Nu volgt een verkennende beschouwing over het zich ontwikkelende spanningspatroon in de Bontzandsteen. Aannames zijn een lithostatische drukgradiënt van 0,22 bar/m, een hydrostatische gradiënt van 0,11 bar/m, een Poisson ratio van 0,25 en de afwezigheid van tectonische spanningsvelden. De verhouding tussen horizontale en verticale effectieve gesteentespanningen ($\bar{\sigma}_{h,eff}$ en $\bar{\sigma}_{v,eff}$) bedraagt $K=$. De beide effectieve horizontale drukgradiënten in het gesteente zijn gelijk (isotropie) en bedragen van de effectieve verticale gesteentedrukgradiënt, die 0,11 bar/m (0,22-0,11) bedraagt. De effectieve horizontale drukgradiënten zijn dus circa 0,04 bar/m. Onder deze spanningscondities treedt *hydraulische fracturing* op als de pekeldruk groter is dan $P_{hydrost} + 2 \cdot \bar{\sigma}_{h,eff}$ (gradiënt 0,19 bar/m). De treksterkte van de Bontzandsteen speelt in geval van een plotselinge, brede dakinstorting geen rol.

De druk die nodig is om een in het gesteente ontstane (verticale) scheur open te houden en uit te breiden is de *fracture propagation* druk. Deze druk is lager dan de fracturingdruk en gelijk aan $P_{hydrost} + \bar{\sigma}_{h,eff}$ (gradiënt 0,15 bar/m). De benodigde pekelloverdruk ΔP ten opzichte van $P_{hydrost}$ bedraagt voor scheurvoortplanting dus de helft van die voor scheurvorming. De carnallitische pekeldruk in de top van het Leinezout heeft een lithostatische drukgradiënt van 0,215 bar/m. Er zal dus in eerste instantie zeker breukvorming en breukdoorzetting plaatsvinden in de Bontzandsteen.

Voortgang drukfront expansiepekels

De in-situ samendrukbaarheid van pekels onder hoge druk bedraagt ongeveer $2,7 \cdot 10^{-4}$ /MPa (ref.11). Na contact met de Bontzandsteen verliest de vrije pekels snel 22 MPa aan druk. Dit geeft een elastische expansie van $5,94 \cdot 10^{-3}$. Het volume van 70.000 m³ zet 416 m³ uit. Als dit volume over een oppervlak van 7854 m² (dakstraal 50 m) in de Bontzandsteen wordt gedrukt, wordt met de wet van Darcy bij een gemiddelde permeabiliteit van 5 mD (ref.8) een indringdiepte van het drukfront berekend volgens:

$$\Delta l = 0,72 \sqrt{\dot{V}}, \text{ met } \dot{V} \text{ in [m}^3/\text{s]} \text{ en } \Delta l \text{ in [m]}.$$

De indringdiepte van het drukfront van de geëxpandeerde 416 m³ is lineair tijdsafhankelijk. Als het volume in een uur kan worden weggedrukt bedraagt de indringdiepte 6,2 m, bij een dag 149 m en bij een week 1046 m. De Bontzandsteen is 120 m dik en de bovenliggende Zurich schalie is impermeabel. Dat betekent dat het drukfront na iets meer dan een dag horizontaal zal afbuigen in de Bontzandsteen. Als porositeit van de Bontzandsteen wordt 5% aangenomen (ref.8). Zonder vermenging worden de poriën van circa 8300 m³ Bontzandsteen met carnallitische pekels gevuld. Bij een oppervlak van 7854 m² dringt de carnallitische pekels dus iets meer dan een meter door in de Bontzandsteen.

De Bontzandsteenmatrix (95% van het totale volume) is samendrukbaar met naar schatting $1,1 \cdot 10^{-4}$ /MPa (ref.12). Voor een Bontzandsteen met 5% watergevulde porositeit is de samengestelde (bulk) compressibiliteit circa $1,18 \cdot 10^{-4}$ /MPa. De gemiddelde verdringingsdruk van de geëxpandeerde pekkel bedraagt 11 MPa. Dit geeft een bulk samendrukking van de Bontzandsteen van $1,3 \cdot 10^{-3}$. Om 416 m^3 binnengedrongen pekkel te kunnen accommoderen is dus 320.000 m^3 Bontzandsteen nodig, zodat bij een indringingsoppervlak van 7854 m^2 het benodigde gesteentevolume ongeveer 41 m dik is. Hieruit kan men afleiden dat het drukfront van de binnendringende pekkel na ongeveer 7 uur (41/6) is weggeëbd.

Breukvorming en breukvoortplanting door expansiepekkel

Als de pekkeloverdruk van 22 MPa lineair afneemt over 41 m hoogte, dus een afname van circa 5,4 bar/m, kan men afleiden hoeveel meters Bontzandsteen ongeveer verbrokkelen. De fracturing gradiënt bedraagt 0,19 bar/m en de fracture-propagation gradiënt 0,15 bar/m. Op een diepte van 2103 m TVD heeft de carnallitische pekkel aanvankelijk een druk van 452 bar. Breukvorming kan plaatsvinden tot een diepte h_1 , waarop de pekkeloverdruk is afgenomen tot beneden de fracturing druk. De diepte h_1 wordt berekend uit $452 - (2103 - h_1) \cdot 5,4 = 0,19 \cdot h_1$. Hieruit volgt $h_1 = 2093 \text{ m}$, dus breukvorming kan plaatsvinden tot 10 m in de Bontzandsteen. Een reeds gevormde breuk kan zich vervolgens voortplanten tot een diepte van h_2 . De diepte h_2 volgt uit de vergelijking: $452 - (2103 - h_2) \cdot 5,4 = 0,15 \cdot h_2$, waaruit volgt $h_2 = 2077 \text{ m}$. De breuk kan zich voortzetten tot 26 m in de Bontzandsteen. Volgens de bovenstaande schatting van de indringingsnelheid van het drukfront kan dit proces van breukvorming en breukdoorzetting zich al binnen 7 uur na de plotselinge dakdoorbraak voordoen.

Snelle reductie vrije pekkel door voortzetting Bontzandsteenverbrokkeling

Als de breukvorming zich doorzet tot een hoogte van 26 m en de bulking factor van de verbrokkelende Bontzandsteen 1,2 bedraagt, ontstaat er een puinkolom van circa 31 m hoogte. Deze vult het restant schoorsteen in het Leinezout geheel op en de Bontzandsteen tot 22 m. Er resteert een vrije pekkelkolom met een hoogte van 4 m onder hydrostatische druk. Als de Bontzandsteen daarna nog 20 m inzakt wordt alle vrije carnallitische pekkel gebonden en is het migratieproces definitief ten einde. Deze situatie is getoond in figuur 1c.

3.3 Langzame afvloeiing carnallitische pekkel in Bontzandsteen

Als het afvloeiingsproces geleidelijk in de tijd verloopt zal de hydraulische fracturingdruk van de Bontzandsteen niet overschreden worden. Langzame afvloeiing van pekkel doet zich voor indien de zoutpermeabiliteit in de top van het Leinezout sterk verhoogd is zonder dat dit tot een onmiddellijke dakdoorbraak leidt. Door het hydraulische contact met de Bontzandsteen loopt de carnallitische pekeldruk in de loop der tijd wellicht terug naar een hydrostatische evenwichtswaarde. Het restant zoutdak kan nu op twee manieren reageren:

a) Doorbraak restant zoutdak op termijn

Als gevolg van de verlaagde pekeldruk zou het dunne restant zoutdak alsnog kunnen doorbreken vanwege een relatief grote overspanning zonder voldoende steundruk en vanwege een extra zijdelingse belasting door zoutkruip. Na de dakverbrokkeling gaat de Bontzandsteen waarschijnlijk ook bezwijken. Vanwege bulking van het verbrokkelde gesteente zal na verloop van tijd alle vrije pekkel gebonden raken in de poriën van de puinkolom, zoals dat ook het geval is bij een snelle dakdoorbraak in het Leine zout.

b) Restant zoutdak blijft intact

Als het restant zoutdak niet doorbreekt en de pekeldruk vrijwel lithostatisch blijft zal onder invloed van geringe zoutkruip de 9 m hoge caverne zeer langzaam dichtgedrukt worden. De zoutkruip en caverneconvergentie dV zullen hoofdzakelijk een *lineaire* drukafhankelijkheid vertonen:

$$\frac{dV}{V} \approx \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{n_2} \cdot \Delta P \right)^{n_2} \cdot A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{RT}}$$

met : dV = caveerneconvergentie per dag
 V = beginvolume 70.000 m³ carnallitische pekkel
 $n_2 = 1$
 ΔP = drukdeficiet ten opzichte van de originele lithostatische druk [MPa]
 $A_2 = 14,53$ [MPa^{-n₂}.dag⁻¹] (ref.1)
 $Q_2/R = 6201$ [K] (ref.1)
 $T = 273 + 10 + 0,033 \cdot D$ [K], met D = caverne diepte in [m].

Op een diepte van 2103 m heerst een temperatuur van 352 K, zodat:

$$A_2 \cdot e^{-\frac{Q_2}{RT}} = 14,53 \cdot e^{-17,62} = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ [MPa}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1} \text{]}.$$

Aannemende dat het maximale drukdeficiet $\Delta P_{\max}$ 1 à 2 MPa bedraagt, berekent men:
 $dV = 0,072$ à $0,143$ m³/dag, oftewel 26,2 à 52,3 m³/jaar. Het zal dus duizenden jaren duren voordat het restant caveerne geheel is leeggedrukt in de Bontzandsteen.

Alle carnallitische pekkel verspreidt zich in de Bontzandsteen onder verdringing van het reeds in de poriën aanwezige zoute water. De carnallitische pekkel heeft een groter soortelijk gewicht dan het zoute water en zal zich dus naar verwachting vooral in de onderste regionen van de Bontzandsteen verspreiden. Aldus wordt een bruto volume van 1.400.000 m³ (5% porositeit) aan Bontzandsteen op de lange duur gevuld met circa 70.000 m³ carnallitische pekkel. Als dit gebeurt in de vorm van een afgeknotte 45° kegel met een bodemstraal $r = 50$ m en een topstraal van $R = 50 + \Delta h$, reikt de verdringingskegel tot een maximale hoogte van $\Delta h = 64$ m ($1,4 \cdot 10^6 = \frac{4}{3} \pi \Delta h \cdot \{(50 + \Delta h)^2 + (50 + \Delta h) \cdot 50 + 50^2\}$). De Bontzandsteenlaag is 126 m dik, dus bereikt de carnallitische pekkel geheel niet de onderkant van de Zurich schalie.

Conclusie

Het uit de kegel verdrongen oorspronkelijk aanwezige zoute water zal zich op geologische tijdschaal verspreiden door de Bontzandsteen zonder noemenswaardige drukverhoging.

4 Bodemdaling door pekelaflvoeiing

Alleen het uit de Leine zoutlaag afvloeiende vrije pekkelrestant van 70.000 m³ kan vanwege drukverlies bodemdaling tot gevolg hebben, namelijk ongeveer 0,75 cm (standaard 10,5 cm per 10⁶ m³ volumeverlies). Het nog in de poriën aanwezige pekkelvolume van de opgevlude oorspronkelijke caveerne en de puinkolom van de schoorsteen blijft grotendeels gebonden achter, zelfs als er drukverlies in die pekkel optreedt door contact met de Bontzandsteen. De zoutkruip wordt namelijk sterk afgeremd door het in de weg zittende puin. In figuur 1c is het eindstadium van het verbrokkelingsproces getoond, waarbij de migrerende caveerne en de latere caverneschoorsteen geheel verstopt geraakt zijn met het verbrokkelde in carnallitische pekkel onoplosbare materiaal. De pekkel in de poriën van dit puinmateriaal is doodvolume geworden en heeft geen bodemdalingspotentieel meer.

5 Geen consequenties dakverbrotting voor integriteit boorput

Als de abandonnering van de boorput volgens de beste praktijk is uitgevoerd is de putsituatie ongeveer zoals getoond in figuur 2. Om de caveerne geheel met puin te vullen moet circa 400.000 m³ aan schoorsteenvolume met bulking factor 1,2 verbrokkelan. Dit vergt een

kolomhoogte van ongeveer 50 m. De instorting is dan over een hoogte van 35 à 40 m gevorderd in de carnallietlaag. De schoen van de inwendig met cement afgesloten 140 verbuizing bevindt zich circa 22 m onder de carnallietlaag (zie bijlage 8). De verbuizing kan dus over een maximale hoogte van circa 60 m komen vrijhangen in de pekels, voordat de schoen ondersteund wordt door de groeiende puinkolom. In figuur 1a is de beschreven situatie getoond.

De verbuizing is een zeer dikke en sterke casing (92 ppf N80), die naar verwachting niet zal breken of afscheuren, terwijl de caverne door dakverbrotting omhoog kruipt. Mocht de casing toch afbreken of anderszins beschadigd raken, dan ontstaat er langs die weg nog geen lekpad naar hogere gesteentelagen. De binnenkant van de boorput wordt met een voldoende lange cementkolom tot aan de top van de Zurich schalie afgeplugd.

Cementatie buitenkant boorput in de Zurich schalie

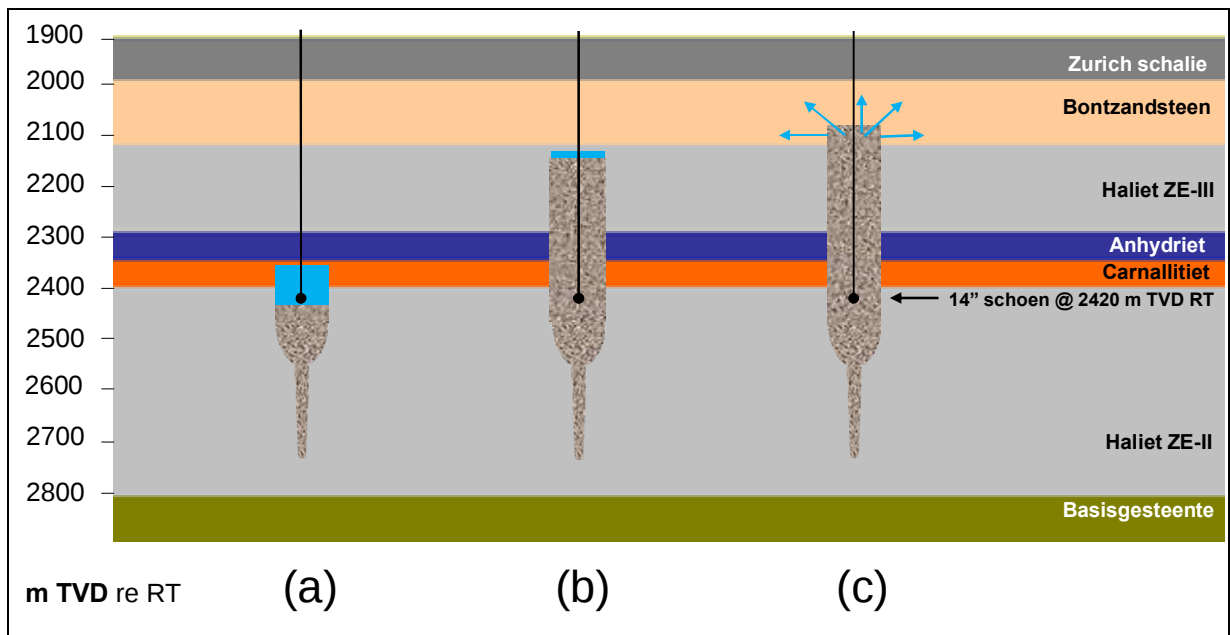
De gecementeerde buitenkant van de boorput in de Zurich schalie blijft over als kritiek element voor hydraulische integriteit. Tijdens de aanleg van boorput BAS-3 is de cementatie van de buitenste casing normaal verlopen, zodat er in principe weinig zorgen zijn over de afdichtende kwaliteit van de cementkolom tussen de casing en het doorboorde kleigesteente. Tijdens de cementatie kan men echter enige kanaalvorming in de cement nooit geheel uitsluiten, temeer niet omdat het boortraject in de Zurich schalie onder een helling van circa 45° loopt. In bijlage 18 is het verloop van boorput BAS-3 in een dwarsdoorsnede van de ondergrond op schaal afgebeeld. Er bestaat een uiterst geringe kans op de aanwezigheid van een lekpad door de cement.

Het lekpad kan alleen als zodanig functioneren indien er in de Bontzandsteen al voor de zoutwinning een natuurlijke hydrostatische overdruk heerste of indien er door pekelpermeatie uit de Zechstein in de toekomst een overdruk gaat heersen ten opzichte van de hydrostatische druk in de poreuze Vlieland zandsteen boven de Zurich schalie. Deze verhoogde drukverschillen zullen echter niet optreden in de Frisia praktijk, zelfs niet indien alle carnallitische pekels zich verspreiden in de Bontzandsteen onder verdringing van het reeds in de poriën aanwezige zoute water. De carnallitische pekels heeft een groter soortelijk gewicht dan het zoute water en zal zich dus naar verwachting vooral in de onderste regionen van de Bontzandsteen verspreiden. De Bontzandsteenlaag is 126 m dik en volgens een berekening in sectie 3 bereikt de carnallitische pekels bij lange na niet de onderkant van de Zurich schalie. Het uit de carnallitische permeatiekegel in de Bontzandsteen verdrongen zoute water zal zich verspreiden door de Bontzandsteen zonder een merkbare drukverhoging.

Conclusie

In de Frisia praktijk vormt de integriteit van de externe cementafdichting van de boorput ter hoogte van de Zurich schalie geen kritisch veiligheidsaspect vanwege de volgende lokale hydraulische condities:

- 1) er is geen natuurlijk hydrostatisch drukverschil aanwezig tussen de Onder-Bontzandsteen en de Vlieland zandsteen, en
- 2) aan de boven- en onderkant van de Zurich schalie bevindt zich een vergelijkbaar type pekelswater in de poriën van de gesteenten.

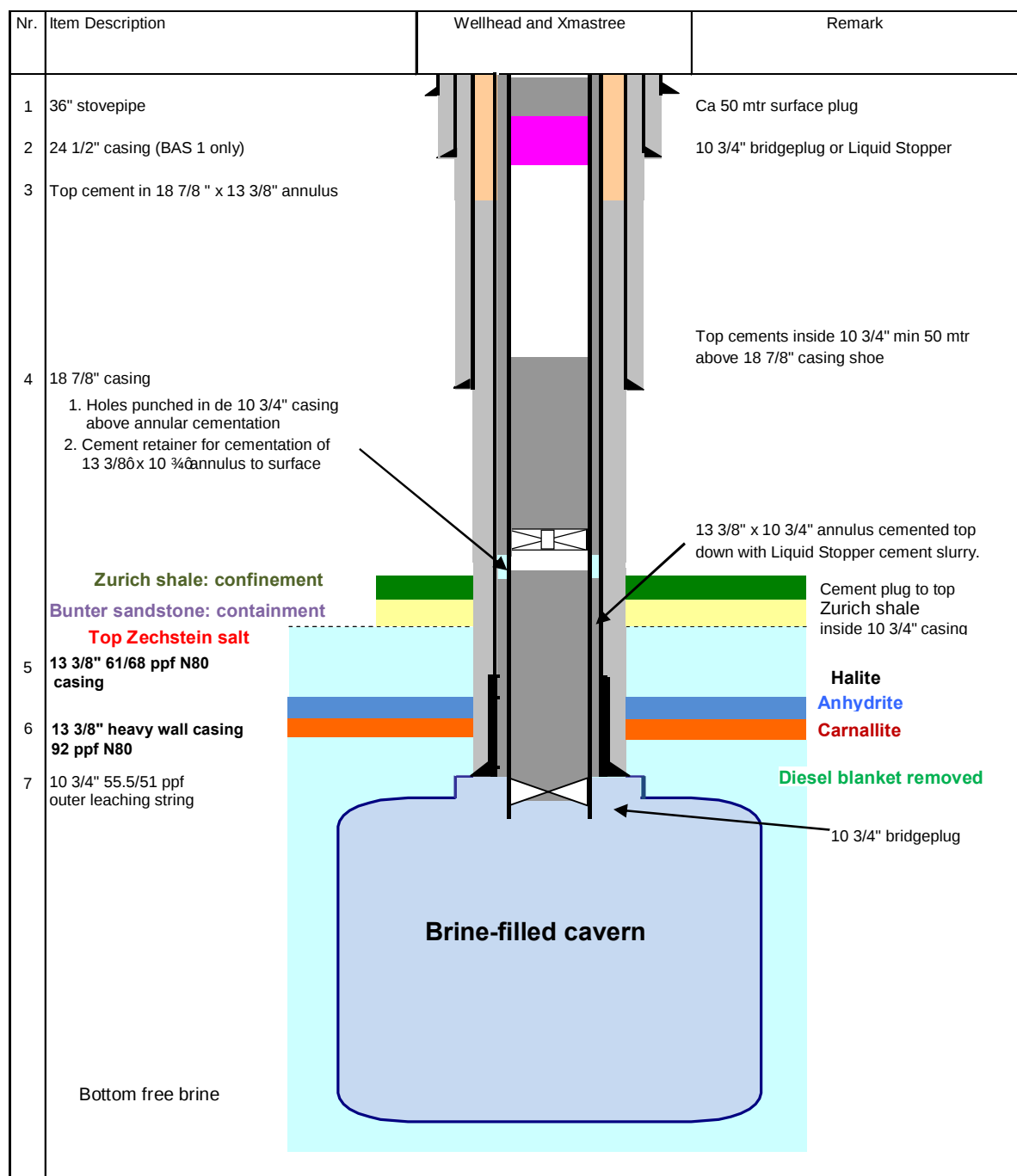


Figuur 1: Hypothetisch scenario: schoorsteenvormig verbrokkelend zoutdak

Stadium (a): 14" casing kan over een lengte van maximaal 60 m vrijhangen in de pekels van de door dakinstorting omhoog kruipende caverne.

Stadium (b): de omhoog kruipende caverne is genaderd tot vlak onder de Bontzandsteen. Vanwege het bulking effect is de kolomhoogte van de vrije carnallitische pekels gereduceerd tot circa 9 m.

Stadium (c): bij contact met de poreuze Bontzandsteen vloeit het overgebleven vrije pekervolume van circa 70.000 m³ weg in de poriën van de zandsteen. De bovenliggende Zurich schalie is zeer slecht doorlatend en houdt verdere verspreiding van de pekels tegen.



Figuur 2: Generieke schets van een definitief verlaten caverne en boorput met gedeeltelijke weergave van de stratigrafie.

In geval van de aanleg van BAS-3-Original vanuit boorput BAS-3 gebeurt dit door een aftakking (side track) tussen de top van de Zurich schalie en de 18" casing schoen. De bovengetoonde cementkolom in de 10 3/4" casing wordt in dat geval niet geplaatst.