

AkzoNobel USIT-metingen

Tomorrow's Answers Today

	367	372	381	469	472
Uitgevoerde USIT (positief resultaat)	368	372, 373, 374	-	469, 470, 471	-
Nog uit te voeren USIT	367	-	381, 382, 383	-	472, 473, 474

- Aandachtspunten:
 - Schlumberger en Halliburton vertellen nog wel eens wat je horen wil → onafhankelijke interpretatie gewenst (DEEP)
- Worden z.s.m. na ontwerp-besluiten EZ uitgevoerd

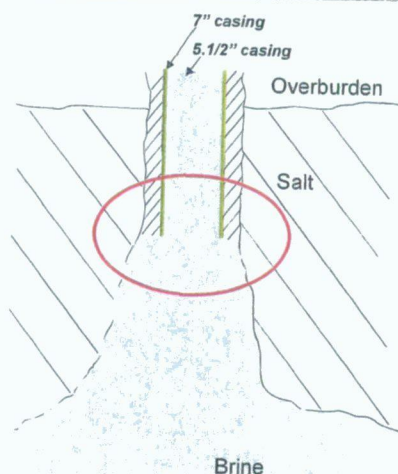


Industrial Chemicals | Salt | Mining Technology Department 49

AkzoNobel

Tomorrow's Answers Today

MIT Mechanical Integrity Test (1)



Industrial Chemicals | Salt | Mining Technology Department 49

Mechanical Integrity Test (2)

- Twee keer: zowel vóór als ná inbouwen 5½" tube
- Doel: aantonen integriteit verbinding van:
 1. zout-cement-casing (7")
 2. packer-tubing
- Testmedium is olie (LLI)
- Interface niveau monitoren
- Volumebepaling is cruciaal, want druk neemt af tijdens test (zie volgende sheet)
- Alle boorgaten worden onafhankelijk van elkaar getest
- MIT wordt uitgevoerd voordat inbouw boorgatcompletie plaatsvindt
- Door DEEP voorgestelde testdruk: 17 bar @ wellhead + olie-statische druk (38 bar) + druk pekelleiding (3-5 bar) = 58 - 60 bar @ LCCS
- Gewenste testdruk: 1,1 (?) x operating pressure → ca. 65 bar @LCCS
- **Uitdaging: caverne op druk krijgen en houden, want cavernebodem (Solling) is niet impermeabel**



Mechanical Integrity Test (3)

- Mogelijke hydraulische verbinding met Solling formatie
- Ervaringsgetal: Na afsluiten caverne wordt druk opgebouwd tot maximaal 4 à 5 bar aan pekelleiding
- Op basis van de nu bekende gegevens verwachten wij dat maximale op te bouwen caverne druk niet hoger is dan de (pekelleiding)hydrostatische druk + 4 à 5 bar → maximale druk in caverne = $0,12 \text{ bar/m} + 4 \text{ à } 5 \text{ bar} = 60 \text{ bar}$
- Dus: eerst per caverne kijken welke druk haalbaar is
- Daarna twee opties:
 1. Testvloeistof inbrengen, caverne op testdruk brengen en dan druk terug laten lopen (= eenvoudigst)
 2. Testvloeistof inbrengen, caverne op testdruk brengen en dan door continue pekelleiding op druk houden



AkzoNobel**MIT****Mechanical Integrity Test (4)**

- Voorstel:
 - op korte termijn MIT doen in een van de boorgaten van een van de opslagcavernes
 - kijken welke druk haalbaar is;
 - kijken hoe snel de drukafname is;
 - kijken hoeveel het olieniveau fluctueert als druk constant wordt gehouden (continue toevoer van pek);
 - kijken hoeveel olie er uitkomt i.r.t. hoe veel erin is gegaan;
 - voorstel uitwerken voor MIT-procedure overige boorgaten.



6

Vragen?

298

Van: @akzonobel.com>
Verzonden: donderdag 21 maart 2013 13:47
Aan: |
CC: |

Onderwerp: Verslag overleg AkzoNobel - SodM Opslagplan gasolieopslag De Marssteden Twente d.d. 15 maart 2013
Bijlagen: 20130315_MeetingReport_Opslagplan_gasolieopslag_met_Bijlage.pdf

LS,

Hierbij het verslag van het overleg tussen SodM en AkzoNobel over het in januari 2013 ingediende Opslagplan Gasolieopslag De Marssteden, Twente, zoals dat op 15 maart 2013 heeft plaatsgevonden.

AkzoNobel zet zich ervoor in om de door SodM gestelde vragen uiterlijk 29 maart 2013 naar tevredenheid van SodM te hebben beantwoord.

Met vriendelijke groet,

Mining Technology Department (MTD), sBU Salt

T +31
F +31
M +31
E [@akzonobel.com](mailto: @akzonobel.com)

Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.
Boortorenweg 27
7554 RS Hengelo (OV)
P.O. Box 25
7550 GC Hengelo (OV)
The Netherlands

www.akzonobel.com

Follow AkzoNobel online at www.akzonobel.com/followus

The information contained in this message, including any attachments, may be privileged and confidential and is intended only for the use of the individual and/or entity identified in the address of this message. If you are not an intended recipient, please notify the sender and delete and destroy this message, including any back-up copies. Please refer to www.akzonobel.com/legal-entities for further legal information regarding the sending entity if from the EU, Croatia, Norway, Turkey, Ukraine or Switzerland.



Department Mining Technology Department
Author
Subject Bespreking Opslagplan Gasolieopslag De Marssteden Twente
Date 15 maart 2013
To
Copied to
Present

Doel van het overleg

AkzoNobel heeft op 16 januari 2013 het Opslagplan Gasolieopslag "Twente-Rijn De Marssteden" ingediend bij EZ. EZ heeft Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) om advies gevraagd.

Doel van dit overleg is om het Opslagplan aan de adviseurs van SodM toe te lichten en om eventuele vragen van de kant van SodM te verzamelen en waar mogelijk direct te beantwoorden. Acties voor AkzoNobel die uit dit overleg zijn voortgekomen zijn in dit verslag geel gearceerd.

Presentatie

In de vorm van een uitgebreide presentatie zijn de adviseurs van SodM door het project gepraat met de focus op de meest risicovolle aspecten. Een pdf van de presentatie is als bijlage bijgevoegd.

Op de volgende drie onderwerpen is nadrukkelijk ingegaan:

1. de vrije uitstroom uit de caverne van 200 m³ in het geval van integriteitsverlies van de boorgatafsluiter (door een catastrofale gebeurtenis of door langzame ontwikkeling);
2. de mogelijke aanwezigheid van dakpockets waardoor de terugneembaarheid van alle opgeslagen olie na afloop van de opslag mogelijk in het geding is;
3. de veiligheid van het totale opslagsysteem en risico van lekkage vanuit dit opslagsysteem.

Voor het 2^e en 3^e punt zijn zogenaamde Bowtie-analyses bij het ingediende Opslagplan gevoegd. Voor het eerste punt, dat een wijziging van de uitgangspunten van de opslag betreft, is een separate Bowtie ontwikkeld die aan SodM gepresenteerd is. Deze Bowtie wordt, samen met een uitgebreide toelichting, aan alle betrokken vergunningverlenende instanties verstrekt.

Vragenronde

Na de presentatie was er de gelegenheid om nog niet geadresseerde aspecten in te brengen, maar vrijwel alle vragen van SodM waren al i.r.t. de gepresenteerde onderwerpen aan de orde gekomen.

Aandachtsgebieden

Tijdens de presentatie en het daarna volgende vragenrondje zijn drie onderwerpen naar voren gekomen, waarop nadere toelichting en informatie van de kant van AkzoNobel gewenst is:

1. de afsluiting van de pekeltoevoer om vrije uitstroom tijdens laad-/losactiviteiten te beperken;
2. de (on)zekerheid m.b.t. het uitlogen van met olievezadigd zout, en daarmee de kans van slagen van het terughalen van olie die in weg te logen pockets in het dak vast zit;
3. de dakstabiliteit in de rapporten van IfG en WEP.

Hierna worden deze drie punten nader toegelicht.

1. Afsluiting pekeltoevoer om vrije uitstroom tijdens laad-/losactiviteiten te beperken

2. Aantonen uitloogmogelijkheid van met olievezadigd zout



3. Eisen aan de dakstabiliteit

Barrières en maatregelen tegen vrije uitstroom

Overige punten

Daarnaast had SodM een paar kleine tekstuele punten of punten waarop nog wat extra informatie nodig was:

- in het deel 'Bodembeweging' kan nog worden opgenomen dat het meten van microseismicity een mogelijkheid is om bijvoorbeeld het instorten van cavernedaken te monitoren;
- in het deel 'Bodembeweging' dient te worden opgenomen dat er in het verleden één sinkhole ontstaan is;
- in D5 en D8 dienen vage termen als 'aanzienlijke tijd' en 'maatschappelijk relevante periode' nader gespecificeerd te worden;
- in de tabel 'hoeveelheid stoffen op te slaan' dient een tabelletje te worden geplaatst van de verwachting van hoeveelheden die er jaarlijks in en uit de caveerne gaan. Dit kan gebaseerd worden op het Vervoersplan.

AkzoNobel zal deze zaken middels een Addendum aanvullen.

Van: <@akzonobel.com>
Verzonden: woensdag 27 maart 2013 16:54
Aan:
CC:
Onderwerp: Uitloggen van met olie verzadigd zout
Bijlagen: Reda_Russo_Experimental-studies-of-oil-withdrawal-from-salt-cavities-by-freshwater-injection.pdf

Beste en

Een van de vragen die jullie in ons overleg op 15 maart hebben neergelegd betrof de mogelijkheid om zout, dat verzadigd is van olie door indringing gedurende 30 jaar, nog uit te logen. Dit aspect is op twee punten van belang, namelijk enerzijds m.b.t. het terugkrijgen van de ingedrongen olie na beëindiging van de opslag, en anderzijds m.b.t. de haalbaarheid van het vlakloggen van het dak van cavernes ná opslag, indien daar olie is achtergebleven. Ook de gelijkmatigheid van uitloging van het met olie verzadigde zout is een vraag daarbij.

Artikel

Daaruit kunnen m.b.t. het uitloggen van cavernes die voor olieopslag gebruikt zijn, de volgende belangrijke conclusies getrokken worden voor onze olieopslag:

- de experimenten zijn heel vergelijkbaar met de situatie in onze cavernes, zoals de temperatuur van 23 graden Celsius;
- de druk van 138 bar is natuurlijk veel hoger dan bij ons (55-60 bar), dus de permeatie van 6-7 mm in 2 dagen zal in ons geval minder zijn;
- de olieaanhechting aan de wand en de oliepenetratie in de wand beschermt het caverneoppervlak niet tegen oplossing van zout als de olie-pekelspiegel (onder toevoeging van zoet water) wordt opgetrokken. De zoutwand begint direct weer uit te logen als er zoet water wordt toegediend.

Ervaringen

Er zijn vele ervaringen met het uitloggen van zout, dat gedurende langere tijd in contact is geweest met olie en waarin olie diep heeft kunnen permeëren, bevestigen:

- in olieopslagcavernes die worden uitgedrukt met pekelspiegel is het 'bloeden' van de cavernewand een bekend fenomeen, waarbij er na teruglevering van de olie nog olie nageleverd wordt die uit de wand afkomstig is. Dit gebeurt dus zelfs als er niet geloofd wordt met zoet water. Deze mitigerende maatregel is in onze Bowtie voor cavern abandonment opgenomen;
- in olieopslagcavernes die worden uitgedrukt met zoet water begint het uitloggen direct als de wand in contact komt met het zoete water. De plek van logen is daarbij sterk afhankelijk van de diepte van de afhangings van de buizen. Daarom wordt deze ook aangepast in het geval dat in onze cavernes, na afloop van de opslag, nog geloofd moet worden om het dak vlak te krijgen en de laatste olie uit de dakpockets terug te krijgen;
- Duitse olieopslagcavernes kunnen maar een gering aantal keren met water uitgedrukt worden voor deze dermate groot gegroeid zijn dat ze buiten de gesteentemechanische omhullende komen. Dit groeien is uiteraard het gevolg van het uitloggen dat er gebeurt bij uitdrukking met zoet water;
- laboratoriumtesten met gekleurde pekelspiegel laten zien dat pekelspiegel in het zout infiltreert;
- in de Hengelose cavernes wordt bij normale pekelspiegelproductie gewerkt met een oliespiegel met een dikte van één à twee centimeter. Deze beschermt het dak tegen ongecontroleerde uitloging: zodra ergens een gat ontstaat (bijvoorbeeld door de ongelijkmatige samenstelling ervan), stroomt hier wat extra olie in wat dit beschermt tegen uitloging waarna eerst andere delen van het dak geloofd kunnen worden om zo een vlak dak te houden. Het nauwkeurig meten van de olie-pekelspiegel is daarbij belangrijk. Ook daarbij geldt dus dat zout langere tijd in contact staat met gasolie maar na optrekken van de oliespiegel (bijvoorbeeld bij de overgang naar een andere uitlooffase) nog probleemloos geloofd kan worden. Tijdens het eventueel aanvullend uitloggen van dakpockets in onze opslagcavernes, na afloop van de opslag, wordt de olie-pekelspiegel dan ook eveneens nauwkeurig gemonitord;

- in de cavernes in Noord-Nederland wordt het oliedak zelfs nog veel langer op dezelfde diepte gehouden alvorens het wordt opgetrokken voor verdere gecontroleerde uitloging of voor het uitlogen van een mooie 'neck' rondom het boorgat. Ook daarbij is nooit waargenomen dat logen niet meer mogelijk was doordat het zout door ingedrongen olie beschermd zou worden.

Met vriendelijke groet,

Projectmanager Olieopslag Twente

Geologist / Project manager
Mining Technology Department (MTD), sBU Salt

T +31

F +31

M +31 6

E [@akzonobel.com](mailto:)

Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.

Boortorenweg 27
7554 RS Hengelo (OV)
P.O. Box 25
7550 GC Hengelo (OV)
The Netherlands

www.akzonobel.com

Follow AkzoNobel online at www.akzonobel.com/followus

The information contained in this message, including any attachments, may be privileged and confidential and is intended only for the use of the individual and/or entity identified in the address of this message. If you are not an intended recipient, please notify the sender and delete and destroy this message, including any back-up copies. Please refer to www.akzonobel.com/legal-entities for further legal information regarding the sending entity if from the EU, Croatia, Norway, Turkey, Ukraine or Switzerland.

Van: @akzonobel.com>
Verzonden: donderdag 28 maart 2013 15:54
Aan:

CC:

Onderwerp: Beantwoording vraag m.b.t. dakstabiliteit Gasolieopslag De Marssteden, Twente
Bijlagen: 20130328_beantwoording_vraag_dakstabiliteit_def.pdf; Clovis Dak stabiliteit Memo v.1 def.pdf

Opvolgingsmarkering: Opvolgen
Markeringsstatus: Voltooid

Beste en

Gelieve hierbij aan te treffen onze beantwoording van de vraag m.b.t. de inconsistentie van de gehanteerde methoden in de verschillende rapporten over de dakstabiliteit van de beoogde opslagcavernes voor gasolie in De Marssteden in Twente.

Onze beantwoording bestaat uit:

- Brief 20130328_beantwoording_vraag_dakstabiliteit_def.pdf, betreffende de beantwoording van de vraag;
- Bijlage bij deze brief, zijnde een notitie van Notitie Memo Clovis
project – Dakstabiliteit van vijf kandidaat-opslagcavernes – v.1

Ik hoop dat deze vraag hiermee afdoende beantwoord is.

Met vriendelijke groet,

Projectmanager Olieopslag Twente

Geologist / Project manager
Mining Technology Department (MTD), sBU Salt

T +31 74
F +31 74
M +31 6
E [@akzonobel.com](mailto:>@akzonobel.com)

Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.
Boortorenweg 27
7554 RS Hengelo (OV)
P.O. Box 25
7550 GC Hengelo (OV)
The Netherlands

www.akzonobel.com

Follow AkzoNobel online at www.akzonobel.com/followus

The information contained in this message, including any attachments, may be privileged and confidential and is intended only for the use of the individual and/or entity identified in the address of this message. If you are not an intended recipient, please notify the sender and delete and destroy this message, including any back-up copies. Please refer to www.akzonobel.com/legal-entities for further legal information regarding the sending entity if from the EU, Croatia, Norway, Turkey, Ukraine or Switzerland.

Staatstoezicht op de Mijnen
T.a.v.
Postbus 24037
2490 AA 's-Gravenhage

28 maart 2013

**Beantwoording vraag m.b.t. dakstabiliteit inzake Opslagplan Gasolieopslag Twente-
Rijn De Marssteden, Twente**

Geachte heren en dame,

Op 15 maart 2013 hebben [] en [] u nader toelichting gegeven inzake het door AkzoNobel op 16 januari 2013 bij EZ ingediende Opslagplan Gasolieopslag Twente-Rijn De Marssteden, Twente. Daarbij is onder andere gesproken over de dakstabiliteit van de beoogde opslagcavernes, zoals ook benoemd in het besprekingsverslag:

"SodM constateert dat er in de notitie van WEP ([]) "gegoocheld" wordt met de eisen aan de dakstabiliteit, door het extra meenemen van Zout C als dragende daklaag. Dit betreft met name de stabiliteit van caverne 367 (die na vlaklogen van het dak op de grens van de door IfG toegestane dakverhouding van 0,37 zit) en de vijfde caverne (381) die met een verhouding van 0,32 onder de door IfG toegestane dakverhouding zit.

AkzoNobel zal de verschillende methoden voor de berekening van de dakstabiliteit nader toelichten en aantonen dat de dakstabiliteit van alle cavernes aan de gestelde criteria voldoet, zowel volgens de door IfG gehanteerde methode, als volgens de alternatieve methode zoals door WEP gehanteerd voor caverne 381. Daarnaast zal AkzoNobel nagaan welke waarde voor het stabiliteitscriterium binnen de Good Salt Mining Practice wordt aangehouden (indien die waarde daarin wordt meegenomen)."

Bijgevoegd ontvangt u een notitie van WEP waarin beide methoden voor de berekening van de dakstabiliteit worden toegelicht en waarin wordt aangetoond dat de beoogde opslagcavernes aan beide methoden voldoen.

In de "Good Salt Mining Practice" (GSMP) is het door IfG en WEP gehanteerde stabiliteitscriterium niet als zodanig opgenomen. In de GSMP, die overigens geldt voor een ander type caverne (type "Single Completion Cavern") dan die waartoe de olieopslagcavernes behoren (type "Multiple Completion Cavern"), staat over de hoogte van een caverne het volgende:

"De maximaal toelaatbare hoogte van een holruimte wordt zodanig gekozen dat deze inherent veilig is. Dit betekent dat, wanneer het dak van een caverne ondanks alle voorzorgen toch instabiel wordt en bezwijkt (migratie van de caverne), er op termijn alleen beperkte komvormige bodemdaling aan het maaiveld optreedt en de ontwikkeling van een sinkhole uitgesloten is. Bij de berekening van de inherent veilige hoogte van een caverne spelen de diepte van de Basis Tertiair (grens geconsolideerde – ongeconsolideerde formaties), de diepte van de zoutformatie (de diepte van het dak van een caverne) en de bulk factor (verhouding los gestort/vast gesteente) een rol. Dit betekent dat de toelaatbare hoogte van een caverne kan variëren met de positie van de caverne in het boorterrein. Voor de effectieve bulk factor wordt een waarde van 1.11 gehanteerd. De berekening van de inherent veilige hoogte is in bijlage 1 weergegeven."

In de berekening van de inherent veilige hoogte in de betreffende bijlage bij de GSMP is verwerkt dat de minimale restdikte van het zoutdak 5 meter moet bedragen¹. Dit stabiliteitscriterium is gebaseerd op gesteentemechanische studies (BGR, 1998) waaruit blijkt dat een restdikte van het zoutdak van 5 meter ruim voldoende is voor blijvende dakstabiliteit in het geval van een schijfvormige caverne met een doorsnede van 120 meter.

Ik vertrouw er op u met deze informatie gediend te hebben.

Hoogachtend,

Projectmanager Olieopslag Twente

Bijlage:

- Notitie Memo Clovis project - Dakstabiliteit van vijf kandidaat-opslagcavernes - v. 1, , 25 maart 2013.

¹ De inherent veilige hoogte van een caverne wordt berekend door:

$$T_{CAV} = \{B_{CAV} + (B_F - 1) * (B_T + 40)\} / B_F \text{ of } T_{CAV} = \{B_{CAV} + 0,11 * (B_T + 40)\} / 1,11$$

waarbij voldaan moet worden aan: $T_{CAV} \geq T_{ZC} + 5$

Wanneer hieraan niet voldaan wordt dan is $T_{ZC} + 5$ maatgevend voor de bepaling van de toelaatbare diepte van het dak van een caverne en dus de hoogte van de caverne.

Van: @akzonobel.com>
Verzonden: dinsdag 2 april 2013 12:44
Aan:
CC:

Onderwerp: RE: Uitlogen van met olie verzadigd zout
Bijlagen: SMRI_apr2008.pdf; SMRI_fall1994.pdf; SMRI_fall1994_2.pdf; SMRI_sept1979.pdf

Beste en

Aanvullend aan mijn e-mail van vorige week woensdag stuur ik jullie nog een viertal artikelen welke ik vond in het archief van de Solution Mining Research Institute (SMRI) over het uitlogen van met olie verzadigd zout:

1. SMRI_sept1979: Artikel van de SMRI zelf uit 1979 over de verandering van de vorm van een opslagcaverne door de verdringing van het opgeslagen product middels o.a. onderverzadigde pek. Bij verdringing middels water loopt de volumetoename van de caverne op tot 16%. Een van de conclusies van dit artikel is dat tijdens verdringing het uitloogmechanisme vergelijkbaar is met reguliere uitloging met een omhoog bewegend olie-blanket;
2. SMRI_Fall1994: Artikel van Wintershall en DBI GUT over het uitloogproces in olieopslagcavernes, noodzakelijk om het afgenomen volume (door convergentie) weer te vergroten. De conclusies hiervan zijn dat dit werkt, dat het middels simulaties te simuleren is, dat het te sturen is door het controleren van het olie blanket en de diepte van de verbuizing en dat het technisch en economisch betaalbaar is. De uitloogperiode bedraagt enkele maanden.
3. SMRI_Fall1994_2: Artikel van o.a. KBB over de ombouw van enkele olieopslagcavernes in Edzel naar gasopslagcavernes. Een van de stappen daarin is de vergroting van het volume, wat in twee stappen gebeurt: eerst verdringing van de oorspronkelijk aanwezige ruwe olie met zeewater, gevolgd door aanvullende uitloging om het gewenste volume per caverne te behalen.
4. SMRI_apr2008: artikel uit Polen over het modelleren met WinUmbro van de verandering van de grootte en de vorm van cavernes tijdens het uitdrukken van olieopslagcavernes middels water, onverzadigde en verzadigde pek.

Uit al deze artikelen blijkt dat uitlogen van voormalige olieopslagcavernes geen enkel probleem is. Aanvullend hieraan kan gesteld worden dat dit een uitgangspunt is wil ombouw van olieopslagcavernes naar gasopslagcavernes () überhaupt kunnen, aangezien verontreiniging van het gas met olie buitengewoon ongewenst is.

Graag verneem ik van jullie hoe jullie, nadat jullie kennis hebben kunnen nemen van de verschillende artikelen over dit onderwerp, aankijken tegen deze door jullie opgeworpen vraag.

Graag hoor ik van jullie.

Met vriendelijke groet,

From:
Sent: woensdag 27 maart 2013 16:54
To:

Cc:

Subject: Uitlogen van met olie verzadigd zout

este en

SOLUTION MINING RESEARCH INSTITUTE

105 Apple Valley Circle
Clarks Summit, PA 18411, USA

Telephone: +1

Fax: +1

www.solutionmining.org

Technical
Conference
Paper



**Designing of the storage cavern for liquid products,
anticipating its size and shape changes
during withdrawal operations
with use of unsaturated brine**

Andrzej Kunstman, Kazimierz Urbańczyk

CHEMKOP Krakow Poland

**SMRI Spring 2008 Technical Conference
28-29 April 2008
Porto, Portugal**

DESIGNING OF THE STORAGE CAVERN FOR LIQUID PRODUCTS, ANTICIPATING ITS SIZE AND SHAPE CHANGES DURING WITHDRAWAL OPERATIONS WITH USE OF UNSATURATED BRINE

Andrzej Kunstman and Kazimierz Urbańczyk,

CHEMKOP, Krakow, Poland

Abstract

Storage caverns for liquid fuels built in the salt deposits, need during emptying them of the stored product, simultaneous injection of so called maneuvering brine. Brine is replacing the stored product and afterwards is staying in the cavern until the next filling, when it is being removed outside, under the pressure of the injected product. Maneuvering brine can be stored on the surface in open buffer ponds, but of the limited capacity. If the operator of the magazine is co-operating with the leaching plant, he can use also the brine produced in leaching caverns as maneuvering brine. But in this case also, there are quantitative and qualitative limitations connected with the leaching plant production capacity.

Thus, very often the operator of the magazine has the problem with the necessary amount of the maneuvering saturated brine to withdraw the product from the storage caverns. In such cases, he is forced to use the unsaturated brine or even the fresh water. It causes the further dissolution of the cavern walls and, as the cavern size is limited by the geomechanical stability criteria, the number of such withdrawal operations is limited.

Simulation of this effect is difficult and labor-consuming using normal leaching simulation software, because of continuously variable level of stored product-brine interface. Authors created the new version of leaching simulation software, basing on their own **WinUbro** model, allowing to predict changes of the cavern shape during such storage operations.

With this new software, it is possible to determine how many filling and withdrawal cycles will be possible for the cavern of given starting shape and fixed maximum diameter, depending on the concentration of maneuvering brine and on filling-withdrawal schedule.

Using such a modeling during the designing phase of the storage project, it is possible to choose the optimum starting cavern shape in a way to allow the maximum number of withdrawal operations with the use of unsaturated brine. It is also possible to adapt the proper schedule of the storage cavern operation in order to avoid the development of wider flat roof areas, which are unfavorable from geomechanical point of view.

Key words: Caverns for Liquid Storage, Computer Modeling, Cavern Operation, Cavern Design, Cavern Development, Cavern Dissolution Modeling.

General remarks

Stored liquid substances are mainly:

- crude oil,
- liquid hydrocarbons: petrol, fuel oil, diesel oil,
- gas hydrocarbons in liquid or overcritical condition: LNG (Liquid Natural Gas), LPG (Liquid Petroleum Gas), ethane, propane, butane, ethylene, propylene etc

Liquid substances are being stored with the contact and use of the brine.

Density of hydrocarbons is smaller than density of brine located in the cavern, so stored liquid is occupying the upper part of the cavern, and brine the lower.

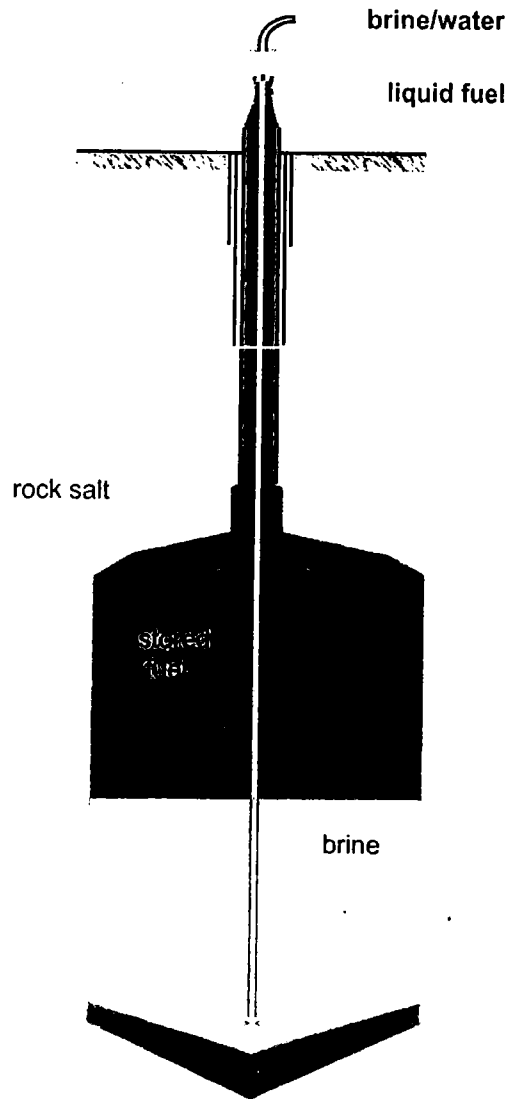


Fig.1 Scheme of the storage cavern for liquid hydrocarbons

The typical, repeating cycle of the underground storage process of liquid hydrocarbons is composed of a few stages:

- filling-in the cavern,
- keeping the stored substances,
- emptying-out the cavern.

The repetition speed of the above storage process cycles is depending on the role, which the storage have to fulfill:

Buffer storage magazines are taking and keeping stored products and afterwards returning them, according to the market demand in repeating cycles, e.g. seasonal cycles; so, they have to fulfill technical specifications making possible the frequent filling and emptying; e.g. typical caverns for LPG are buffer magazines,

Reserve storage magazines are serving for creating provisions - e.g. strategic reserves of crude oil and fuels - and are storing products for longer periods; they have usually big volumes and they aren't adapted to frequent cyclic filling and emptying – e.g. crude oil storage caverns of American SPR, German EBV or French CPSSP.

Usually in each storage cavern for the liquid hydrocarbons, one free-hanging tubing is located inside the borehole and its shoe is located on the depth just below the designed maximum product storage level.

Filling-in of the cavern is going by pumping the stored liquid product through borehole annulus (between casing and tubing) under the cavern roof, and the brine is flowing out from the cavern bottom through the tubing and well-head into the buffer brine pond, as a result of pumped product pressure.

Emptying-out of the cavern is going by pumping the brine through tubing into the cavern bottom, and the stored liquid is flowing out from the upper cavern part, through annulus and the well-head into the product pipeline as a result of pumped brine pressure.

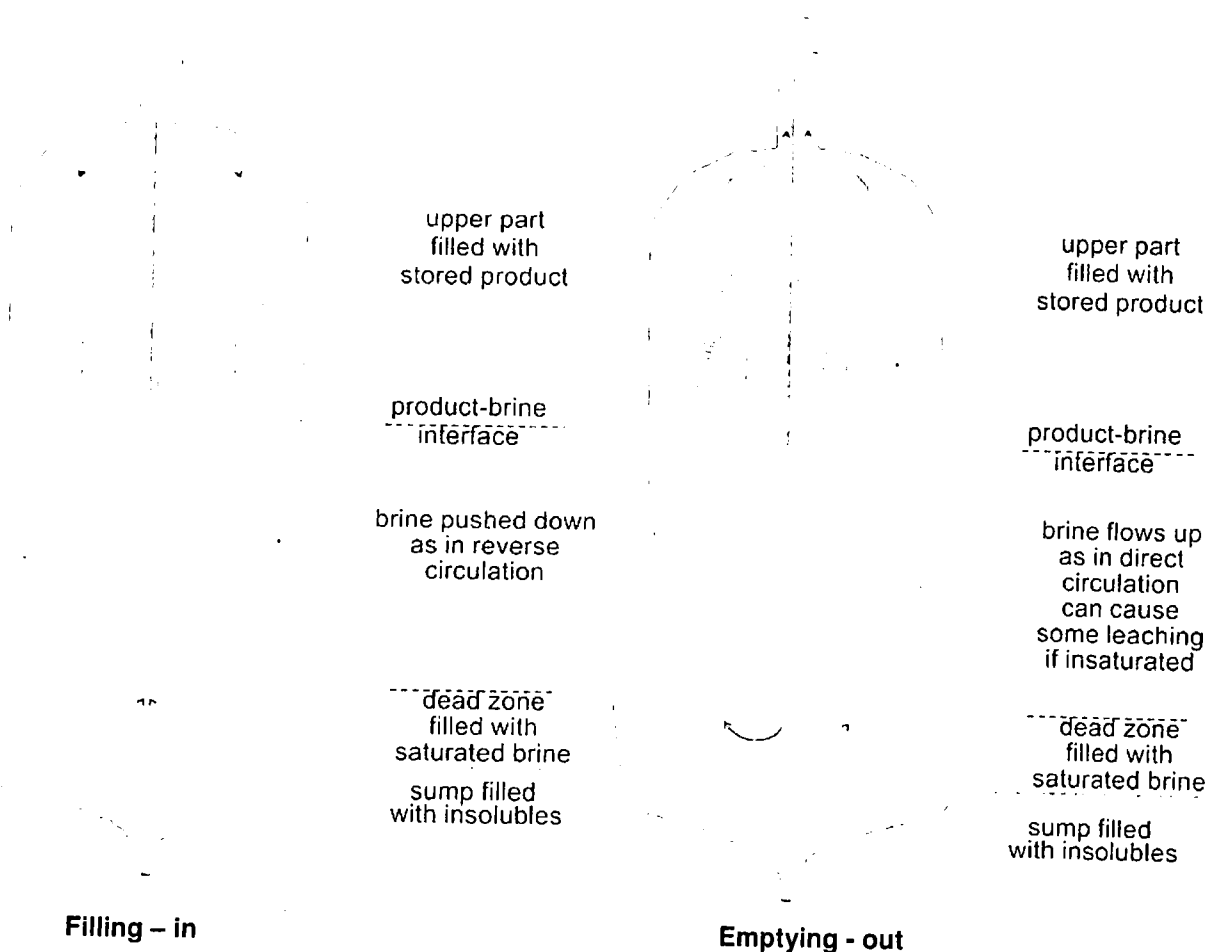


Fig 2. Storage operations – ways of brine flow and mixing inside the cavern

Additional leaching during storage operations

As mentioned above, during product withdrawal process, the simultaneous injection of so called maneuvering brine is replacing the stored product in the lower part of the storage cavern. This maneuvering brine **is mixing with the brine** already occupying the volume between the tubing shoe and actual product level in the cavern. Afterwards this brine is staying in the cavern until the next filling operation, when it is being removed outside, under the pressure of the new charge of injected product. During this staying period, the freshly mixed brine, if it is not fully saturated, **is tending to saturate itself by leaching the cavern walls** around the mixing zone – i.e between the tubing shoe and the actual product level.

The additional leaching of the cavern walls during the storage operations is a serious problem for the cavern operator. Each storage cavern has its own designed maximum size and shape. Keeping up within these limitations is necessary to ensure the tightness and long-term geomechanical stability of the cavern, which is absolutely essential for the storage process. So, **all additional leaching inside**

the cavern should be foreseen in the storage cavern designing and during the storage cavern exploitation - carefully observed and controlled.

The progress of such an additional leaching is strongly dependent on the quality of the maneuvering brine – on its concentration. Maneuvering brine, released from the caverns during filling operations can be stored on the surface in open buffer ponds, but usually these ponds had limited relative capacity, especially if the storage field is of great storage volume. If the operator of the magazine is co-operating with the leaching plant, he can use also the brine produced in leaching caverns as the maneuvering brine. But in this case even, there are quantitative and qualitative limitations connected with the leaching plant production capacity.

Thus, very often the operator of the magazine has the problem with the necessary amount of the maneuvering saturated brine to withdraw the product from the storage caverns. In such cases, he is forced to use the unsaturated brine or even the fresh or sea water.

Classification of storage caverns, taking into account maneuvering brine

During filling-in process, the similar amount of brine, as the amount of stored-in product, will be necessary to deal with. One can classify the cases, taking into account possibility of what can be done with this maneuvering brine. This brine can be:

- stored on the surface in open buffer ponds if they are of enough capacity,
- used by chemical industry, if such an industry exists nearby – the best solution,
- evaporated in solar saline or standard salt works (rarely),
- dumped to the sea, if the cavern storage field is located near the sea shore,
- dumped to the salt lake, if the cavern storage field is located near the salt lake,
- dumped to the river, if it is possible from ecological point of view (rarely),,
- dumped to the deep underground layers, if there is no other possibility.

The similar classification can be done, taking into account the possibility where the maneuvering brine can be taken from **during withdrawal process**. The brine can be:

- taken from the open buffer ponds (usually saturated brine) if they contain enough amount of the brine,
- taken from the solution mined caverns of co-operating salt mine – the best solution, usually nearly saturated brine,
- taken from the salt lake, if the cavern storage field is located near the salt lake (good solution, but rare)
- replaced by the sea-water, if the cavern storage field is located near the sea shore,
- replaced by the fresh-water, if there is no other possibility.

Buffer cavern storages of small volume (e.g. small LPG caverns) can use the first variant of maneuvering brine source - open maneuvering ponds only. Even in this case, the problem of additional leaching can be important, if maneuvering brine can be diluted by rains and not fully saturated. But big reserve storage magazines usually are using few variants – beside the maneuvering open ponds with saturated brine, they use also partially sea water or fresh water, especially during first cycles of filling-withdrawal.

One can say, both above classifications are tightly connected. If the maneuvering brine from the storage is dumped into the sea, the sea water usually is used as a maneuvering brine, when the open buffer ponds are emptied during withdrawal operation.

If there is a chemical industry nearby to take the brine, it usually means that it should be the solution mining cavern field nearby also, to supply the industry when the storage caverns are not in filling-in process and there is no surplus of maneuvering brine. The example of such a case is Polish Underground Storage of Crude Oil and Fuels "Gora" near Inowroclaw. Polish petrochemical company ORLEN purchased Inowroclaw Salt Mines specially several years ago, and now a part of "Gora"

brine caverns is converted into the storage of capacity 3.5 million tons of crude oil and fuels. The source of maneuvering brine in this case is an open buffer pond and afterwards the brine from the solution mined caverns.

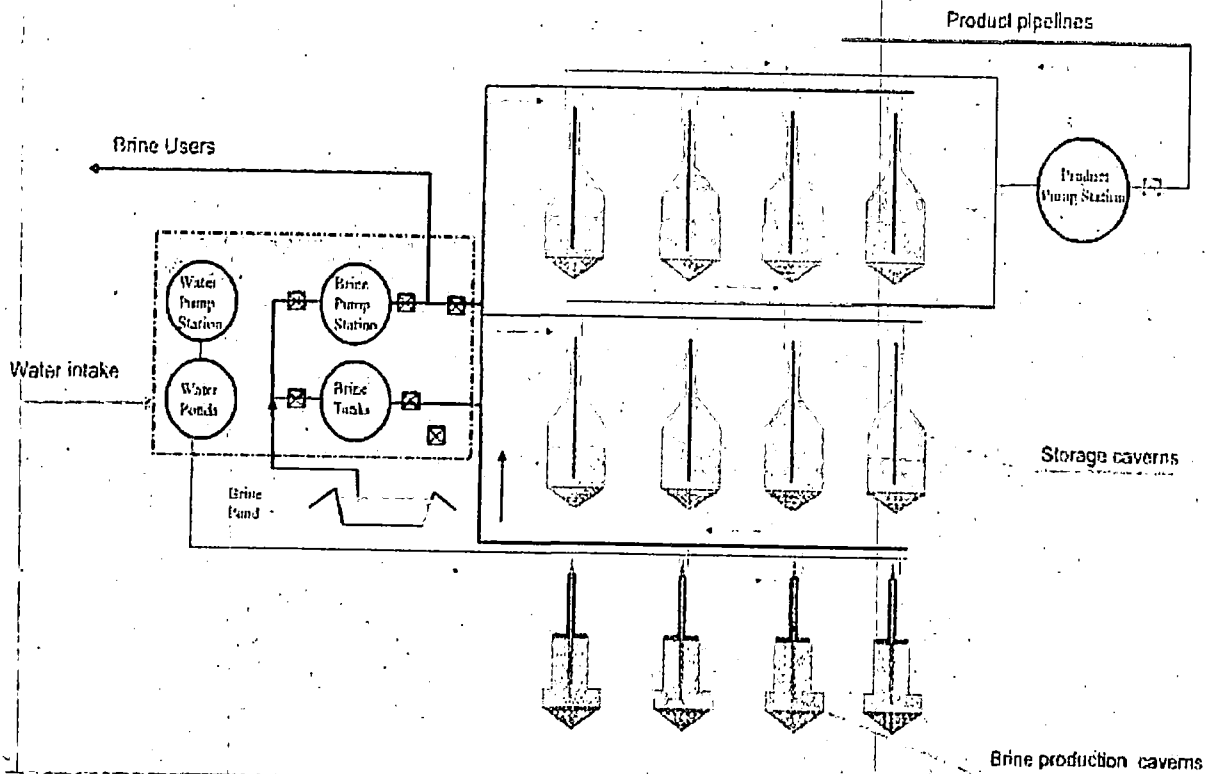


Fig 3. Scheme of storage operation using co-operation with brine mine - Product withdrawal

The necessity of using unsaturated brine or even water during storage operation, is occurring in different storages in very different moments and ways, depending on storing scenarios, availability of "outer" brine supply, size and status of open buffer ponds, etc. Summarizing, one can say that brine management in the particular storage depends very strictly on the actual local situation and it is difficult to find any universal technology how to deal with additional cavern leaching during storage operations.

On the other hand, as we mentioned before, this additional leaching is a serious problem for the cavern operator. If one cannot find any universal solutions – one should have at least an easy tool to solve quickly each particular problem.

WinUbro - a software tool to design and control leaching process

WinUbro software is a computer model for designing and controlling leaching process in salt caverns. WinUbro was developed in Chemkop Krakow Poland by the authors of this paper and presently it is the most widely used model of this kind in the world. Starting from 1996 the software has its commercial form working in Windows environment. Chemkop is licensing WinUbro for the users from many different companies. Actually it is over 20 users from such countries as : Germany, USA, Canada, China, France, Belgium, Netherlands, United Kingdom, Spain, Thailand, Poland and Slovakia.

It has been developed on the basis of the extensive experience on salt solution mining gathered by Chemkop. Due to its original algorithm of cavern wall movement the model favorably matches the results of actual leaching. The model is capable of predicting the course of leaching by direct or reverse circulation, with or without protection of the cavern roof by a blanket medium. Operation of blanket movements can be simulated and inhomogeneity of rock salt can be accommodated for. Sedimentation of insoluble parts as well as volume contraction are also taken into account in the balance formulae. This is possible, since a special formula for dependence of brine density on concentration, based on laboratory measurements (which differ from tabulated data for pure NaCl

solution), is incorporated in the code. The original, laboratory-tested leaching rate formula with physically meaningful coefficients is the part of the model. The shape of the cavern can be asymmetrical, the code can find the asymmetrical differentiation of rock-salt leaching rates, comparing the model with the results of sonar measurements using special subroutine. The package contains many graphical utilities (2D and 3D).

The software is continuously developed and upgraded, the authors are open for users suggestions for reasonable enhancements. License and service agreement conditions encompass also training of user personnel in leaching simulation and consultations of leaching simulation problems of the user, connected with the possible lack of modeling experience of user's personnel in the beginning.

WinUbro is also extensively used in Chemkop by its authors and other specialists for modeling very different cases of cavern development in Poland and abroad. Between these cases were also **simulations connected with the leaching during storage operations**. WinUbro is a universal software and can simulate very different leaching scenarios, but there is no separate subroutines to simulate a leaching during filling-withdrawal operations of storage cavern. So, although the modeling of this kind is possible using WinUbro, it needs additionally a lot of manual work of operator to divide during simulation each withdrawal operation into several stages and to model these stages separately.

WinUbroStorage - a software tool to estimate an additional leaching during storage

Taking into account all these inconveniences in using universal WinUbro model for simulation the additional leaching of the cavern during storage operation, the authors developed the special, separate version of the software, designed especially for this modeling purpose. This version was named **WinUbroStorage**.

In WinUbroStorage model, there is only one free-hanging tubing – a brine tubing located in the lower part of the cavern. The starting cavern status for the WinUbroStorage modeling can be any cavern modeled under WinUbro and stored in its .pad file.

WinUbroStorage model can simulate three operations :

Withdrawal – stored liquid product is withdrawing from the upper part of the cavern and brine (or water) is pumped through brine tubing to the lower part of the cavern. **The level between product and brine is moving up continuously** and the leaching is going on mainly in the zone between this level and the level of brine tubing shoe. In this zone the leaching has the quality as in the **direct circulation**, with full mixing inside the zone. The intensity of the leaching depends on the concentration of pumped-in brine and on its pumping rate. The input data are – location of the brine tubing shoe, brine (or water) pumping rate and operation time.

Filling-in - stored liquid product is pumped into the upper part of the cavern and brine is withdrawing through brine tubing from the lower part of the cavern. **The level between product and brine is moving down continuously** and the slow leaching can go on in the zone between this level and the level of cavern sump, with the intensity depending on the initial under-saturation of the brine in the cavern before this operation started. The quality of the leaching in this zone is as in the **reverse circulation**, with pushing down the layers of the brine without mixing. The input data are – location of the brine tubing shoe, product pumping rate and operation time.

Standstill – nothing is pumped-in or withdrawn-out. **The level between product and brine is constant**. The slow leaching (self-saturation of the cavern brine) can go on in the zone between this level and the level of cavern sump, with the intensity depending on the initial under-saturation of the brine in the cavern before this standstill stage started. The input data is standstill time.

In all cases, the result of modeling is the development of the cavern shape during storage operation. WinUbroStorage can model a sequence of several storage operation stages – simulating whole storage scenario, containing several withdrawal operations and filling operations, divided by standstill stages.

The analyzed case of storage cavern

To compare different variants of storage cavern exploitation, the following cavern for liquid products storage, designed in the flat salt bed deposit was analyzed:

Depth of the deposit top	800 m
Depth of the deposit bottom	1000 m
Rock salt thickness	200 m
Amount of insolubles	1.5 %
Depth of last cemented casing	830 m
Cavern neck length	25 m
Maximum depth of storing zone	950 m
Maximum depth covered by sump	990 m

Using the example of this cavern, we will consider below 4 different operation cases forming together a kind of parametric study – to evaluate the influence of different parameters on the final result – on shape and size of the cavern after 8 storage cycles

Simulation of additional leaching using WinUbroStorage software - fresh water - Case 1

Cylindrical cavern is filled and emptied once per year, using fresh water - **constant storage interval**.

Starting cavern shape - cylindrical, empty (brine filled) cavern of storage volume **148 500 m³**

Initial cavern diameter in storage zone 52 m

Storage interval **constant** 880 m - 950 m (increasing volume in each cycle)

Product withdrawal or filling rate 250 m³/h

Amount of cycles Withdrawal/Filling 8

Operation time: 8 years, One cycle per year

Cycle no.	Maximum diameter	Storage volume
Initial	52 m	148 000 m ³
1	58 m	172 000 m ³
2	64 m	199 000 m ³
3	72 m	230 000 m ³
4	80 m	264 000 m ³
5	88 m	306 000 m ³
6	96 m	353 000 m ³
7	106 m	408 000 m ³
8	118 m	470 000 m ³

Table 1 - Maximum diameter and storage volume of the cavern after each cycle in Case 1.

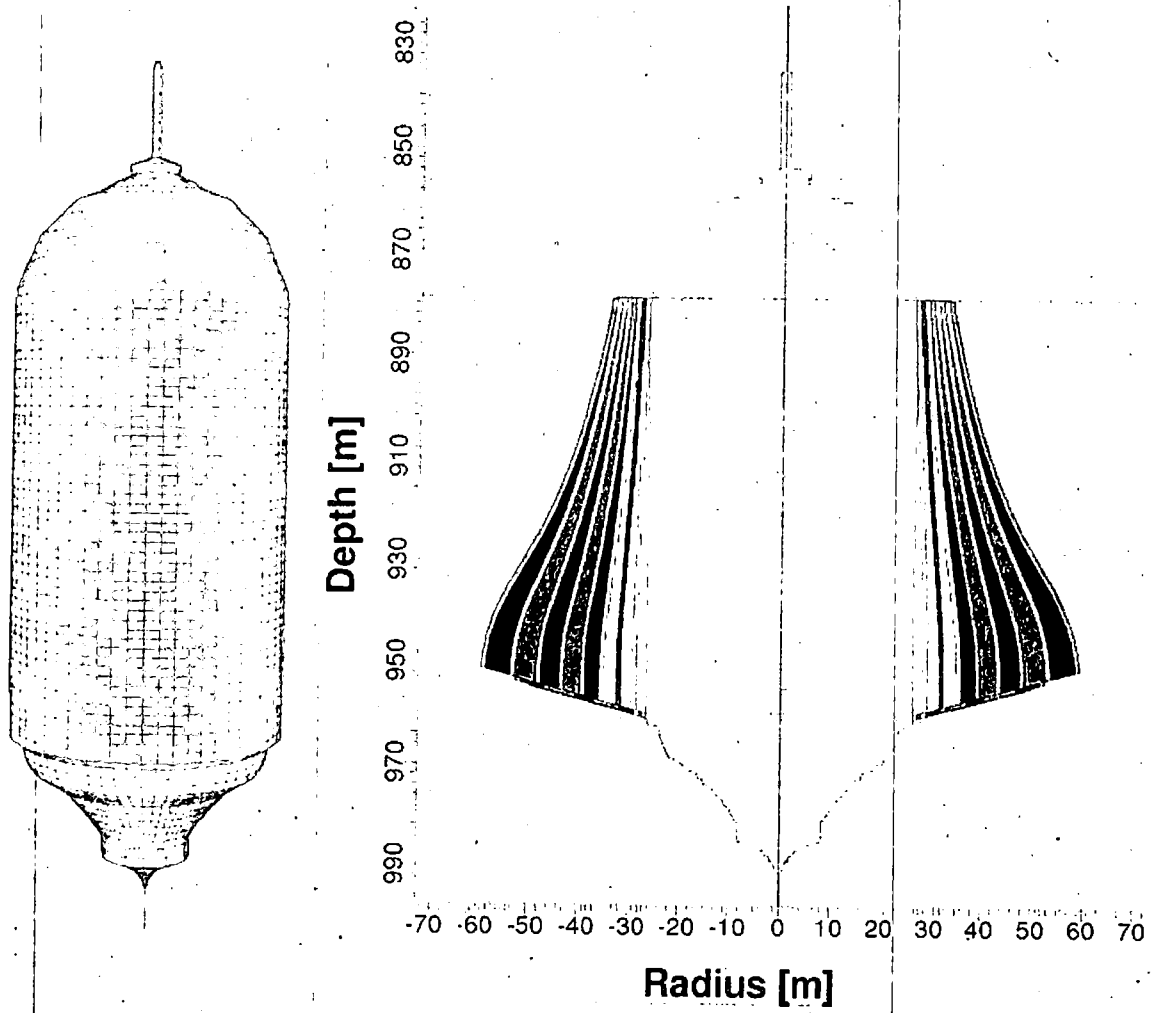


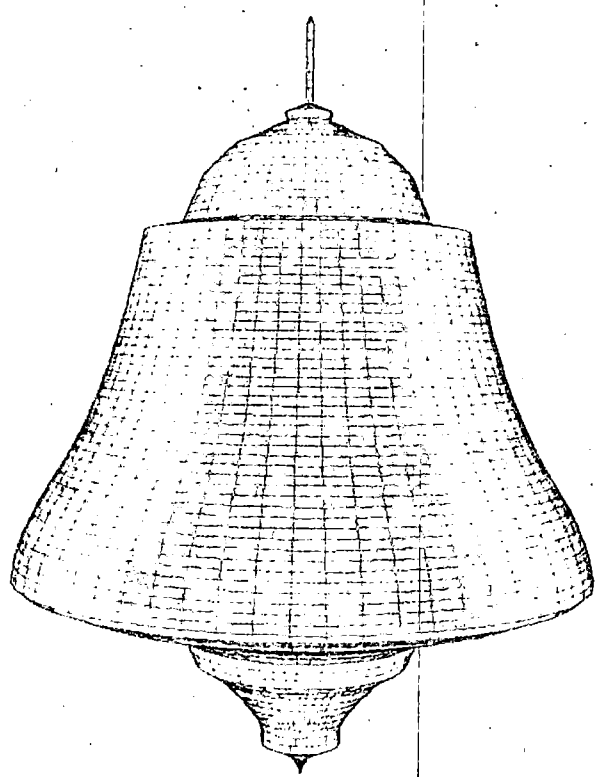
Fig 4. Initial shape, final shape and development of the cavern during 8 cycles of Withdrawal/Filling using fresh water - **Case 1**

Short technology description:

- Initial cavern cylindrical.
- Constant storage interval - using full operating volume in each cycle.
- Unlimited usage of fresh water.

Result evaluation :

Cavern diameter in the lower part is much too big.



As the final cavern shape in the Case 1 is wrong (too big volume, too big diameter in the lower part), the first idea was to change the initial cavern shape – make it smaller in the lower part and bigger in the upper part. Such a result is relatively easy to achieve during cavern creation, by keeping reverse circulation during some part of the cavern leaching time. The initial cavern operating volume should be also smaller by about 10%.

Simulation of additional leaching using WinUbroStorage software - fresh water - Case 2

Pear-shaped cavern is filled and emptied once per year, using fresh water – **constant storage interval**.

Starting cavern size - pear-shaped shaped (turned upside down), empty (brine filled) cavern of storage volume **133 000 m³**

Initial cavern diameter in storage zone: upper part 58 m, lower part 45 m

Storage interval **constant** : 880 m - 950 m (increasing volume in each cycle)

Product withdrawal or filling rate 250 m³/h

Amount of cycles Withdrawal/Filling 8

Operation time: 8 years, One cycle per year

Cycle no.	Diameter in the lower part	Storage volume
Initial	45 m	133 000 m ³
1	50 m	154 000 m ³
2	57 m	177 000 m ³
3	64 m	203 000 m ³
4	71 m	232 000 m ³
5	78 m	267 000 m ³
6	86 m	306 000 m ³
7	94 m	353 000 m ³
8	104 m	393 000 m ³

Table 2 - Maximum diameter and storage volume of the cavern after each cycle in Case 2.

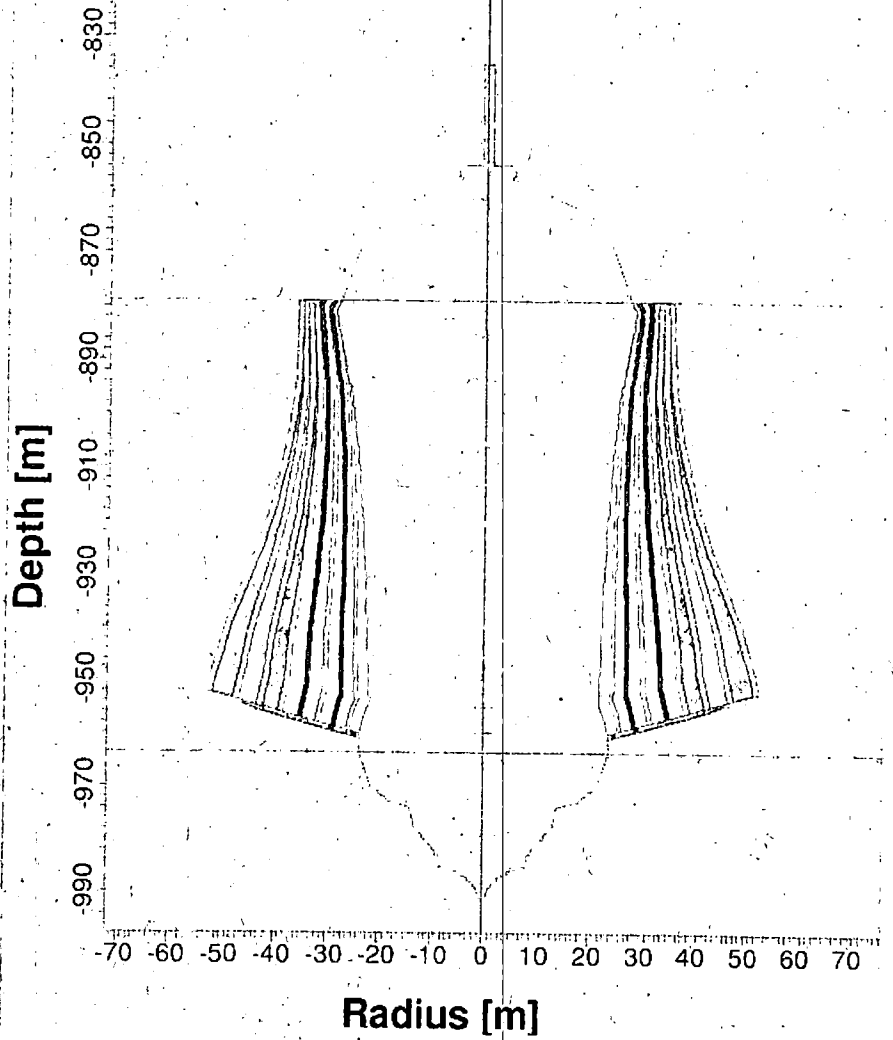
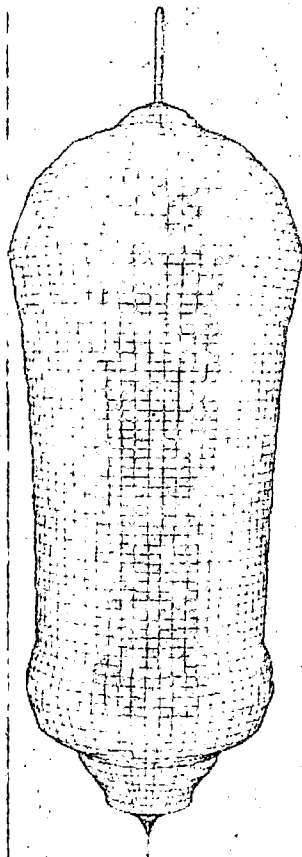


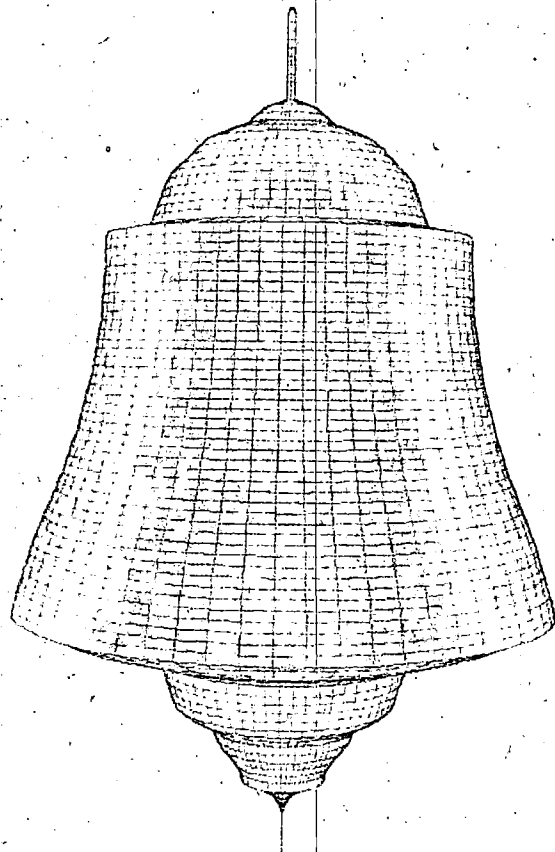
Fig 5. Initial shape, final shape and development of the cavern during 8 cycles of Withdrawal/Filling using fresh water - **Case 2**

Short technology description:

- Initial cavern - pear-shaped.
- Constant storage interval - using full operating volume in each cycle.
- Unlimited usage of fresh water.

Result evaluation :

Cavern diameter in the lower part is smaller, but still too big



The conclusion from the analysis of the Case 2 was that it is not enough to change only the initial shape of the storage cavern, but also the scenario of storage operation (cycles) should be another. The idea was to keep the initial storage operating volume of the cavern **constant** during all operating cycles. The second technological improvement was to keep withdrawal volume in each cycle by 500 m³ smaller than similar volume during filling. This improvement causes the smooth shaping of the upper part edges.

Simulation of additional leaching using WinUbroStorage software - fresh water - Case 3

Pear-shaped cavern is filled and emptied once per year using fresh water – **constant operating volume in each cycle.**

Starting cavern size - pear-shaped shaped (turned upside down), empty (brine filled) cavern of storage volume **133 000 m³**

Initial cavern diameter in storage zone: upper part 58 m, lower part 45 m

Storage interval **changing**

Operation volume in each cycle – **constant** : **132 500 m³** during filling, **132 000 m³** during withdrawal

Product withdrawal or filling rate 250 m³/h

Amount of cycles Withdrawal/Filling 8

Operation time: 8 years, One cycle per year

Cycle no.	Diameter in the lower part	Storage interval
Initial	45 m	
1	51 m	880 m - 950 m
2	56 m	881 m - 944 m
3	61 m	882 m - 938 m
4	66 m	884 m - 934 m
5	71 m	886 m - 931 m
6	75 m	888 m - 929 m
7	79 m	889 m - 927 m
8	83 m	891 m - 926 m

Table 3 - Maximum diameter and storage interval of the cavern after each cycle in Case 3.

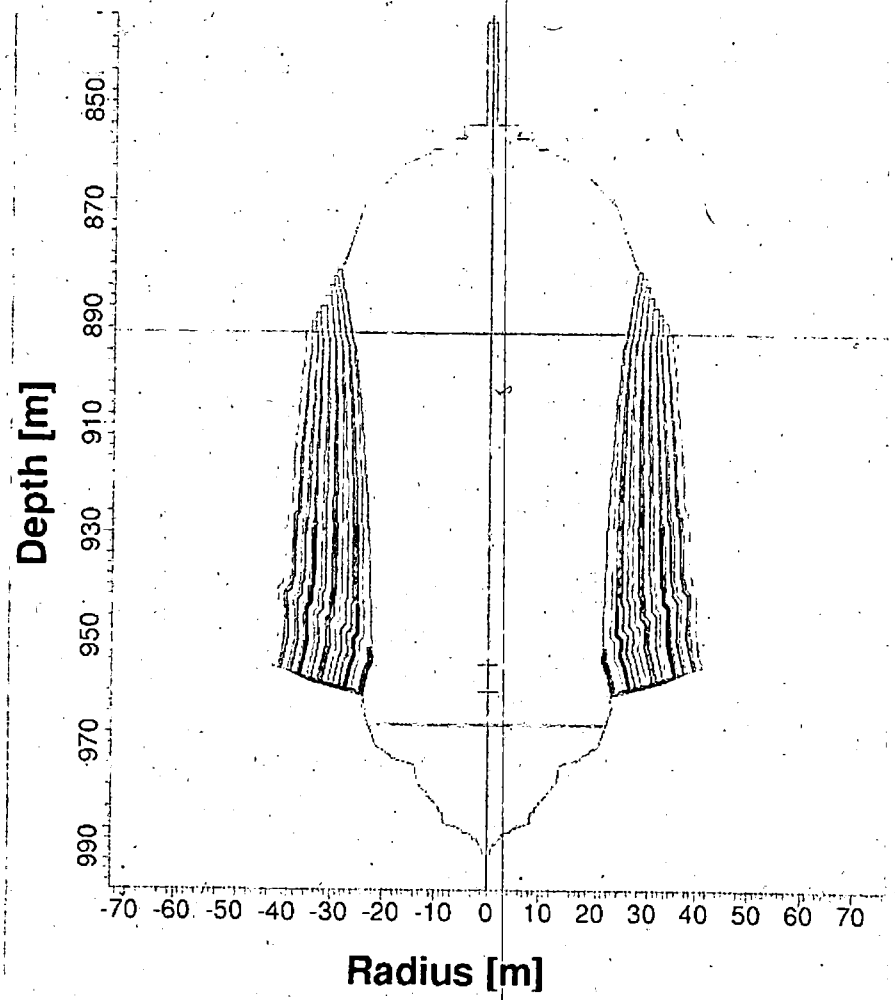
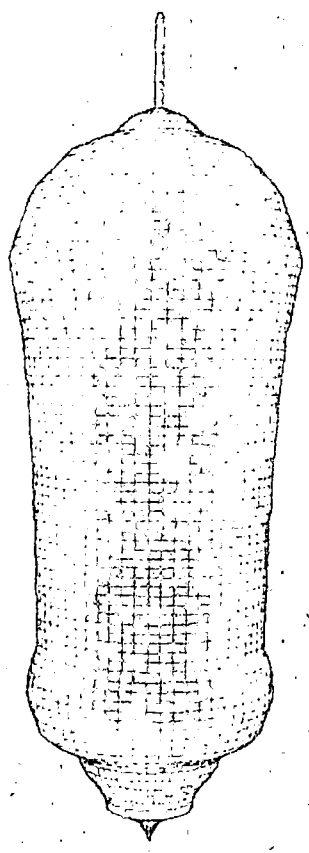


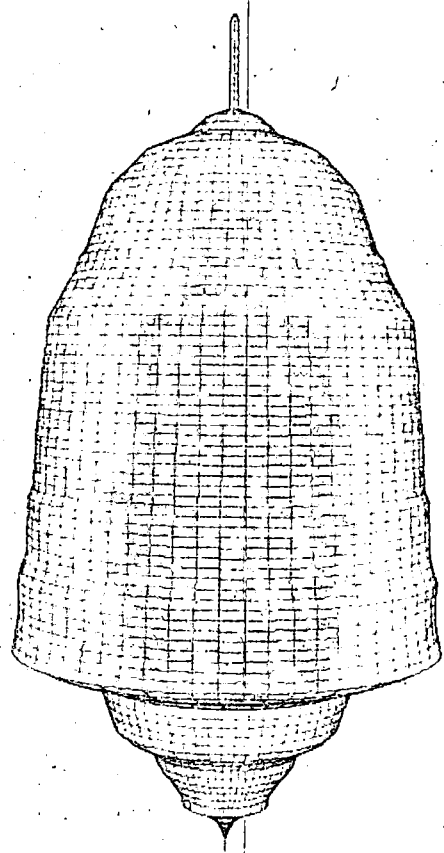
Fig 6. Initial shape, final shape and development of the cavern during 8 cycles of Withdrawal/Filling using fresh water - **Case 3**

Short technology description:

Initial cavern - pear-shaped.
 Constant operating volume in each cycle.
 Usage of fresh water, but limited amount.

Result evaluation :

Cavern diameter in the lower part is good, shape is safe.



Although the result of the Case 3 was satisfactory, there was also a question – the usage of limited amount of saturated brine from the buffer pond in the beginning of each withdrawal cycle - what will it change? Does it improve the shape enough to allow few more similar storage cycles?

Simulation of additional leaching using WinUbroStorage software - brine+ fresh water - Case 4

Pear-shaped cavern is filled and emptied once per year using (during product withdrawal) first 30 000 m³ of saturated brine and afterwards fresh water – **constant operating volume in each cycle.**

Starting cavern size - pear-shaped shaped (turned upside down), empty (brine filled) cavern of storage volume **133 000 m³**

Initial cavern diameter in storage zone: upper part 58 m, lower part 45 m

Storage interval **changing**

Operation volume in each cycle – **constant** : **132 500 m³** during filling, **132 000 m³** during withdrawal (first **30 000 m³** of brine with concentration of **310 g/l** and afterwards **102 000 m³** of fresh water).

Product withdrawal or filling rate 250 m³/h

Amount of cycles Withdrawal/Filling 8

Operation time: 8 years, One cycle per year

Cycle no.	Diameter in the lower part	Storage interval
Initial	45 m	
1	50.5 m	880 m - 950 m
2	55 m	881 m - 943 m
3	59 m	882 m - 937 m
4	62 m	883 m - 933 m
5	65 m	884 m - 929 m
6	68 m	884.5 m - 926 m
7	70 m	885 m - 923.5 m
8	72 m	885.5 m - 921.5 m

Table 4 - Maximum diameter and storage interval of the cavern after each cycle in Case 4.

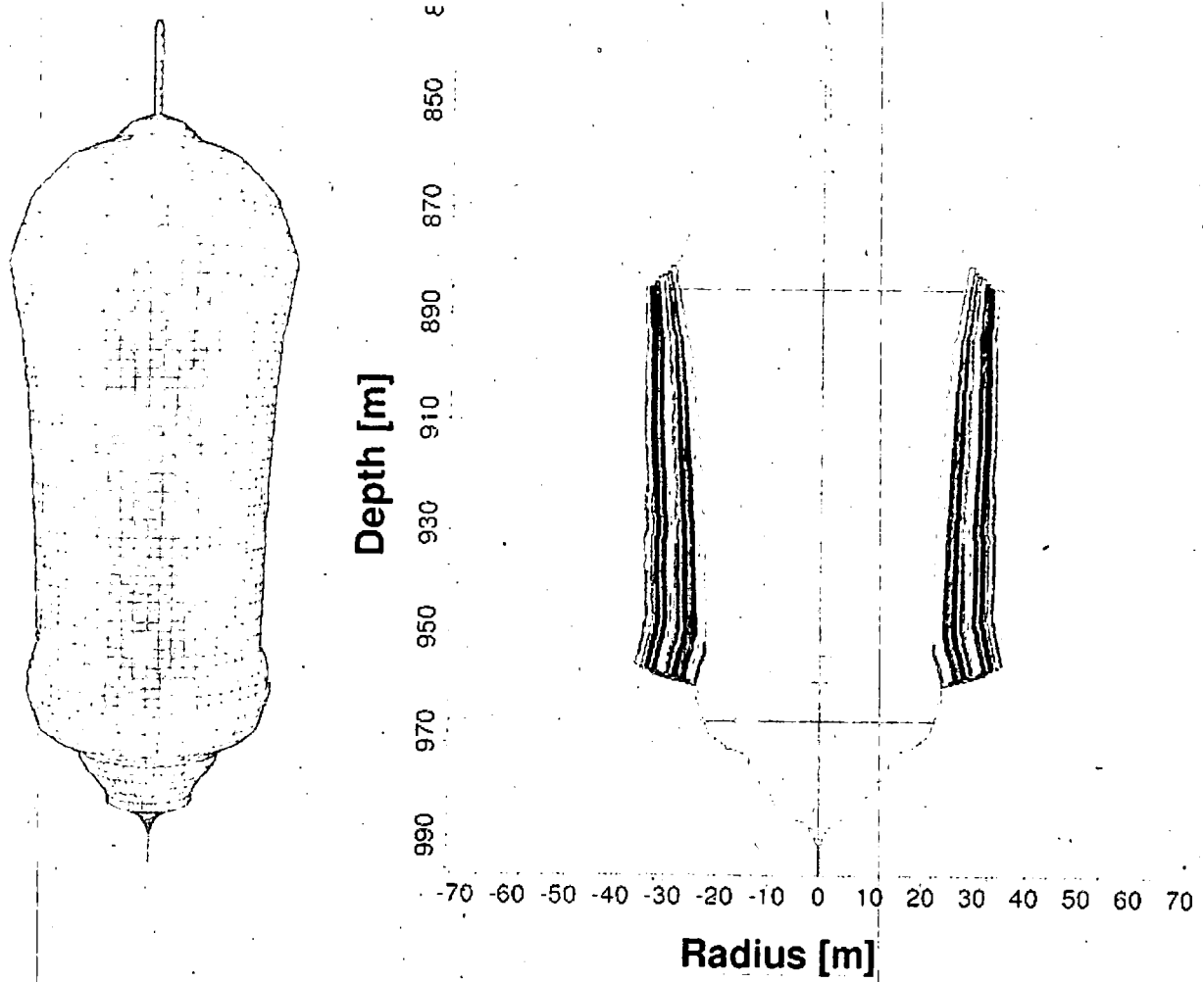


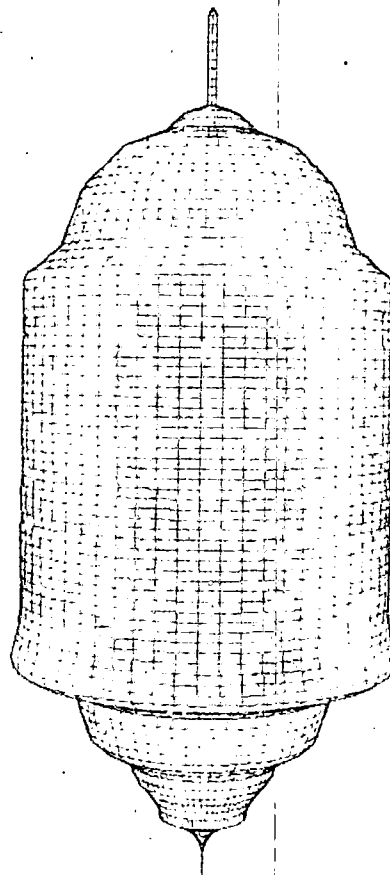
Fig 7. Initial shape, final shape and development of the cavern during 8 cycles of Withdrawal/Filling using brine and fresh water - Case 4

Short technology description:

Initial cavern - pear-shaped.
 Constant operating volume in each cycle.
 Usage first a limited amount of saturated brine and afterwards a fresh water.

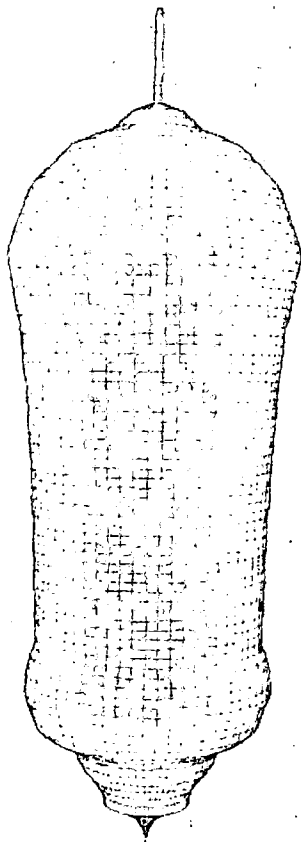
Result evaluation :

Cavern diameter is good and regular.
 Shape is safe and few more such cycles could be made.

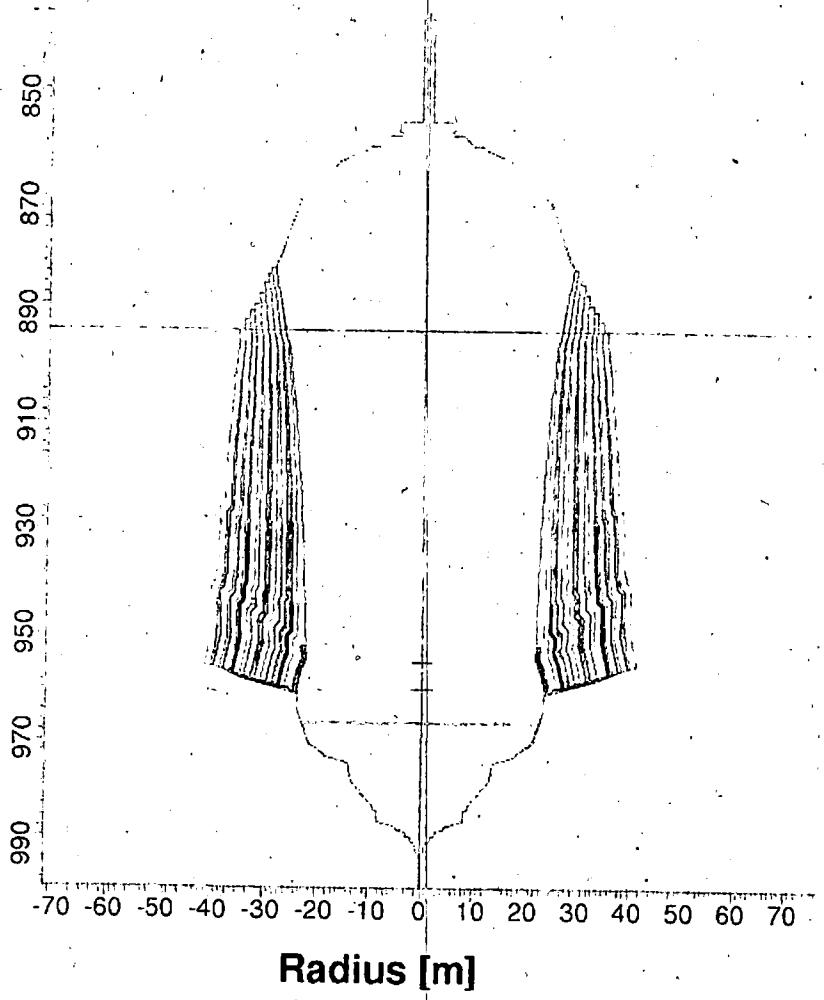


Conclusions

1. The additional leaching of the cavern walls during the storage operations can be a serious problem for the cavern operator. If the cavern is emptied using fresh water, its volume and size is increasing significantly. **Case 1** analyzed in this paper shows that after 8 such operation cycles with constant storage interval (using full operating volume in each cycle) the maximum diameter of the **cylindrical** model cavern grows up from 52 m to 118 m and its volume grows up from 148 000 m³ to 470 000 m³. The final shape of such a cavern (see Fig. 4) is too big taking into account geomechanical criteria in this case.
2. The final shape of the storage cavern, operating with the use of fresh water, can be improved if the starting cavern shape will be not cylindrical, but **pear-shaped** (turned upside down) – see **Case 2**. If the lower part of initial cavern will be 7 m smaller than cylinder in the Case 1, and the upper part of the cavern will be 6 m bigger than cylinder in the Case 1, the final resulting cavern after 8 operation cycles with constant storage interval (using full operating volume in each cycle) will have the maximum diameter of 104 m (12 m less than in Case1) and volume 393 000 m³ (77 000 m³ less than in the Case1) - (see Fig. 5). It is much better than in the Case1, but still barely acceptable by geomechanical criteria.
3. The conclusion from the analysis of the Case 2 is: It is not enough to change only the initial shape of the storage cavern, but also the scenario of storage operation should be another – see **Case 3**. It is better to keep the initial storage operating volume of the cavern **constant** (132 000 m³) during all operating cycles, despite that this operating volume is potentially growing. The next technological improvement is to keep withdrawal volume in each cycle by ca. 500 m³ smaller than similar volume during filling. This improvement causes the smooth shaping of the cavern roof edges. The resulting shape (see Fig. 6) is now good and safe from geomechanical point of view (maximum diameter 83 m).
4. All above analyzed cases (1 ÷ 3) were connected with full use of fresh water only during withdrawal cycles. Usually, storage operations are supported by open buffer ponds containing saturated or nearly saturated brine. The next case considered was the **Case 4** where each withdrawal cycle started with the use of **30 000 m³ of brine** from the buffer pond and afterwards 102 000 m³ of fresh water. Amount of 30 000 m³ corresponds with the volume of buffer ponds in considered project (2 x 120 000 m³) divided by 8 caverns which will be under withdrawal process simultaneously. The effect of such technology is visibly beneficial for the cavern shape (see Fig. 7). The final cavern shape is very regular, with the maximum diameter of 72 m. In such a situation few next similar filling/withdrawal cycles could be made.
5. The important remark is: - If you have the possibility of using highly concentrated brine just in the part of your withdrawal process and afterwards you are forced to use fresh water – **use this brine just in the beginning of each withdrawal cycle**. Do not start with the water and do not mix the brine with the water on the surface. Just fill your storage cavern bottom with as many brine as you have and start with the water later. Using such a way will protect the most sensitive part of your cavern – the lower part. The water if entered, will have already enough volume to mix with the brine and the resulting leaching rate will be smaller.
6. Looking from this point of view, one can evaluate in different manner the **best position of the brine-product level versus brine tubing shoe in the beginning of withdrawal cycle**. Usually, the designers and cavern owners wanted to have this lower limit of storage interval as near as possible to the brine shoe, as it is making the storage volume greater. But if the cavern should be emptied using fresh water, it is much better to start withdrawal cycles from higher depth, leaving some volume of cavern brine between the brine-product level and brine tubing shoe as the volume for safe mixing of the water and brine. Such technology reduces the storage volume in the first cycles of the cavern work, but it can much improve the cavern shape development during storage operations.



Depth [m]



Radius [m]

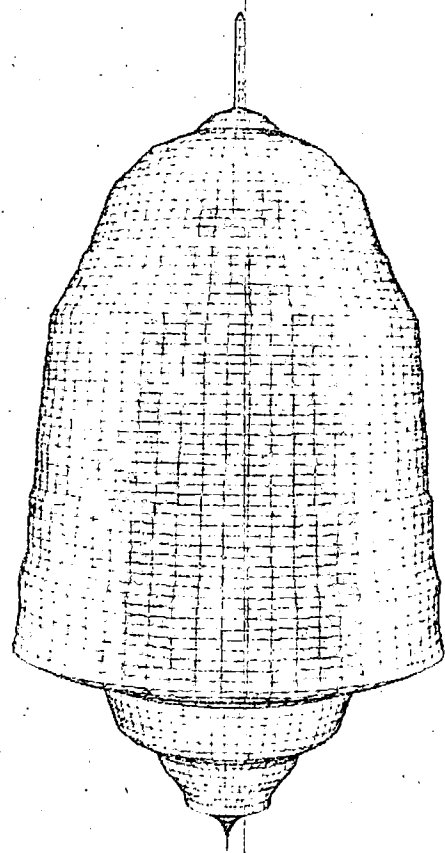
Fig 6. Initial shape, final shape and development of the cavern during 8 cycles of Withdrawal/Filling using fresh water - **Case 3**

Short technology description:

Initial cavern - pear-shaped.
 Constant operating volume in each cycle.
 Usage of fresh water, but limited amount.

Result evaluation :

Cavern diameter in the lower part is good, shape is safe.



Although the result of the Case 3 was satisfactory, there was also a question – the usage of limited amount of saturated brine from the buffer pond in the beginning of each withdrawal cycle - what will it change? Does it improve the shape enough to allow few more similar storage cycles?

Simulation of additional leaching using WinUbroStorage software - brine+ fresh water - Case 4

Pear-shaped cavern is filled and emptied once per year using (during product withdrawal) first 30 000 m³ of saturated brine and afterwards fresh water – **constant operating volume in each cycle.**

Starting cavern size - pear-shaped shaped (turned upside down), empty (brine filled) cavern of storage volume **133 000 m³**

Initial cavern diameter in storage zone: upper part 58 m, lower part 45 m

Storage interval **changing**

Operation volume in each cycle – **constant** : **132 500 m³** during filling, **132 000 m³** during withdrawal (first **30 000 m³** of brine with concentration of **310 g/l** and afterwards **102 000 m³** of fresh water).

Product withdrawal or filling rate 250 m³/h

Amount of cycles Withdrawal/Filling 8

Operation time: 8 years, One cycle per year

Cycle no.	Diameter in the lower part	Storage interval
Initial	45 m	
1	50.5 m	880 m - 950 m
2	55 m	881 m - 943 m
3	59 m	882 m - 937 m
4	62 m	883 m - 933 m
5	65 m	884 m - 929 m
6	68 m	884.5 m - 926 m
7	70 m	885 m - 923.5 m
8	72 m	885.5 m - 921.5 m

Table 4 - Maximum diameter and storage interval of the cavern after each cycle in Case 4.

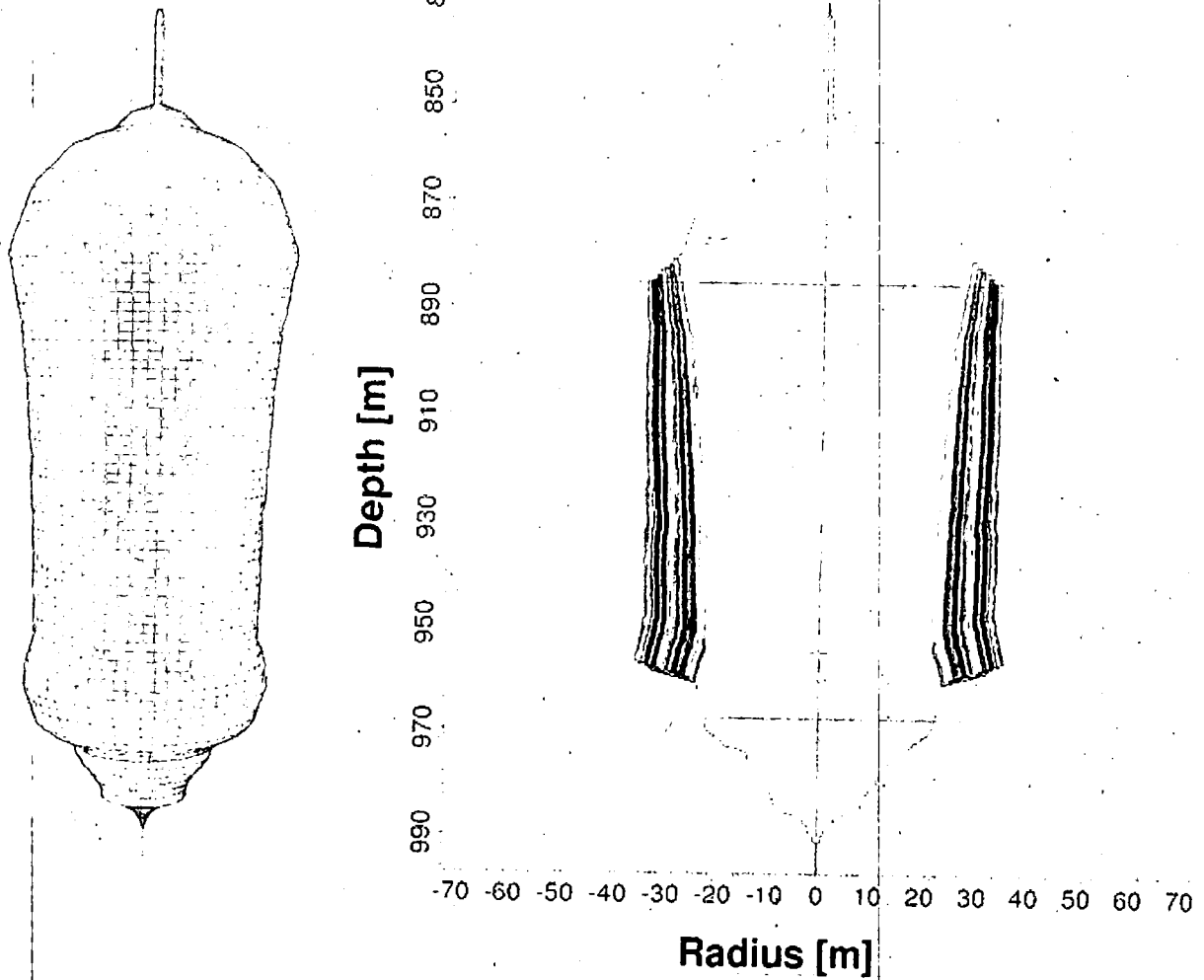


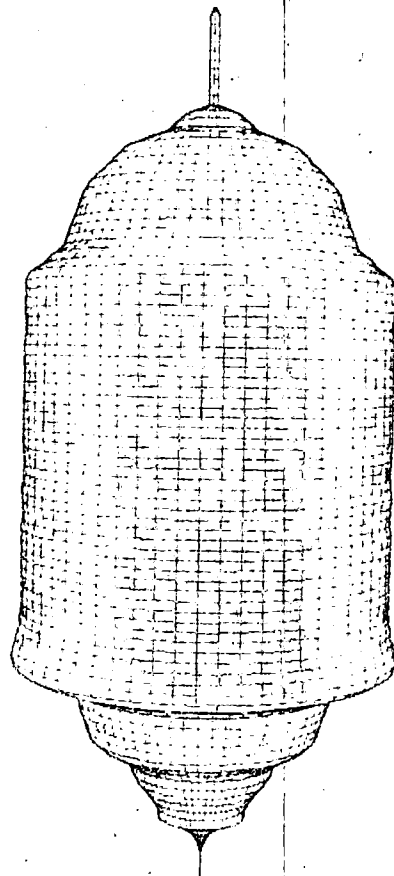
Fig 7. Initial shape, final shape and development of the cavern during 8 cycles of Withdrawal/Filling using brine and fresh water
Case 4

Short technology description:

Initial cavern - pear-shaped.
 Constant operating volume in each cycle.
 Usage first a limited amount of saturated brine and afterwards a fresh water.

Result evaluation :

Cavern diameter is good and regular.
 Shape is safe and few more such cycles could be made.



Conclusions

1. The additional leaching of the cavern walls during the storage operations can be a serious problem for the cavern operator. If the cavern is emptied using fresh water, its volume and size is increasing significantly. **Case 1** analyzed in this paper shows that after 8 such operation cycles with constant storage interval (using full operating volume in each cycle) the maximum diameter of the **cylindrical** model cavern grows up from 52 m to 118 m and its volume grows up from 148 000 m³ to 470 000 m³. The final shape of such a cavern (see Fig. 4) is too big taking into account geomechanical criteria in this case.
2. The final shape of the storage cavern, operating with the use of fresh water, can be improved if the starting cavern shape will be not cylindrical, but **pear-shaped** (turned upside down) – see **Case 2**. If the lower part of initial cavern will be 7 m smaller than cylinder in the Case 1, and the upper part of the cavern will be 6 m bigger than cylinder in the Case 1, the final resulting cavern after 8 operation cycles with constant storage interval (using full operating volume in each cycle) will have the maximum diameter of 104 m (12 m less than in Case1) and volume 393 000 m³ (77 000 m³ less than in the Case1) - (see Fig. 5). It is much better than in the Case1, but still barely acceptable by geomechanical criteria.
3. The conclusion from the analysis of the Case 2 is: It is not enough to change only the initial shape of the storage cavern, but also the scenario of storage operation should be another – see **Case 3**. It is better to keep the initial storage operating volume of the cavern **constant** (132 000 m³) during all operating cycles, despite that this operating volume is potentially growing. The next technological improvement is to keep withdrawal volume in each cycle by ca. 500 m³ smaller than similar volume during filling. This improvement causes the smooth shaping of the cavern roof edges. The resulting shape (see Fig. 6) is now good and safe from geomechanical point of view (maximum diameter 83 m).
4. All above analyzed cases (1 ÷ 3) were connected with full use of fresh water only during withdrawal cycles. Usually, storage operations are supported by open buffer ponds containing saturated or nearly saturated brine. The next case considered was the **Case 4** where each withdrawal cycle started with the use of **30 000 m³ of brine** from the buffer pond and afterwards 102 000 m³ of fresh water. Amount of 30 000 m³ corresponds with the volume of buffer ponds in considered project (2 x 120 000 m³) divided by 8 caverns which will be under withdrawal process simultaneously. The effect of such technology is visibly beneficial for the cavern shape (see Fig. 7). The final cavern shape is very regular, with the maximum diameter of 72 m. In such a situation few next similar filling/withdrawal cycles could be made.
5. The important remark is: - If you have the possibility of using highly concentrated brine just in the part of your withdrawal process and afterwards you are forced to use fresh water – **use this brine just in the beginning of each withdrawal cycle**. Do not start with the water and do not mix the brine with the water on the surface. Just fill your storage cavern bottom with as many brine as you have and start with the water later. Using such a way will protect the most sensitive part of your cavern – the lower part. The water if entered, will have already enough volume to mix with the brine and the resulting leaching rate will be smaller.
6. Looking from this point of view, one can evaluate in different manner the **best position of the brine-product level versus brine tubing shoe in the beginning of withdrawal cycle**. Usually, the designers and cavern owners wanted to have this lower limit of storage interval as near as possible to the brine shoe, as it is making the storage volume greater. But if the cavern should be emptied using fresh water, it is much better to start withdrawal cycles from higher depth, leaving some volume of cavern brine between the brine-product level and brine tubing shoe as the volume for safe mixing of the water and brine. Such technology reduces the storage volume in the first cycles of the cavern work, but it can much improve the cavern shape development during storage operations.

Van:
Verzonden: woensdag 3 april 2013 15:51
Aan:

CC:

Onderwerp: Beantwoording overige vragen inzake de Gasolieopslag De Marssteden, Twente
Bijlagen: 20130403_beantwoording_overige_vragen.pdf

Beste . en

Naast de drie reeds beantwoorde vragen die jullie ons op 15 maart 2013 gesteld hebben, waren er ook nog vier puntjes waarop jullie aanvullende informatie of toelichting wensten:

- in het deel 'Bodembeweging' kan nog worden opgenomen dat het meten van microseismiciteit een mogelijkheid is om het instorten van cavernedaken te monitoren;
- in het deel 'Bodembeweging' dient te worden opgenomen dat er in het verleden één sinkhole ontstaan is in het boorterrein in Hengelo;
- in D5 en D8 nader gespecificeerd te worden;
- in de tabel 'hoeveelheid stoffen op te slaan' dient een tabelletje te worden geplaatst van de verwachting van hoeveelheden die er jaarlijks in en uit de caveerne gaan. Dit kan gebaseerd worden op het Vervoersplan.

In bijgevoegd document treffen jullie onze reactie, toelichting of beantwoording aan op deze punten.

Ik hoop jullie hiermee voldoende geïnformeerd te hebben.

Met vriendelijke groet,

Projectmanager Olieopslag Twente

Geologist / Project manager
Mining Technology Department (MTD), sBU Salt

T +31 74

F +31 74

M +31 6

E [@akzonobel.com](mailto:)

Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.

Boortorenweg 27

7554 RS Hengelo (OV)

P.O. Box 25

7550 GC Hengelo (OV)

The Netherlands

www.akzonobel.com

Follow AkzoNobel online at www.akzonobel.com/followus

The information contained in this message, including any attachments, may be privileged and confidential and is intended only for the use of the individual and/or entity identified in the address of this message. If you are not an intended recipient, please notify the sender and delete and destroy this message, including any back-up copies. Please refer to www.akzonobel.com/legal-entities for further legal information regarding the sending entity if from the EU, Croatia, Norway, Turkey, Ukraine or Switzerland.



Staatstoezicht op de Mijnen
T.a.v. r
Postbus 24037
2490 AA 's-Gravenhage

3 april 2013

**Beantwoording overige vragen overleg 15 maart 2013 inzake Opslagplan
Gasolieopslag Twente-Rijn De Marssteden, Twente**

Geachte heren en dames,

Op 15 maart 2013 hebben [redacted] en [redacted] u nader toelichting gegeven inzake het door AkzoNobel op 16 januari 2013 bij EZ ingediende Opslagplan Gasolieopslag Twente-Rijn De Marssteden, Twente. Daarbij zijn tevens een paar kleine tekstuele punten of punten waarop nog wat extra informatie nodig was aan de orde gekomen:

- in het deel 'Bodembeweging' kan nog worden opgenomen dat het meten van microseismiciteit een mogelijkheid is om het instorten van cavernedaken te monitoren;
- in het deel 'Bodembeweging' dient te worden opgenomen dat er in het verleden één sinkhole ontstaan is in het boorterrein in Hengelo;
- in D5 en D8
[redacted] nader gespecificeerd te worden;
- in de tabel 'hoeveelheid stoffen op te slaan' dient een tabelletje te worden geplaatst van de verwachting van hoeveelheden die er jaarlijks in en uit de caveerne gaan. Dit kan gebaseerd worden op het Vervoersplan.

In voorliggend document lichten we deze zaken nader toe en geven aanvullende informatie.

Microseismiciteit

Bij onderdeel C) Gegevens inzake bodembeweging, deel C1) Aard van de bodembeweging, subkop 'bodentrilling' kan worden aangevuld dat het mogelijk is om middels zeer gevoelige downhole meetapparatuur zogenaamde microseismiciteit te meten. Dergelijke microseismiciteit, die aan het maaiveld niet voelbaar of meetbaar is (vanwege o.a. de achtergrondruis), kan duiden op het vallen van blokken vanuit het dak van een caveerne naar de bodem of zelfs het instorten van het gehele dak. Met het meten van microseismiciteit in zoutcavernes in Hengelo is echter nog geen ervaring en het is dus onduidelijk welke fenomenen wel en welke niet te meten zijn en hoe deze zich openbaren in de metingen.

De beoogde olieopslagcavernes zijn o.a. geselecteerd op basis van hun stabiliteit, het feit dat ze volledig in Zout A gelegen zijn en hun beperkte hoogte. Instorting van het dak of zelfs het vallen van brokken uit het dak wordt dan ook zeer onwaarschijnlijk geacht. Indien dergelijke zaken zich voordoen zal dit direct d.m.v. andere metingen opgemerkt worden. Zo zal het vallen van een brok uit het dak leiden tot een stijging van het oliepekelniveau (want eerst bevond het blok zich in de olie en na belanden op de bodem bevindt het zich in de pek) en een verandering van de druk aan maaiveld (door de verandering van het oliepekelniveau). Tenslotte zal ongeveer elke 10 jaar, als een caveerne vanwege verversing of om een andere reden geleegd is, een sonarmeting worden uitgevoerd die nauwkeurig wordt vergeleken met de laatste meting, zodat veranderingen van de vorm van de caveerne opgemerkt kunnen worden.

Dit alles overziende is besloten om in de olieopslagcavernes geen gebruik te maken van de mogelijkheid om microseismiciteit te meten en hier staan we nog steeds achter.

Ontstaan van één sinkhole

In het verleden is er nabij Hengelo één sinkhole ontstaan boven een ingestorte zoutcaveerne. Daarnaast zijn er enkele bodemdalingskommen ontstaan, eveneens boven ingestorte cavernes (waarbij de ruimte echter al volledig is opgevuld voordat deze tot aan het maaiveld gemigreerd is). De beoogde olieopslagcavernes zijn echter juist geselecteerd op basis van criteria die hun stabiliteit waarborgen (zoals de D/S-ratio; zie rapporten IfG en WEP), het feit dat ze volledig in Zout A gelegen zijn en hun beperkte hoogte. De kans op instorting is dus zeer gering en indien deze tóch op zou treden, zou het puinmateriaal de ruimte volledig hebben opgevuld ruim voordat de ruimte tot aan de basis van de Noordzeegroep gemigreerd is (vanwege de geringe hoogte van de cavernes).

Derhalve hebben we ervan afgezien om in het Opslagplan deze sinkhole expliciet te noemen en hier staan we nog steeds achter.

Vage termen in D5 en D8

In Onderdeel D) Gegevens inzake beëindiging opslag, deel D5) Verwachting t.a.v. langetermijn stabiliteit van opslagcavernes, wordt ingegaan op de gesteentemechanische situatie na afloop van de gasolieopslag. In de laatste alinea van D5) worden twee vage termen gebruikt:

- De BGR concludeert dat het na afsluiting van een caverne geruime tijd duurt voordat de lithostatische druk bereikt wordt.

Toelichting: Voor het zout in Hengelo (of voor andere gelaagde zoutafzettingen) zijn nooit berekeningen gedaan naar de periode waarin na afsluiting de lithostatische druk in de caverne bereikt wordt. Deze zijn eind jaren 90 wel gedaan voor Heiligerlee en Zuidwending. Daaruit blijkt dat, zonder temperatuureffect, dit na ca. 100 jaar het geval is. Strikt genomen is het zout in Hengelo niet vergelijkbaar met dat in Heiligerlee/Zuidwending (geringere diepte, kleinere hoogte caverne). Wel kan gesteld worden dat deze verschillen in principe tot gevolg hebben dat de periode waarbinnen de lithostatische druk in de caverne na afsluiting bereikt wordt langer zal zijn en dus minimaal meer dan 100 jaar zal bedragen.

- In de praktijk betekent dit dat gedurende een maatschappelijk relevant tijdvak de met verzadigde pekkel gevulde holruimte niet van vorm of plaats verandert en dat de langetermijn stabiliteit en integriteit van de caverne gedurende deze periode niet in het gedrang zijn.

Toelichting: Wat een maatschappelijk relevant tijdvak is, wordt nergens in wet- of regelgeving gedefinieerd. In de praktijk wordt een tijdvak van 1000 jaar vanaf heden als relevant gezien en binnen het project Pilot Stabilisatie Cavernes Twente wordt zelfs 10.000 jaar aangehouden als tijdsperiode dat ingebrachte stoffen veilig dienen te zijn. Echter, aangezien deze uitspraken gebaseerd zijn op de ervaringen die zijn opgedaan in een periode van 50 tot 100 jaar, is het noemen van langere periodes niet met ervaringen onderbouwd. Hoe dan ook kan gesteld worden dat binnen de opslagperiode de holruimte zeker niet van vorm of plaats zal veranderen en dat met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid te stellen is dat dit ook in de eerstvolgende honderden jaren niet het geval zal zijn.

Hoeveelheid stoffen op te slaan

In onderdeel B) Gegevens m.b.t. het opslaan van stoffen, deel B1.1) Een beschrijving van de hoeveelheid en de samenstelling van de stoffen die worden opgeslagen, en deel B5.3) Omvang van de opslag, wordt o.a. ingegaan op de capaciteit van de opslag. Het opslagvolume bedraagt tussen de 125.000 m³ en 200.000 m³ per caveerne en het totale opslagvolume in de 5 beoogde opslagcavernes bedraagt circa 750.000 m³. Verder wordt in deel B5.4) Duur van de opslag, aangegeven dat de opslag een duur heeft van 30 jaar. Dit impliceert dat de olie eenmalig in de cavernes gebracht wordt en daar vervolgens 30 jaar blijft, hetgeen niet correct is. Derhalve dient deel B5.4) Duur van de opslag aangevuld te worden met de volgende tekst:

Binnen de opslagperiode van 30 jaar wordt de olie in elk van de opslagcavernes waarschijnlijk diverse keren ververs. Redenen hiervoor kunnen zijn:

- de strategische olievoorraad is nodig vanwege het ontstaan van een oliecrisis;
- de commercieel opgeslagen olievoorraad wordt op de markt gebracht vanwege de hiermee te genereren opbrengst;
- de opgeslagen olie dient ververs te worden, bijvoorbeeld omdat de specificaties van de olie veranderen of om veroudering van de opgeslagen olie te voorkomen.

In het MER (Milieueffectrapport voor de opslag van gasolie in bestaande zoutcavernes, Tauw, januari 2013) is uitgegaan van de volgende gemiddelde situatie:

Soort opslag	Activiteit	Toelichting	Volume-impact (m ³)	# uitslagen (30 jr)	# inslagen (30 jr)	# bewegingen ² (30 jr)	# bewegingen (per activiteit)	# bewegingen (gemiddeld p.j.)
Strategisch	Vullen/leggen Grote crisis Verversing	De cavernes worden volledig geleegd en gevuld, naar verwachting vijfmaal regulier geleegd en eenmaal geleegd naar aanleiding van een grote crisis ¹	500.000	6	6	300.000	50.000	10.000
	Kleine crisis	Er wordt een beroep gedaan op 15% van het volume door COVA	75.000	3	3	22.500	7.500	750
	Grote crisis	Naar verwachting zal een grote crisis waarbij het totale volume uit de caveerne wordt gehaald, één verversingscyclus (inslag & uitslag) onnodig maken, dit zal door timing en onvoorspelbaarheid van de crisis, waardoor al activiteiten hebben plaatsgevonden, niettemin leiden tot extra vervoersbewegingen voor 15% ³ van het opslagvolume	75.000	1	1	7.500	7.500	250
Commercieel	Commerciële opslag	Het volledige volume wordt ververs	250.000	12	12	300.000	25.000	10.000
				22	22	630.000		21.000

¹ In de praktijk zullen de cavernes één voor één worden ververs en vindt de hele cyclus gedurende twee jaar plaats, aangenomen dat alle cavernes op hetzelfde moment ververs moeten worden

² Het # bewegingen wordt berekend volgens de volgende formule: (((# uitslagen] + [# inslagen]) x [volume-impact]) / [tankwagenvolume = 40 m³] x 2 (= heen en terug)

³ 15% is een 'best guess', afhankelijk van de timing van een crisis en daaraan gekoppeld de hoeveelheid overlap met verversing

Dit impliceert dat er gemiddeld jaarlijks 210.000 m³ gasolie uit de cavernes gehaald wordt (namelijk 5.250 tankwagens van 40 m³ leeg heen en vol terug, totaal dus 10.500 transportbewegingen) en eenzelfde hoeveelheid erin gebracht wordt (namelijk 5.250 tankwagens van 40 m³ vol heen en leeg terug, wederom totaal dus 10.500 transportbewegingen). Uitgaande van in totaal 750.000 m³ opgeslagen olie betekent dit dat iedere caverne elke 3,6 jaar volledig geleegd en gevuld wordt. Tijdens een oliecrisis kan het echter ook voorkomen dat in één jaar bijna alle olie uit de cavernes gehaald wordt (maximaal 27.500 vrachtwagenbewegingen, oftewel 550.000 m³ uitgereden olie).

Inmiddels is duidelijk dat het in het MER aangehouden aantal verversingen, crises en commerciële handelingen een overschatting is van de vermoedelijke daadwerkelijke situatie, o.a. vanwege het maximaal aantal in de milieuvergunning van de Argos-terminal in Hengelo vastgelegde olietransporten en door commercieel gebruik van de opgeslagen olie slim te plannen waardoor verversingen niet nodig zijn. In het door Argos opgestelde Vervoersplan Olieopslag in Cavernes in Twente, dat is opgesteld in nauw overleg met de gemeenten Hengelo en Enschede, is derhalve een realistischer inschatting gemaakt van de opslag. Daaruit blijkt dat er gemiddeld ca. 75.000 m³ olie per jaar uit de cavernes gehaald wordt (namelijk 1.875 tankwagens van 40 m³ leeg heen en vol terug, totaal 3.750 transportbewegingen) en er weer in wordt gestopt (namelijk 1.875 tankwagens van 40 m³ leeg heen en vol terug, totaal 3.750 transportbewegingen). Oftewel: elke caverne wordt gemiddeld eens in de 10 jaar volledig geleegd en gevuld. Alleen in geval van een oliecrisis wordt vrijwel alle olie (maximaal 550.000 m³) uit de cavernes gehaald en er vermoedelijk in het jaar erna weer ingebracht. Dit is als volgt te vertalen in een tabel met (mogelijke) in- en uitgaande stromen.

Jaar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Aantal transportbewegingen (x 1000)	25	12,5	0	0	12,5	12,5	0	0	12,5	12,5	0	0	12,5	12,5	0	0	12,5	12,5	0	0	12,5	12,5	0	0	12,5	12,5	0	0	12,5	25	
Hoeveelheid uitgaande olie (x 1000 m ³)	0	0	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	250	500	
Hoeveelheid ingaande olie (x 1000 m ³)	500	250	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	125	125	0	0	0	0	
Crisis in jaar 15: uitgaande olie (x 1000 m ³)															550																
Crisis in jaar 15: ingaande olie (x 1000 m ³)																550															

NB: Een crisis in jaar 15 zal ertoe leiden dat er in jaar 17 en 18 nauwelijks verversing nodig zal zijn. Dit is niet in deze tabel verwerkt.

Daarbij moet echter worden opgemerkt dat het op voorhand niet te voorspellen is wanneer de olie ververst moet worden, wanneer er olie voor commerciële doeleinden opgeslagen en weer uit de cavernes gehaald wordt en wanneer een eventuele oliecrisis zich zal voordoen. Dit schema is dus puur indicatief, maar geeft gemiddeld wel een idee van de in- en uitgaande stromen, van gemiddeld dus ongeveer 75.000 m³ per jaar elk.

Ik vertrouw er op u met deze informatie gediend te hebben.

Hoogachtend,

Projectmanager Olieopslag Twente

SOLUTION MINING RESEARCH INSTITUTE

105 Apple Valley Circle
Clarks Summit, PA 18411, USA

Telephone: +1
Fax: +1
www.solutionmining.org

**Technical
Conference
Paper**



**Solution Mining Characteristics of
U.S. Strategic Petroleum Reserve Oil Drawdown**

Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA

Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA

Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA

GRAM, Inc., Albuquerque, NM USA

SMRI Spring 2012 Technical Conference

23 - 24 April 2012

Regina, Saskatchewan, Canada

Solution Mining Research Institute Spring 2012 Technical Conference
Regina, Saskatchewan, Canada, 23 – 24 April 2012

SOLUTION MINING CHARACTERISTICS OF U.S. STRATEGIC PETROLEUM RESERVE OIL DRAWDOWN

and
Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA

David Rudeen
GRAM, Inc., Albuquerque, NM, USA

Abstract

The U.S. Strategic Petroleum Reserve (SPR) drew down about 30.6 MMB of its crude oil inventory in summer, 2011, as part of an International Energy Agency coordinated release to mitigate global crude oil supply disruptions. This activity provided a useful opportunity to evaluate the impacts of fresh water injection on salt cavern shapes, with particular focus on leaching during oil displacement, a condition that was never rigorously validated with the current SPR solution mining code SANSMIC. Sonar surveys of the affected caverns were compared for pre- and post-drawdown conditions and analyzed against raw water injection data and simulated with SANSMIC. Moreover, fluid density, temperature, and sound speed were measured with wireline during the drawdown and leach processes in order to observe fluid properties in the leach zones. The SANSMIC modeling for final cavern axisymmetric shape agreed very well with the post-drawdown sonar surveys. Some directional features such as salt falls and preferential leach were not predicted, as those are not addressed in the SANSMIC model. It appears that SANSMIC provides adequate predictions of cavern shape changes due to fresh water addition during crude oil drawdowns to inform decisions on cavern selection to maintain preferred cavern shapes. Follow-up sonar surveys were then useful for determining if and where preferential growth was observed so that the new cavern geometry baseline was established.

Key words: Cavern Dissolution Modeling, Caverns for Liquid Storage, Computer Modeling, Strategic Petroleum Reserves.

Introduction

During July and August, 2011, the U.S. Strategic Petroleum Reserve (SPR) sold approximately 30 million barrels (MMB) of its crude oil inventory as part of an International Energy Agency (IEA) coordinated release to mitigate global crude oil supply disruptions. This activity provided a useful opportunity to evaluate the impacts of fresh water injection on salt cavern shapes, with particular focus on leaching during oil displacement. This "drawdown" configuration was never rigorously validated with the current SPR solution mining code SANSMIC. The combination of operations data, wireline data, and sonar surveys collected during and after the drawdown provide a unique opportunity to test and potentially validate the SANSMIC model for this application. This report reviews key findings from the drawdown data and associated SANSMIC simulations.

Background

Prior SANSMIC Comparison with SPR Operations

SANSMIC was compared against measured cavern shapes for selected SPR caverns developed in the 1980's in Eyermann (1984). He found that SANSMIC simulated the general shape and volume of the caverns fairly well, provided the raw water flow data were correct. The code was found to over-predict the base radius by about 10% for a full leach simulation. It was also found to under-predict the cavern size in the upper 200 to 400 feet of the cavern, leading to possible leaching plans that do not have the right amount of oil added at a given stage to achieve a desired geometry. In the end, the code was determined useful for developing leach plans and monitoring of cavern development, but should be interpreted based on experience in leaching the specific salt deposit under study. Note that the Eyermann (1984) report did not investigate "drawdown" configurations with raw water pushing oil out the top of the cavern.

SPR Drawdown 2011 Operations Summary

The summer 2011 SPR drawdown was distributed among the four storage sites as shown in Table 1, with drawdown volumes given in millions of barrels (MMB). The analysis in this report will focus on the Big Hill and Bryan Mound drawdown activities where we have collected the most complete sets of sonar surveys and site operations data to compare with SANSMIC model simulations of the drawdown-leach.

Table 1. Distribution of 2011 SPR drawdown, by site.

SPR Storage Site	Oil Drawdown [MMB]
West Hackberry, LA	11.95
Bayou Choctaw, LA	0.00
Big Hill, TX	5.62
Bryan Mound, TX	13.23

An overview of the cavern-specific drawdown volumes at the Big Hill (BH) and Bryan Mound (BM) sites is given in Table 2. Generally speaking, the volume ratio of raw water injected to crude oil (RW/CO) produced ranged from 1.0 to 1.06, which is centered around the theoretical ideal of about 1.03 that would occur in an isothermal system at NaCl saturation. Uncertainties in measured fluid volumes combined with ongoing leaching and thermal transients likely produce the amount of scatter observed. One cavern, BM116, exhibited a RW/CO ratio of 0.92, but the authors believe that this was due to a measurement error in the volume of raw water injected.

Analyses of sonar volumes for the leach-drawdown intervals and associated leach efficiencies are given in Table 3. Author conversations with the sonar vendors that service SPR indicate that the uncertainty in the radial measurement is about 1 foot or 1%, whichever is greater. For a cylindrical cavern with 100 foot radius, this implies about a 2% uncertainty in volume. For this analysis, a nominal 2% volume uncertainty was applied for the drawdown interval.

Change in useable ullage is defined conceptually as the new cavern volume, created by leaching, that can be utilized for oil storage. For the caverns listed in Table 3, " Δ Useable Ullage" was calculated by comparing sonar survey volumes for the caverns before and after leaching, constrained to the depth interval defined at the upper end by the oil-brine interface (OBI) depth and at the lower end by a reference plane 10 feet above the end of the hanging string. Note that SPR requires that the OBI be maintained at least 10 feet above the end of the hanging string.

The leach efficiencies calculated for the subject caverns ranged from 0.11 to 0.22, which bracket an expected maximum efficiency of around 0.15. The authors believe that the 0.22 number for BM116 is erroneously high due to an understated raw water injection volume. When sonar uncertainty is taken into consideration, leach efficiencies for this scenario can vary around $\pm 4\text{-}5\%$.

Table 2. Summary of fluid movement volumes for Big Hill (BH) and Bryan Mound (BM) caverns utilized in the 2011 drawdown.

Cavern	Raw Water Injected [MMB]	Oil Produced [MMB]	RW/CO [-]
BH101	1.515	1.443	1.05
BH102	1.516	1.463	1.04
BH103	1.310	1.295	1.01
BH104	1.438	1.419	1.01
SITE TOTAL	5.779	5.620	
BM114	4.208	3.984	1.06
BM115	4.380	4.250	1.03
BM116	3.735	4.072	0.92
BM4	0.919	0.919	1.00
SITE TOTAL	13.241	13.227	

Table 3. Analysis of sonar volumes, leach efficiencies, and associated uncertainties from sonar.

Cavern	Drawdown Interval Sonar Volume			Δ Useable Ullage [MMB]	Leach Efficiency (Δ Ullage / RW inj) [-]	Uncertainty Leach Efficiency [-]
	Pre [MMB]	Post [MMB]	2% Uncertainty [MMB]			
BH101	1.372	1.628	0.030	0.256	0.17	0.04
BH102	1.457	1.628	0.031	0.171	0.11	0.04
BH103	1.243	1.405	0.026	0.162	0.12	0.04
BH104	1.458	1.650	0.031	0.193	0.13	0.04
BM114	4.274	4.860	0.091	0.586	0.14	0.04
BM115	4.128	4.768	0.089	0.640	0.15	0.04
BM116	4.029	4.839	0.089	0.810	0.22	0.05

Axisymmetric Cavern Profiles from Drawdown-Leach

Sonar surveys were obtained for pre-and post-leach cavern configurations for all of the caverns listed in Table 2 except BM4, where post-drawdown sonar data was not available. Axisymmetric profiles were built and overlaid for three Bryan Mound caverns as shown in Figure 1. The starting and final OBI depths are also shown. Radial growth due to leaching appears to be greatest near the injection point and tapers to zero at the final OBI depth. Given the buoyancy of fresh water relative to brine, it has been hypothesized within the SPR project that fresh water may rise to the OBI and concentrate local leaching

at that depth (Khalil and Webb 2006). The sonar surveys shown here do not support that hypothesis. Rather, the water appears to mix with the brine above the injection point before it leaches the salt walls.

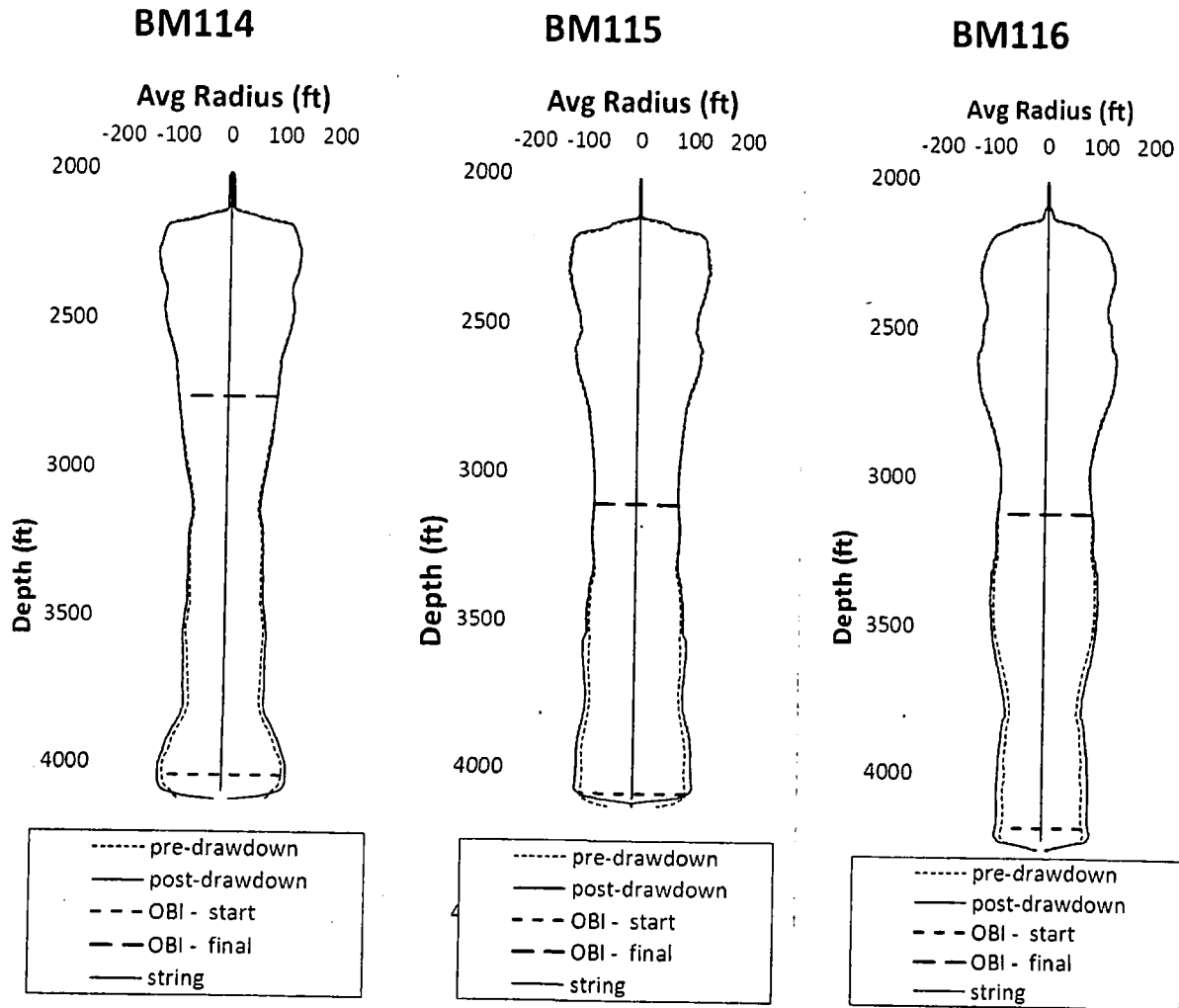


Figure 1. Axisymmetric cavern profiles for three Bryan Mound drawdown-leach caverns based on sonar surveys before and after leaching.

Axisymmetric profiles are shown for the four Big Hill caverns affected by the drawdown-leach in Figure 2. Similar to what was observed for the Bryan Mound caverns, radial growth due to leaching appears to be greatest near the injection point and tapers to zero at the final OBI depth. BH103 shows an anomalous shape to leached area relative to the other three caverns, but it also shows some degree of floor rise, which suggests a possible salt fall.

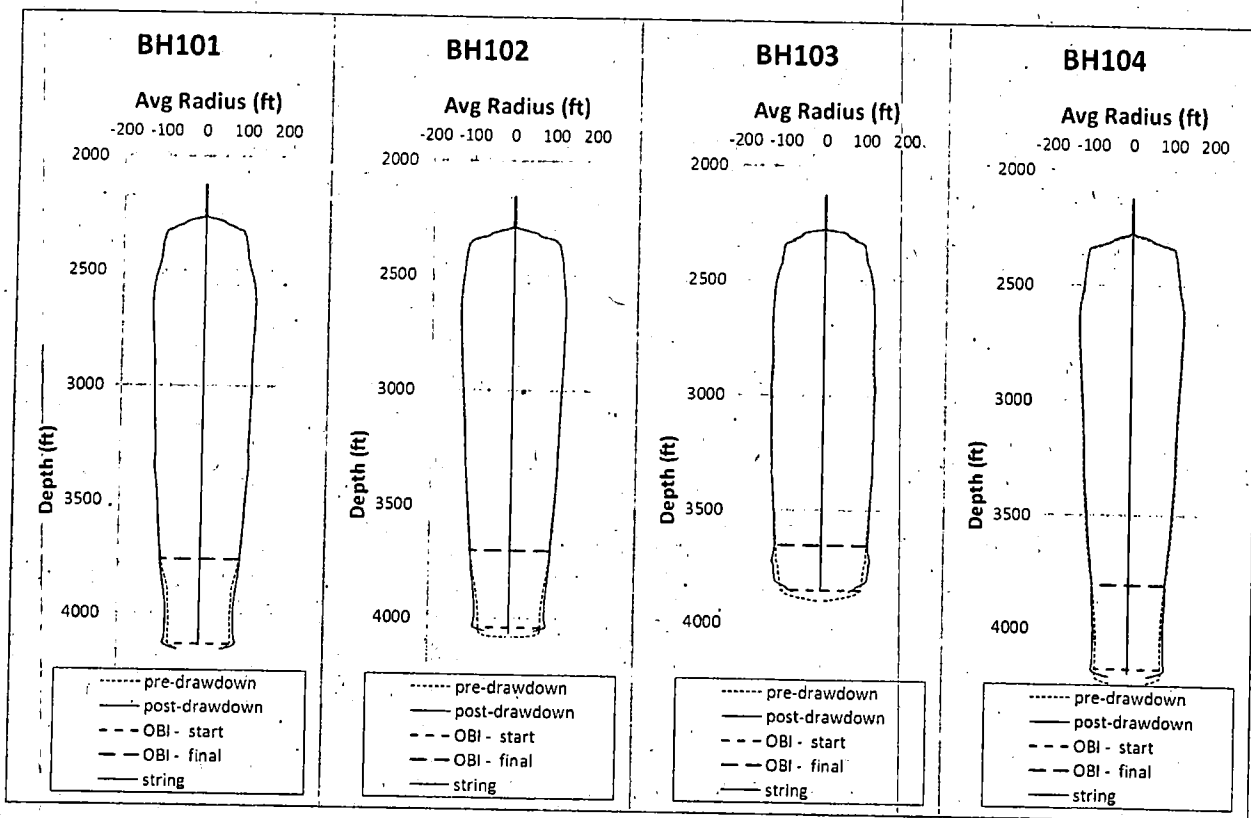


Figure 2. Axisymmetric cavern profiles for four Big Hill drawdown-leach caverns based on sonar surveys before and after leaching.

Wireline Density and Temperature Surveys

Selected caverns were tested with wireline for fluid temperature and density during and after raw water injection. The objective was to determine if there was any discernible in-cavern stratification of raw water and brine during the leaching process and whether this correlated with the depth zones where leaching was observed in the caverns. Wireline surveys for three Bryan Mound caverns are shown in Figure 3. The drawdown occurred from July 16 through September 3. The timing of surveys were mid- and several days-weeks after completion of raw water injection.

Six plots are shown in Figure 3, showing three Bryan Mound caverns, and two plots for each cavern. For cavern BM114, the fluid density logs during (07/25/2011) and at the end (09/01/2011) of raw water injection clearly show the oil density around 0.87 g/mL, and the brine near 1.2 g/mL, with no evidence of fresh water pooling at the top of the brine layer. Only one temperature log was available for BM114, and it showed a uniform 108°F in the brine at the end of injection, again with no evidence of newly-injected cool fluid pooled just below the oil-brine interface. For cavern BM115, a single fluid density log taken 11 days after completion of injection on 09/14/2012 shows oil sitting on top of brine, with no stratification in brine. Temperature logs taken for BM115 during and after raw water injection show the warmer 124°F oil sitting on top of the cooler 106°F brine, but again no evidence of stratification within the brine. BM116 shows an interesting feature in the density logs taken during (08/08/2011) and after (09/15/2011) water injection. While average oil density remains constant at around 0.85 g/mL, average brine density increases from about 1.1 to 1.2 g/mL from mid- to post-leach. While the brine density signal is noisy on 08/08/2011, the data do not suggest layering or preferential positioning of fresh water at the top. The temperature logs for BM116 also show uniform temperature within each fluid layer, except for a small layer of cool oil at the very top which is associated with site operations and a small oil fill right before the temperature survey.

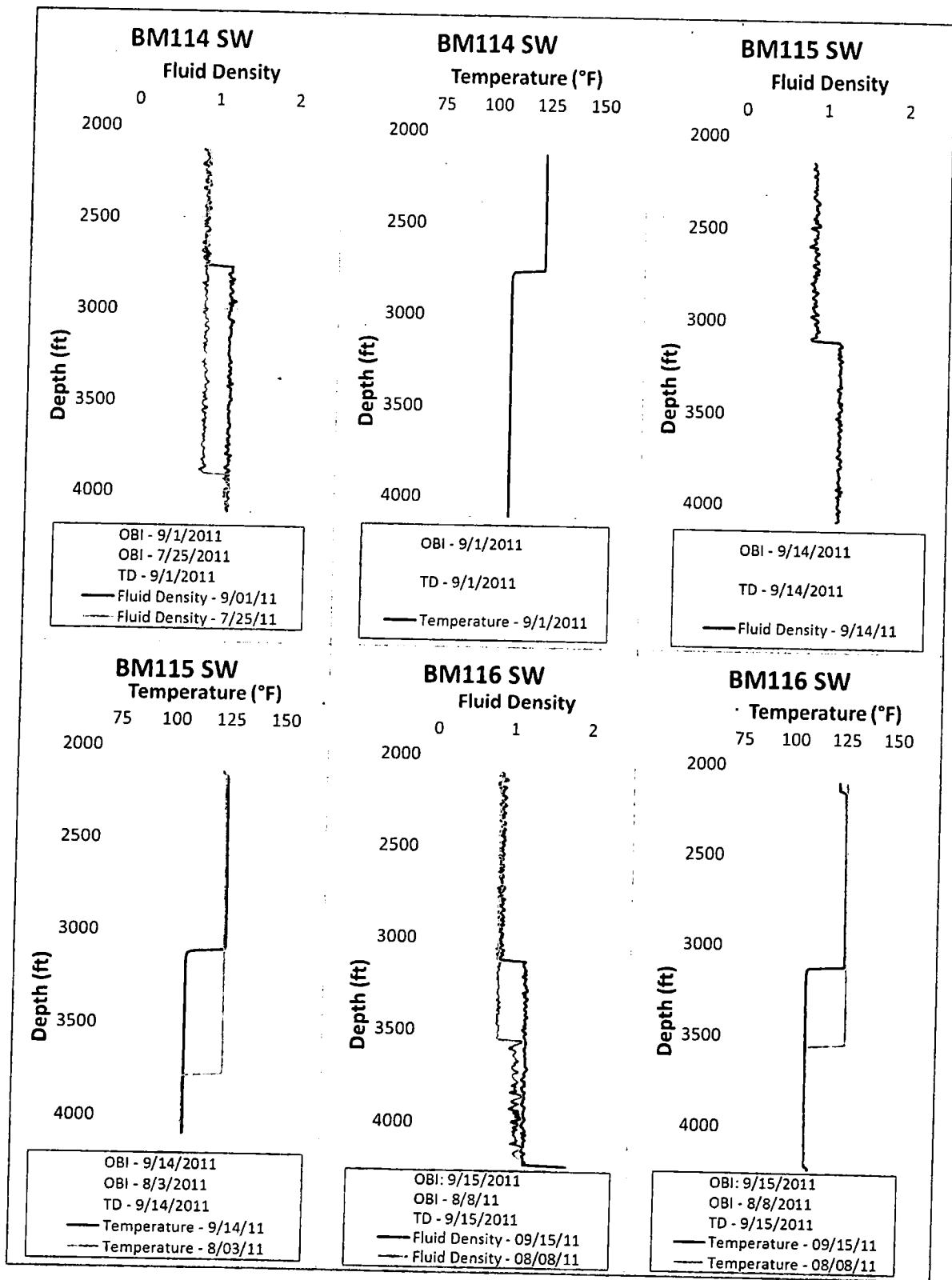


Figure 3. Wireline fluid temperature and density surveys taken during and after raw water injection for three Bryan Mound caverns utilized in the summer 2011 drawdown.

Leach Modeling with SANSMIC

The **SAN**dia **S**olution **M**ining **C**ode, SANSMIC (Russo 1981; Russo 1983), was utilized to simulate leaching in the drawdown caverns. SANSMIC was validated for the full cavern leach scenario (Eyermann 1984) and used successfully to support SPR cavern development in the 1980's and early 1990's, but it was never similarly validated for leaching in SPR caverns for oil withdrawal. The summer 2011 SPR drawdown provided a valuable opportunity to gather a broad and self-consistent data set for leaching analysis.

Modeling Assumptions

SANSMIC assumes an axisymmetric domain at a uniform, constant temperature. Starting cavern geometries were interpreted from the last sonar survey prior to the drawdown. The injection string position was taken from the last depth measured by wireline. Raw water injection histories were simplified to nominal rates over a seven-week injection period for Bryan Mound and three-week injection period for Big Hill. Insolubles content was set to 4% for all caverns, and solutioning properties were homogeneous with depth and radius. All of the SPR caverns simulated here have multiple wells in the field, and were simplified to a single well along the cavern axis in the simulations.

Modeling Results

SANSMIC model output data are expressed as axisymmetric cavern profiles overlaid with sonar survey data. The timing of the SANSMIC output was chosen to correspond with the time at which the sonar surveys were run. Hence, for a sonar survey run 5 days after completion of raw water injection, the corresponding SANSMIC output are given for 5 days after completion of simulated water injection. It is understood that the Bryan Mound caverns were not completely saturated when the sonar surveys were taken, but the degree of leaching was such that 90% or more of the ultimate salt volume was already leached, and the surveys would provide a reasonable estimate of the new baseline geometry, and likely within the resolution of the sonar surveys.

Bryan Mound Data-Model Comparisons

Three Bryan Mound caverns BM114, 115, and 116 were simulated with SANSMIC and compared with axisymmetric representations of sonar survey data. BM114 is shown in Figure 4, with initial input profile, SANSMIC output, and post-leach sonar survey overlaid in Figure 4(a). The SANSMIC results compare very well with the post-leach axisymmetric sonar survey data, agreeing to within 2 feet or less over the entire leach interval. Figure 4(b) and (c) show isometric views of the pre- and post-leach sonar surveys. No leaching anomalies such as salt falls or preferential leaching direction are evident from these figures.

BM115 is shown in Figure 5. Generally favorable agreement between model and measured is seen in the axisymmetric overlay in Figure 5(a), though an anomaly at about 3600 feet depth warrants a closer look. Comparing the isometric views in pre-leach Figure 5 (b) and post-leach Figure 5 (c) reveals an anomalous feature that projects to the north that was apparently created sometime between the sonar images taken in 2004 and 2011.

BM116 is shown in Figure 6. SANSMIC output again compares well with the axisymmetric profiles. A zoom of the leach region is shown on the right. Maximum radial growth was about 10 feet at the bottom of the cavern, and SANSMIC generally agreed within 1-2 feet over the leach interval, with an isolated deviation of about 4 feet.

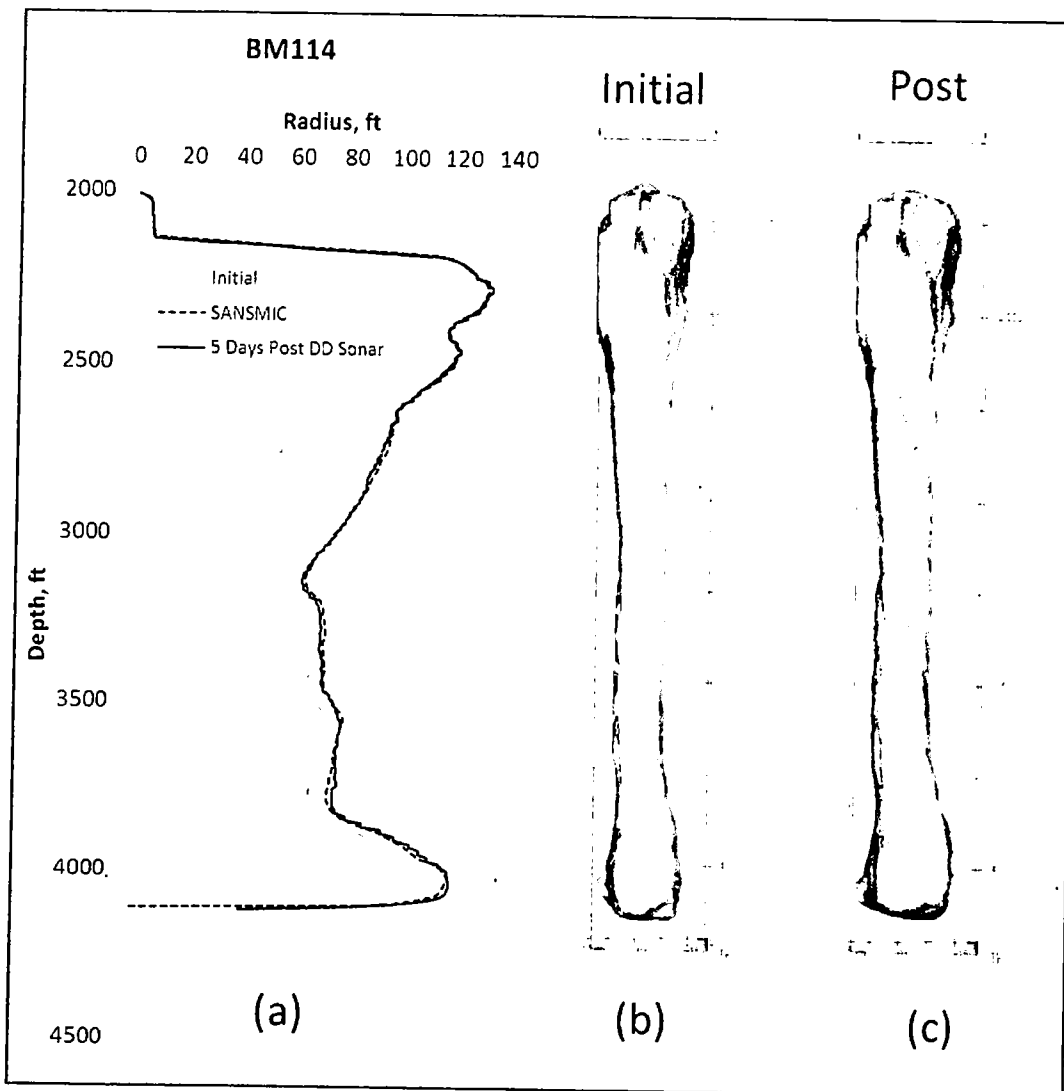


Figure 4. Comparison of BM114 initial and post-leach sonar surveys: (a) Axisymmetric representation (magnified radial axis) of cavern profiles with SANSMIC model overlay, (b) Isometric view of initial sonar survey, and (c) Isometric view of post-leach sonar survey.

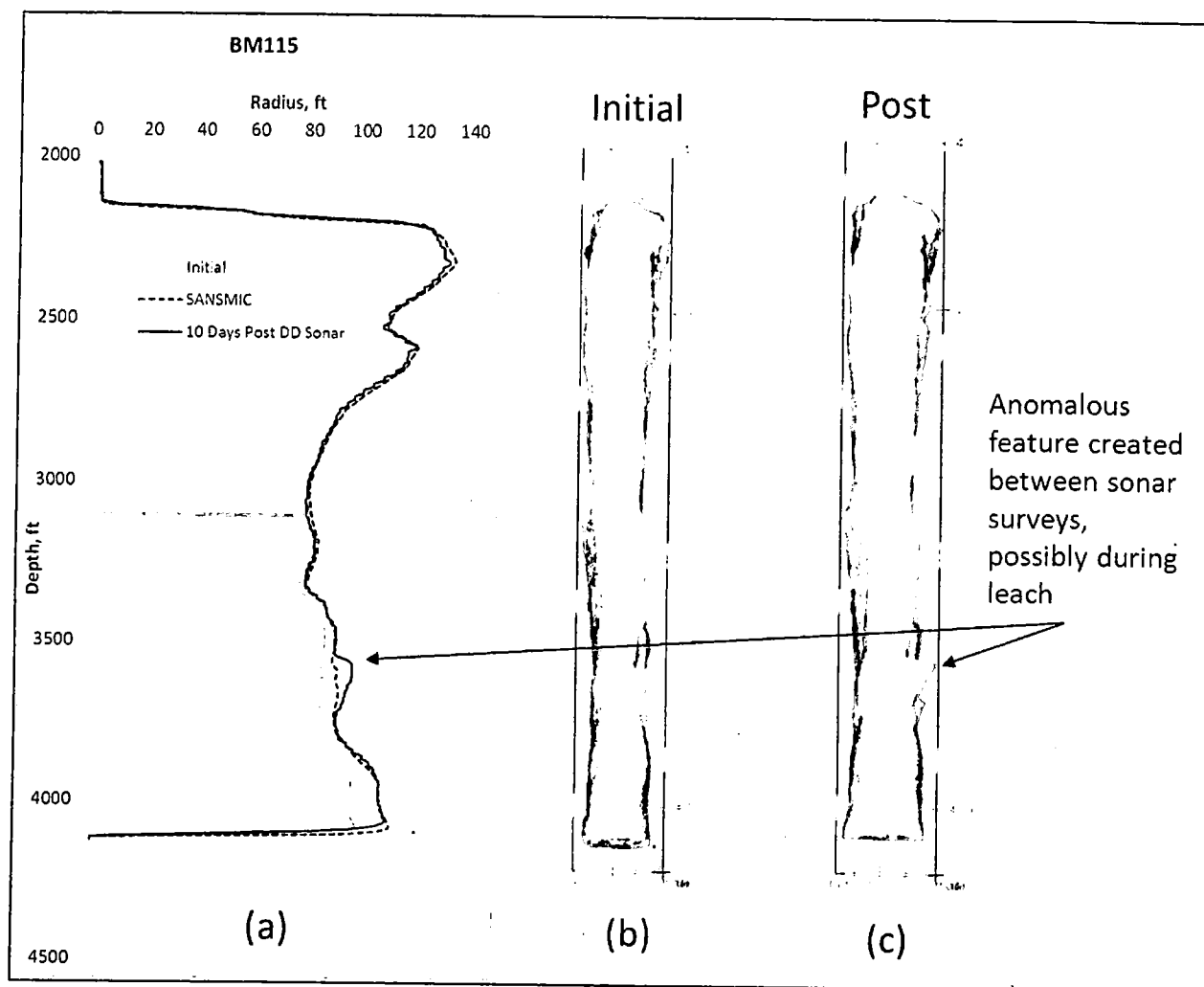


Figure 5. Comparison of BM115 initial and post-Leach sonar surveys: (a) Axisymmetric representation of profiles (magnified radial axis) with SANSMIC model overlay, (b) Isometric view of initial sonar survey, and (c) Isometric view of post-leach sonar survey showing anomalous feature at 3600 feet.

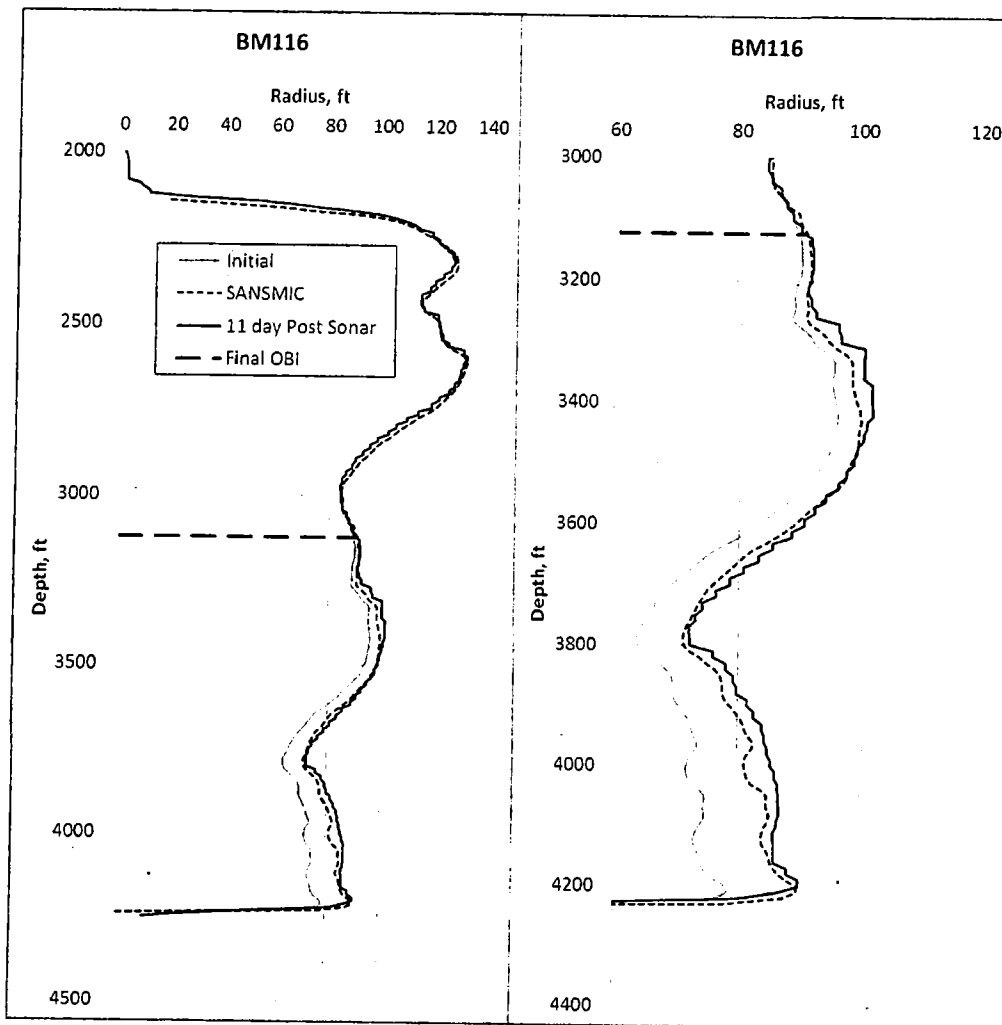


Figure 6. Overlay of BM116 axisymmetric profiles at expanded radial axis (left) and zoom of leach zone (right).

Big Hill Data-Model Comparisons

Two Big Hill caverns, BH101 and 104, were simulated with SANSMIC. Axisymmetric overlays of the model and sonar survey results are shown in Figure 7. The maximum radial growth was about 5-10 feet at the raw water injection point near the bottom of the cavern, and SANSMIC captured this value within several feet. The general shape, with greatest radial growth at the injection point, tapering to the final OBI, was also captured well.

Modeled Leach Efficiencies

Modeled leach efficiencies were computed using SANSMIC-calculated post-leach cavern volumes. Results are compared to measured leach efficiencies in Table 4. SANSMIC-calculated leach volumes, and hence SANSMIC leach efficiencies, were generally lower than the sonar-measured. In the case of BM116, the authors believe that the measured raw water injection volume was erroneously low, driving the measured leach efficiency erroneously high. Among the four other caverns where comparisons were drawn, three simulated efficiencies were lower and one was higher. If we recall that the sonar-related volume uncertainties lead to about $\pm 4\%$ uncertainty in measured leach efficiency (Table 3), the SANSMIC simulations perform within the accuracy of the sonar surveys.

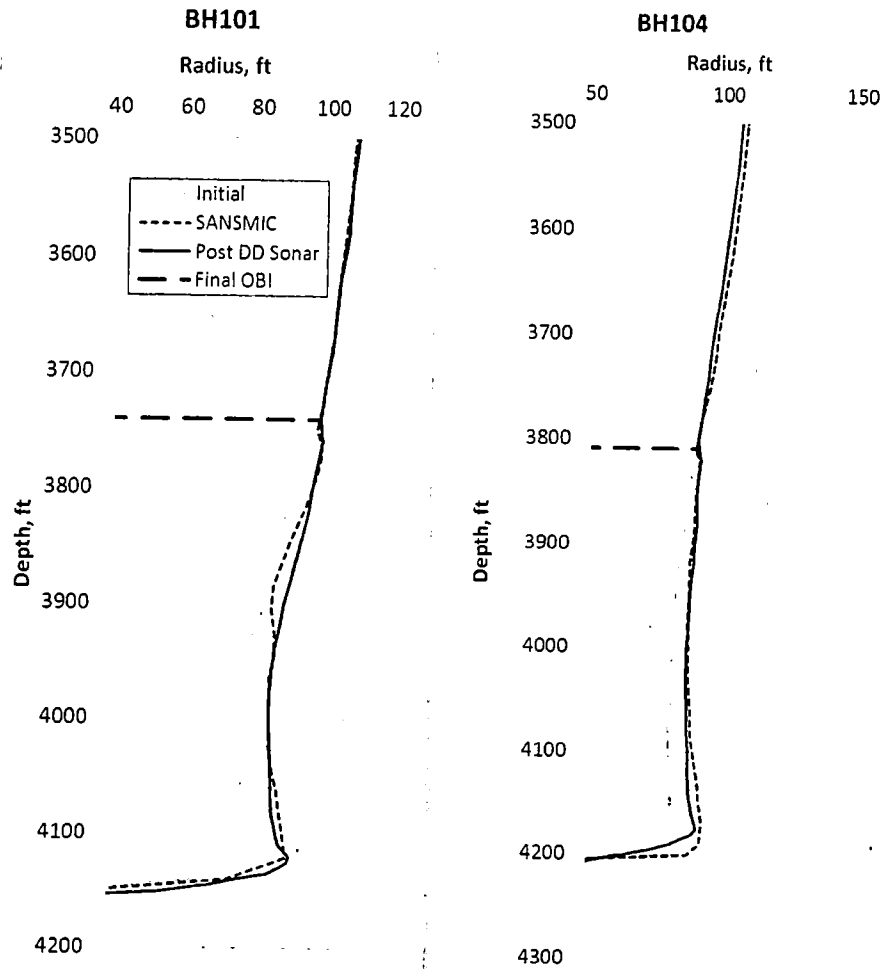


Figure 7. Axisymmetric overlays of SANSMIC results for BH101 (left) and BH104 (Right) drawdown-leach caverns. Images represent zoom of leach region.

Table 4. Comparison of measured and SANSMIC-modeled leach efficiencies.

Cavern	Raw Water Injected [MMB]	Sonar Δ Useable Ullage [MMB]	SANSMIC Δ Useable Ullage [MMB]	Measured Leach Efficiency [-]	SANSMIC Leach Efficiency [-]
BH101	1.515	0.256	0.211	0.17	0.14
BH104	1.438	0.193	0.221	0.13	0.15
BM114	4.208	0.586	0.559	0.14	0.13
BM115	4.380	0.640	0.589	0.15	0.13
BM116	3.735	0.810	0.626	0.22	0.17

Summary

SANSMIC was used to simulate leaching associated with crude oil drawdown at the SPR for selected caverns at the Big Hill and Bryan Mound sites. This is a moving boundary problem where the oil-brine interface climbs with raw water injection, and the leach interval grows in vertical extent with each time step. This is a unique opportunity on the SPR project to compare measured and modeled drawdown-leach for multiple caverns with a self-consistent set of pre-, during-, and post drawdown survey data.

Sonar and wireline surveys indicated that the raw water mixed completely with the brine during injection and affected leaching in a manner that was generally correlated to wall exposure time to a well-mixed unsaturated brine. Hence, radial expansion was greatest at the raw water injection point, and tapered to zero at the final oil-brine interface.

Simulated leach volumes and geometries compared well with images constructed from sonar surveys. Volume and radii generally agreed within the resolution of the sonar surveys. Some anomalous, non-axisymmetric structures were identified, indicating some level of localized preferential leach or possible salt falls. SANSMIC is not capable of predicting these features.

All caverns simulated in this exercise had similar starting geometry: nearly cylindrical with about 80-100 foot radius over the leaching zone, full of oil, and with raw water injection rates from 50-100 MBD. SANSMIC appeared to simulate these conditions fairly well. There are many possible operations scenarios that fall outside this parameter space, and the authors caution against setting performance expectations for SANSMIC in areas where it has not been tested. For example, many SPR caverns have much larger than 100 foot radius, along with lobe structures and non-cylindrical geometry. The complete raw water-brine mixing that appears to control the current leaching may not apply for the non-cylindrical geometry. Also, situations with low raw water injection rates (<25 MBD) or hanging strings broken many hundreds of feet above the cavern bottom, have not been tested.

Acknowledgements

Sandia National Laboratories is a multi-program laboratory managed and operated by Sandia Corporation, a wholly owned subsidiary of Lockheed Martin Corporation, for the U.S. Department of Energy's National Nuclear Security Administration under contract DE-AC04-94AL85000.

References

- Eyermann, T. J. 1984. Comparison of SANSMIC Simulation Results with Cavern Shapes on the SPR Project. Solution Mining Research Institute, Woodstock, Illinois.
- Khalil, I. and S. W. Webb. 2006. Numerical Simulations of Lab-Scale Brine-Water Mixing Experiments. SAND2006-5418, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Russo, A. J. 1981. A Solution Mining Code for Studying Axisymmetric Salt Cavern Formation. SAND81-1231, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Russo, A. J. 1983. A User's Manual for the Salt Solution Mining Code, SANSMIC. SAND83-1150, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

Van:
Verzonden: vrijdag 5 april 2013 17:02 @akzonobel.com>
Aan:
CC:

Onderwerp: RE: Uitlogen van met olie verzadigd zout

Beste

Jullie voorkeur komt overeen met wat ik al had geconcludeerd uit ons telefoongesprek. Op dit punt lopen bij ons dan ook al de volgende acties:

- Ik heb gevraagd te zoeken naar een van onze eigen Hengelose cavernes waarin middels sonarmetingen is aangetoond dat het optrekken van een oliedek, dat lange tijd op hetzelfde niveau heeft gestaan, gevolgd wordt door onverstoorde wegloging van het oorspronkelijke dak;
- Ik zal zelf kijken wat het naar voren halen van het vlaklogen van het dak van caveerne 472 zou betekenen voor de (complexe) olielogistiek. 2000 m³ olie zijn toch 50 vrachtwagens en is een kostbare hoeveelheid om, buiten het onslancontract met Arco om, in een caveerne te brengen. We zullen dus bekijken of dit binnen het

Met vriendelijke groet

From: (odM) [minez.nl]
Sent: vrijdag 5 april 2013 16:08
To:)
Cc: SODM); (SODM);
Subject: RE: Uitlogen van met olie verzadigd zout

Na intern beraad zijn we tot de conclusie gekomen dat

Een alternatief is dat

Daarom aan jullie het verzoek om hier op korte termijn (begin volgende week?) nog een keer naar te kijken.

Tenslotte:

en

Met vriendelijke groet / Kind regards,

Geo-Engineering

.....
Staatstoezicht op de Mijnen / State Supervision of Mines
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie / Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation
Henri Faasdreef 312 | 2492 JP | Den Haag / The Hague
Postbus / P.O. Box 24037 | 2490 AA | Den Haag
.....

T + 31

M + 31

F + 31

@minez.nl

<http://www.sodm.nl>

.....
Van: [\[mailto:@akzonobel.com\]](mailto:@akzonobel.com)
Verzonden: vrijdag 5 april 2013 9:07
Aan:
Onderwerp: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

Dag

Ik ben de hele dag, m.u.v. de tijd tussen 2 en 4, telefonisch bereikbaar. Aangezien jij vermoedelijk een vollere agenda hebt, laat ik de keuze voor de tijd even aan jou.
Gr..

From: SodM) @minez.nl
Sent: donderdag 4 april 2013 18:12
To:
Subject: Re: Uitloggen van met olie verzadigd zout

Het was een drukke dag. Ik probeer morgen te bellen.

Verstuurd vanaf mijn iPad

Op 4 apr. 2013 om 11:25 heeft ' geschreven:

" < @akzonobel.com > het volgende

Dag

Ik begrijp jullie zorgen omtrent het uitloggen van het dak na langdurige blootstelling aan olie. Inderdaad is er geen enkel artikel dat volledig dit aspect dekt, maar we kunnen denk ik wel concluderen dat er inderdaad een "shared understanding" is dat uitloggen van met olie verzadigde pekels mogelijk is.

Ik kwam bijgevoegd, zeer recent, artikel uit de VS ook nog tegen. In 2011 is daar de strategische olievoorraad aangesproken en zijn, voor het eerst sinds de aanleg van de opslagcavernes in de jaren '80 en '90, de cavernes met zoet water uitgedrukt t.b.v. de levering van zo'n 5 mln m³ olie. De sonarmetingen na afloop van de olieonttrekking zijn vergeleken met die van voor de onttrekking en tonen aan dat de met SANSMIC (paper van Reda en Russo) voorspelde cavernegroei goed overeenkomt met de praktijk. Wel wordt

opgemerkt dat de cavernegroei m.n. onderin plaatsvindt en het zoete water minder bovenop de pekkel gaat drijven dan verwacht.

Hoewel dit denk ik het bewijs levert dat zout, ook na langdurige (20-30 jaar) blootstelling aan olie, nog altijd geloofd kan worden, moet ik ook wijzen op het verschil met onze werkwijze: wij gaan nooit uitdrukken met water maar doen dit altijd met pekkel. Pas als alle, of in ieder geval zo veel mogelijk, olie middels de normale wijze uit de caveerne onttrokken is, gaan wij weer logen (indien nodig). Waar de in dit artikel beschreven uitloging dus het gevolg is van het inpompen van water om er zo snel mogelijk olie uit te krijgen, waarbij het olie-niveau continu omhoogschuift, zal ons uitloogprogramma gericht zijn op het gecontroleerd wegloggen van de dakpockets bij een min of meer constant olie-niveau. Daarbij hebben wij maar liefst 5 extra controlemechanismen vergeleken met het uitdrukken van de olie in het genoemde artikel:

- we kunnen daarvoor alle beschikbare putten gebruiken, terwijl in de beschreven opslagcavernes maar één put (met binnen- en buitenbuis) in gebruik was;
- we kunnen de diepte van de verbuizing aanpassen, terwijl in de beschreven opslagcavernes de diepte vast is;
- we kunnen de stroomrichting aanpassen, terwijl in de beschreven opslagcavernes de stroomrichting vast staat;
- we kunnen het debiet aanpassen, terwijl in de beschreven opslagcavernes het debiet vast staat (t.b.v. de olielevering);
- we kunnen het olieblanket aanpassen en zowel het niveau dieper als ondieper leggen, terwijl in de beschreven opslagcavernes het niveau continu naar boven toe schuift.

Hoe we die technieken mechanisch gebruiken is gedetailleerd beschreven in Bijlage 18a-b van het Opslagplan (Leaching Recommendations for conversion of Akzo salt production caverns into oil storage caverns in the Clovis project).

Ik heb : van DEEP gevraagd om inderdaad de gevraagde notitie op te stellen op basis van de verschillende artikelen, ervaringen in Duitsland en andere bruikbare, ondersteunende argumenten.

Prima om vanmiddag nog even te bellen om e.e.a. verder af te stemmen
Groeten,

From: . de (SodM) [[@minez.nl](mailto:mailto:)]
Sent: woensdag 3 april 2013 16:29
To: ; (SODM); (SODM);

Cc:

Subject: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

In heb de aangeleverde artikelen inmiddels gelezen. Mijn commentaar heb ik hieronder ingevoegd. Mijn conclusie is dat

Het eerder opgestuurde US paper van

Het blijft daarbij natuurlijk de vraag in hoeverre deze laboratoriumexperimenten naar de veldsituatie kunnen worden opgeschaald (van het oplossen van een kleinschalige cilindervormige zoutwand naar het oplossen van richtels in een groot cavernedak).

Wel lijken

Een soort "shared understanding". Maar dat wordt vervolgens niet aangetoond (althans niet met deze papers). Zullen we morgenmiddag even bellen? Misschien dat we vrijdag met moeten praten. Een formele notitie van de hand van DEEP met aanvullende informatie,

SOLUTION MINING RESEARCH INSTITUTE

105 Apple Valley Circle
Clarks Summit, PA 18411, USA

Telephone: +1
Fax: +1
www.solutionmining.org

**Technical
Conference
Paper**



Solution Mining Characteristics of U.S. Strategic Petroleum Reserve Oil Drawdown

Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA

Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA

- Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA

GRAM, Inc., Albuquerque, NM USA

SMRI Spring 2012 Technical Conference

23 - 24 April 2012

Regina, Saskatchewan, Canada

Solution Mining Research Institute Spring 2012 Technical Conference
Regina, Saskatchewan, Canada, 23 – 24 April 2012

SOLUTION MINING CHARACTERISTICS OF U.S. STRATEGIC PETROLEUM RESERVE OIL DRAWDOWN

and
Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA

David Rudeen
GRAM, Inc., Albuquerque, NM, USA

Abstract

The U.S. Strategic Petroleum Reserve (SPR) drew down about 30.6 MMB of its crude oil inventory in summer, 2011, as part of an International Energy Agency coordinated release to mitigate global crude oil supply disruptions. This activity provided a useful opportunity to evaluate the impacts of fresh water injection on salt cavern shapes, with particular focus on leaching during oil displacement, a condition that was never rigorously validated with the current SPR solution mining code SANSMIC. Sonar surveys of the affected caverns were compared for pre- and post-drawdown conditions and analyzed against raw water injection data and simulated with SANSMIC. Moreover, fluid density, temperature, and sound speed were measured with wireline during the drawdown and leach processes in order to observe fluid properties in the leach zones. The SANSMIC modeling for final cavern axisymmetric shape agreed very well with the post-drawdown sonar surveys. Some directional features such as salt falls and preferential leach were not predicted, as those are not addressed in the SANSMIC model. It appears that SANSMIC provides adequate predictions of cavern shape changes due to fresh water addition during crude oil drawdowns to inform decisions on cavern selection to maintain preferred cavern shapes. Follow-up sonar surveys were then useful for determining if and where preferential growth was observed so that the new cavern geometry baseline was established.

Key words: Cavern Dissolution Modeling, Caverns for Liquid Storage, Computer Modeling, Strategic Petroleum Reserves.

Introduction

During July and August, 2011, the U.S. Strategic Petroleum Reserve (SPR) sold approximately 30 million barrels (MMB) of its crude oil inventory as part of an International Energy Agency (IEA) coordinated release to mitigate global crude oil supply disruptions. This activity provided a useful opportunity to evaluate the impacts of fresh water injection on salt cavern shapes, with particular focus on leaching during oil displacement. This "drawdown" configuration was never rigorously validated with the current SPR solution mining code SANSMIC. The combination of operations data, wireline data, and sonar surveys collected during and after the drawdown provide a unique opportunity to test and potentially validate the SANSMIC model for this application. This report reviews key findings from the drawdown data and associated SANSMIC simulations.

Background

Prior SANSMIC Comparison with SPR Operations

SANSMIC was compared against measured cavern shapes for selected SPR caverns developed in the 1980's in Eyermann (1984). He found that SANSMIC simulated the general shape and volume of the caverns fairly well, provided the raw water flow data were correct. The code was found to over-predict the base radius by about 10% for a full leach simulation. It was also found to under-predict the cavern size in the upper 200 to 400 feet of the cavern, leading to possible leaching plans that do not have the right amount of oil added at a given stage to achieve a desired geometry. In the end, the code was determined useful for developing leach plans and monitoring of cavern development, but should be interpreted based on experience in leaching the specific salt deposit under study. Note that the Eyermann (1984) report did not investigate "drawdown" configurations with raw water pushing oil out the top of the cavern.

SPR Drawdown 2011 Operations Summary

The summer 2011 SPR drawdown was distributed among the four storage sites as shown in Table 1, with drawdown volumes given in millions of barrels (MMB). The analysis in this report will focus on the Big Hill and Bryan Mound drawdown activities where we have collected the most complete sets of sonar surveys and site operations data to compare with SANSMIC model simulations of the drawdown-leach.

Table 1. Distribution of 2011 SPR drawdown, by site.

SPR Storage Site	Oil Drawdown [MMB]
West Hackberry, LA	11.95
Bayou Choctaw, LA	0.00
Big Hill, TX	5.62
Bryan Mound, TX	13.23

An overview of the cavern-specific drawdown volumes at the Big Hill (BH) and Bryan Mound (BM) sites is given in Table 2. Generally speaking, the volume ratio of raw water injected to crude oil (RW/CO) produced ranged from 1.0 to 1.06, which is centered around the theoretical ideal of about 1.03 that would occur in an isothermal system at NaCl saturation. Uncertainties in measured fluid volumes combined with ongoing leaching and thermal transients likely produce the amount of scatter observed. One cavern, BM116, exhibited a RW/CO ratio of 0.92, but the authors believe that this was due to a measurement error in the volume of raw water injected.

Analyses of sonar volumes for the leach-drawdown intervals and associated leach efficiencies are given in Table 3. Author conversations with the sonar vendors that service SPR indicate that the uncertainty in the radial measurement is about 1 foot or 1%, whichever is greater. For a cylindrical cavern with 100 foot radius, this implies about a 2% uncertainty in volume. For this analysis, a nominal 2% volume uncertainty was applied for the drawdown interval.

Change in useable ullage is defined conceptually as the new cavern volume, created by leaching, that can be utilized for oil storage. For the caverns listed in Table 3, "Δ Useable Ullage" was calculated by comparing sonar survey volumes for the caverns before and after leaching, constrained to the depth interval defined at the upper end by the oil-brine interface (OBI) depth and at the lower end by a reference plane 10 feet above the end of the hanging string. Note that SPR requires that the OBI be maintained at least 10 feet above the end of the hanging string.

The leach efficiencies calculated for the subject caverns ranged from 0.11 to 0.22, which bracket an expected maximum efficiency of around 0.15. The authors believe that the 0.22 number for BM116 is erroneously high due to an understated raw water injection volume. When sonar uncertainty is taken into consideration, leach efficiencies for this scenario can vary around $\pm 4-5\%$.

Table 2. Summary of fluid movement volumes for Big Hill (BH) and Bryan Mound (BM) caverns utilized in the 2011 drawdown:

Cavern	Raw Water Injected [MMB]	Oil Produced [MMB]	RW/CO [-]
BH101	1.515	1.443	1.05
BH102	1.516	1.463	1.04
BH103	1.310	1.295	1.01
BH104	1.438	1.419	1.01
SITE TOTAL	5.779	5.620	
BM114	4.208	3.984	1.06
BM115	4.380	4.250	1.03
BM116	3.735	4.072	0.92
BM4	0.919	0.919	1.00
SITE TOTAL	13.241	13.227	

Table 3. Analysis of sonar volumes, leach efficiencies, and associated uncertainties from sonar.

Cavern	Drawdown Interval Sonar Volume			Δ Useable Ullage [MMB]	Leach Efficiency (Δ Ullage / RW inj) [-]	Uncertainty Leach Efficiency [-]
	Pre [MMB]	Post [MMB]	2% Uncertainty [MMB]			
BH101	1.372	1.628	0.030	0.256	0.17	0.04
BH102	1.457	1.628	0.031	0.171	0.11	0.04
BH103	1.243	1.405	0.026	0.162	0.12	0.04
BH104	1.458	1.650	0.031	0.193	0.13	0.04
BM114	4.274	4.860	0.091	0.586	0.14	0.04
BM115	4.128	4.768	0.089	0.640	0.15	0.04
BM116	4.029	4.839	0.089	0.810	0.22	0.05

Axisymmetric Cavern Profiles from Drawdown-Leach

Sonar surveys were obtained for pre-and post-leach cavern configurations for all of the caverns listed in Table 2 except BM4, where post-drawdown sonar data was not available. Axisymmetric profiles were built and overlaid for three Bryan Mound caverns as shown in Figure 1. The starting and final OBI depths are also shown. Radial growth due to leaching appears to be greatest near the injection point and tapers to zero at the final OBI depth. Given the buoyancy of fresh water relative to brine, it has been hypothesized within the SPR project that fresh water may rise to the OBI and concentrate local leaching

at that depth (Khalil and Webb 2006). The sonar surveys shown here do not support that hypothesis. Rather, the water appears to mix with the brine above the injection point before it leaches the salt walls.

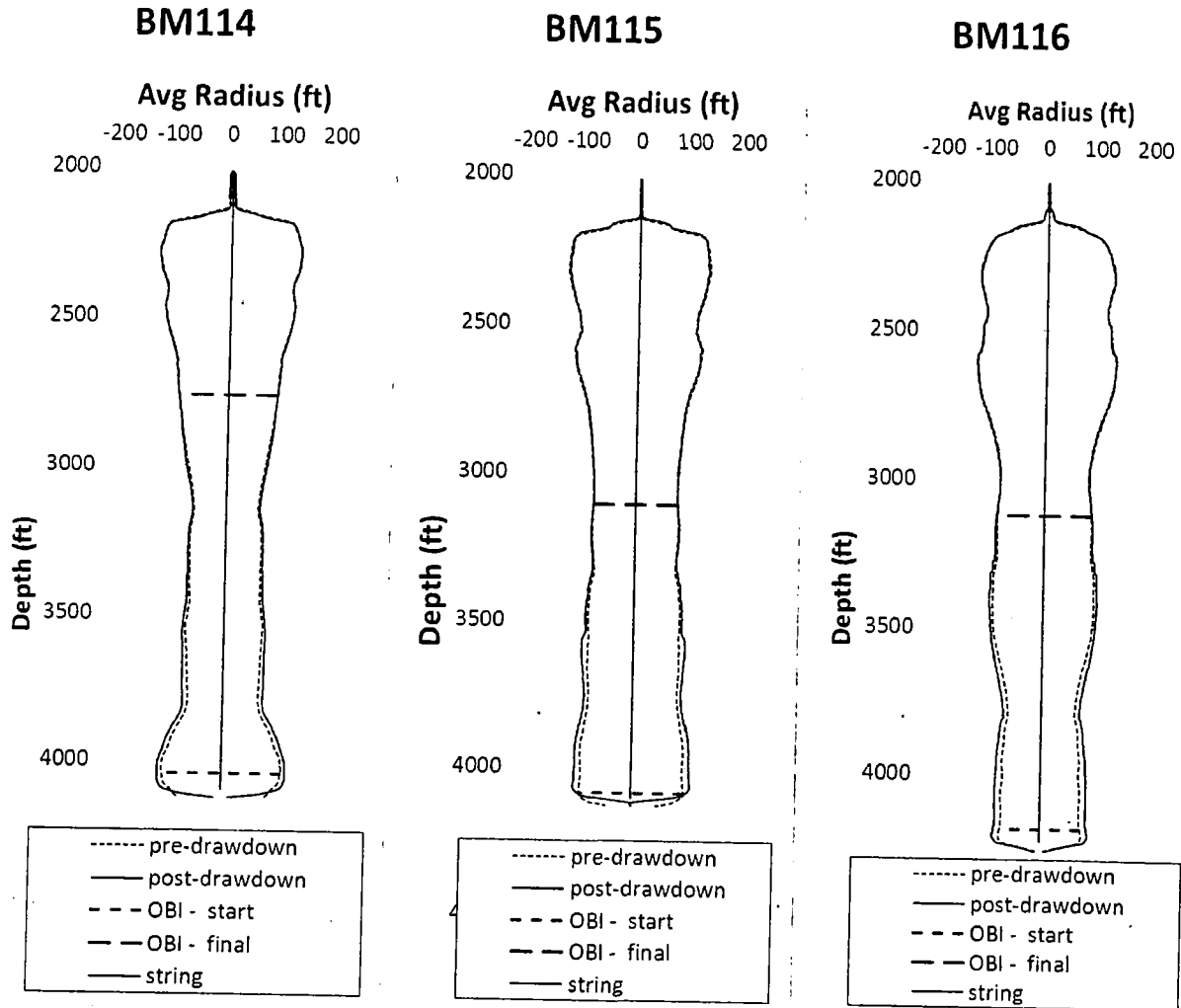


Figure 1. Axisymmetric cavern profiles for three Bryan Mound drawdown-leach caverns based on sonar surveys before and after leaching.

Axisymmetric profiles are shown for the four Big Hill caverns affected by the drawdown-leach in Figure 2. Similar to what was observed for the Bryan Mound caverns, radial growth due to leaching appears to be greatest near the injection point and tapers to zero at the final OBI depth. BH103 shows an anomalous shape to leached area relative to the other three caverns, but it also shows some degree of floor rise, which suggests a possible salt fall.

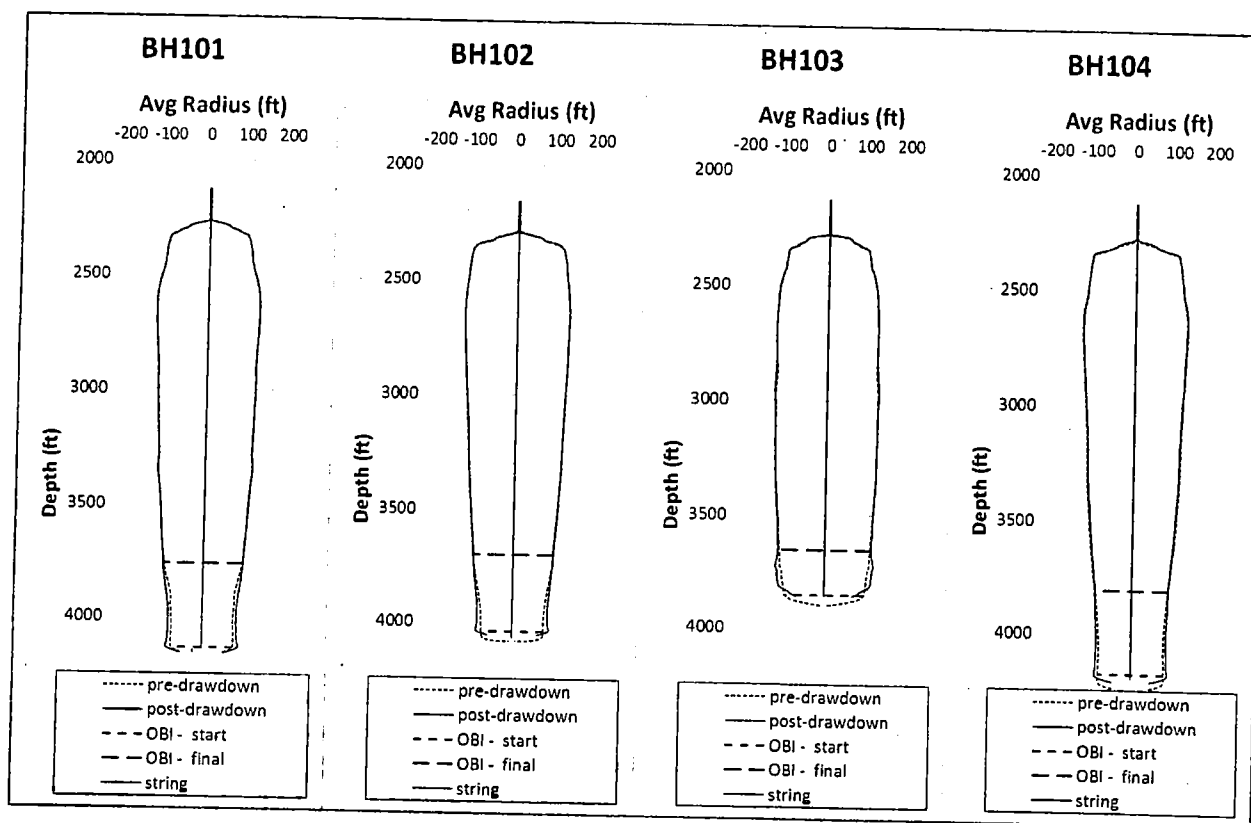


Figure 2. Axisymmetric cavern profiles for four Big Hill drawdown-leach caverns based on sonar surveys before and after leaching.

Wireline Density and Temperature Surveys

Selected caverns were tested with wireline for fluid temperature and density during and after raw water injection. The objective was to determine if there was any discernible in-cavern stratification of raw water and brine during the leaching process and whether this correlated with the depth zones where leaching was observed in the caverns. Wireline surveys for three Bryan Mound caverns are shown in Figure 3. The drawdown occurred from July 16 through September 3. The timing of surveys were mid- and several days-weeks after completion of raw water injection.

Six plots are shown in Figure 3, showing three Bryan Mound caverns, and two plots for each cavern. For cavern BM114, the fluid density logs during (07/25/2011) and at the end (09/01/2011) of raw water injection clearly show the oil density around 0.87 g/mL, and the brine near 1.2 g/mL, with no evidence of fresh water pooling at the top of the brine layer. Only one temperature log was available for BM114, and it showed a uniform 108°F in the brine at the end of injection, again with no evidence of newly-injected cool fluid pooled just below the oil-brine interface. For cavern BM115, a single fluid density log taken 11 days after completion of injection on 09/14/2012 shows oil sitting on top of brine, with no stratification in brine. Temperature logs taken for BM115 during and after raw water injection show the warmer 124°F oil sitting on top of the cooler 106°F brine, but again no evidence of stratification within the brine. BM116 shows an interesting feature in the density logs taken during (08/08/2011) and after (09/15/2011) water injection. While average oil density remains constant at around 0.85 g/mL, average brine density increases from about 1.1 to 1.2 g/mL from mid- to post-leach. While the brine density signal is noisy on 08/08/2011, the data do not suggest layering or preferential positioning of fresh water at the top. The temperature logs for BM116 also show uniform temperature within each fluid layer, except for a small layer of cool oil at the very top which is associated with site operations and a small oil fill right before the temperature survey.

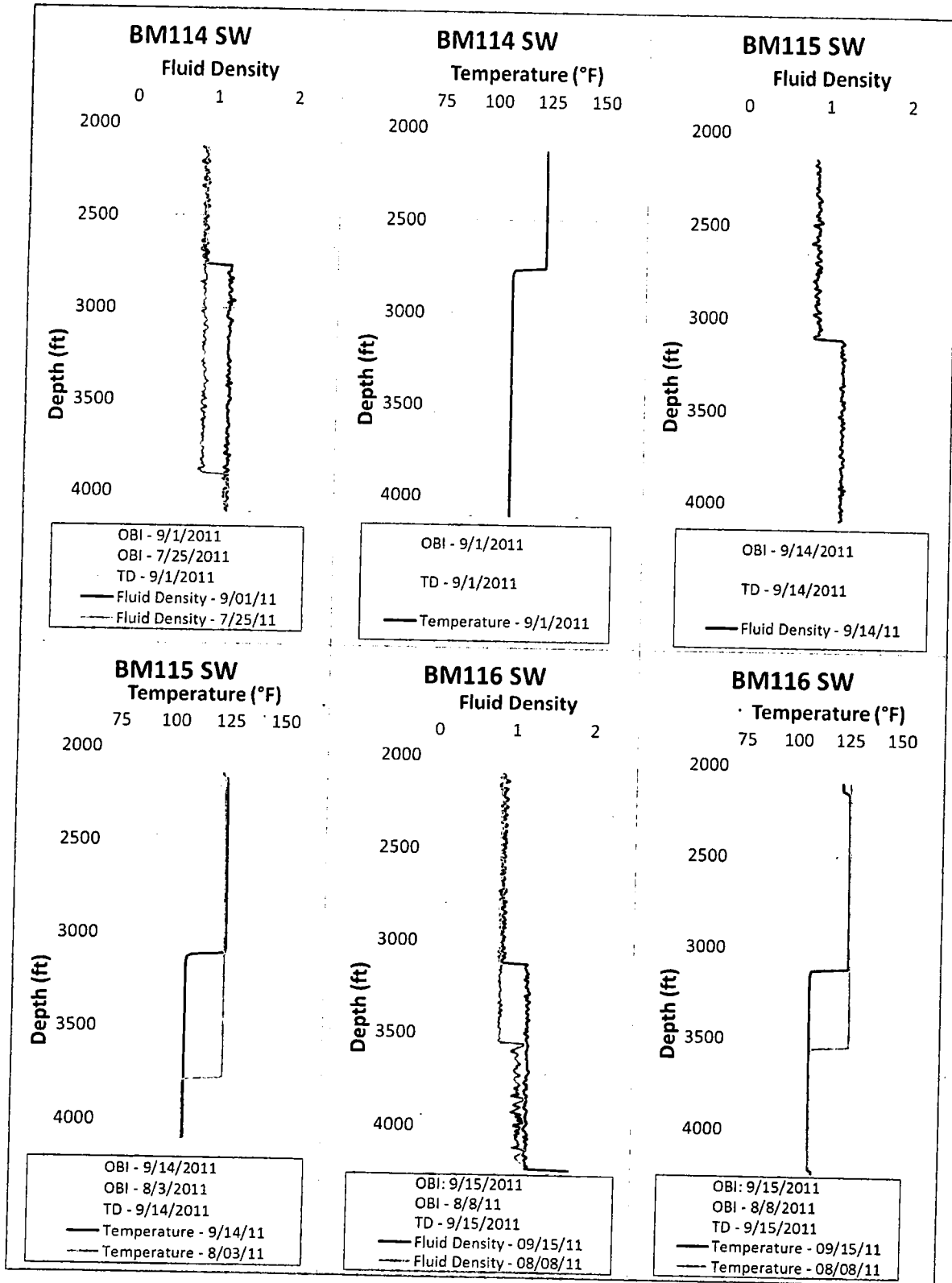


Figure 3. Wireline fluid temperature and density surveys taken during and after raw water injection for three Bryan Mound caverns utilized in the summer 2011 drawdown.

Leach Modeling with SANSMIC

The **SAN**dia **S**olution **M**ining **C**ode, SANSMIC (Russo 1981; Russo 1983), was utilized to simulate leaching in the drawdown caverns. SANSMIC was validated for the full cavern leach scenario (Eyermann 1984) and used successfully to support SPR cavern development in the 1980's and early 1990's, but it was never similarly validated for leaching in SPR caverns for oil withdrawal. The summer 2011 SPR drawdown provided a valuable opportunity to gather a broad and self-consistent data set for leaching analysis.

Modeling Assumptions

SANSMIC assumes an axisymmetric domain at a uniform, constant temperature. Starting cavern geometries were interpreted from the last sonar survey prior to the drawdown. The injection string position was taken from the last depth measured by wireline. Raw water injection histories were simplified to nominal rates over a seven-week injection period for Bryan Mound and three-week injection period for Big Hill. Insolubles content was set to 4% for all caverns, and solutioning properties were homogeneous with depth and radius. All of the SPR caverns simulated here have multiple wells in the field, and were simplified to a single well along the cavern axis in the simulations.

Modeling Results

SANSMIC model output data are expressed as axisymmetric cavern profiles overlaid with sonar survey data. The timing of the SANSMIC output was chosen to correspond with the time at which the sonar surveys were run. Hence, for a sonar survey run 5 days after completion of raw water injection, the corresponding SANSMIC output are given for 5 days after completion of simulated water injection. It is understood that the Bryan Mound caverns were not completely saturated when the sonar surveys were taken, but the degree of leaching was such that 90% or more of the ultimate salt volume was already leached, and the surveys would provide a reasonable estimate of the new baseline geometry, and likely within the resolution of the sonar surveys.

Bryan Mound Data-Model Comparisons

Three Bryan Mound caverns BM114, 115, and 116 were simulated with SANSMIC and compared with axisymmetric representations of sonar survey data. BM114 is shown in Figure 4, with initial input profile, SANSMIC output, and post-leach sonar survey overlaid in Figure 4(a). The SANSMIC results compare very well with the post-leach axisymmetric sonar survey data, agreeing to within 2 feet or less over the entire leach interval. Figure 4(b) and (c) show isometric views of the pre- and post-leach sonar surveys. No leaching anomalies such as salt falls or preferential leaching direction are evident from these figures.

BM115 is shown in Figure 5. Generally favorable agreement between model and measured is seen in the axisymmetric overlay in Figure 5(a), though an anomaly at about 3600 feet depth warrants a closer look. Comparing the isometric views in pre-leach Figure 5 (b) and post-leach Figure 5 (c) reveals an anomalous feature that projects to the north that was apparently created sometime between the sonar images taken in 2004 and 2011.

BM116 is shown in Figure 6. SANSMIC output again compares well with the axisymmetric profiles. A zoom of the leach region is shown on the right. Maximum radial growth was about 10 feet at the bottom of the cavern, and SANSMIC generally agreed within 1-2 feet over the leach interval, with an isolated deviation of about 4 feet.

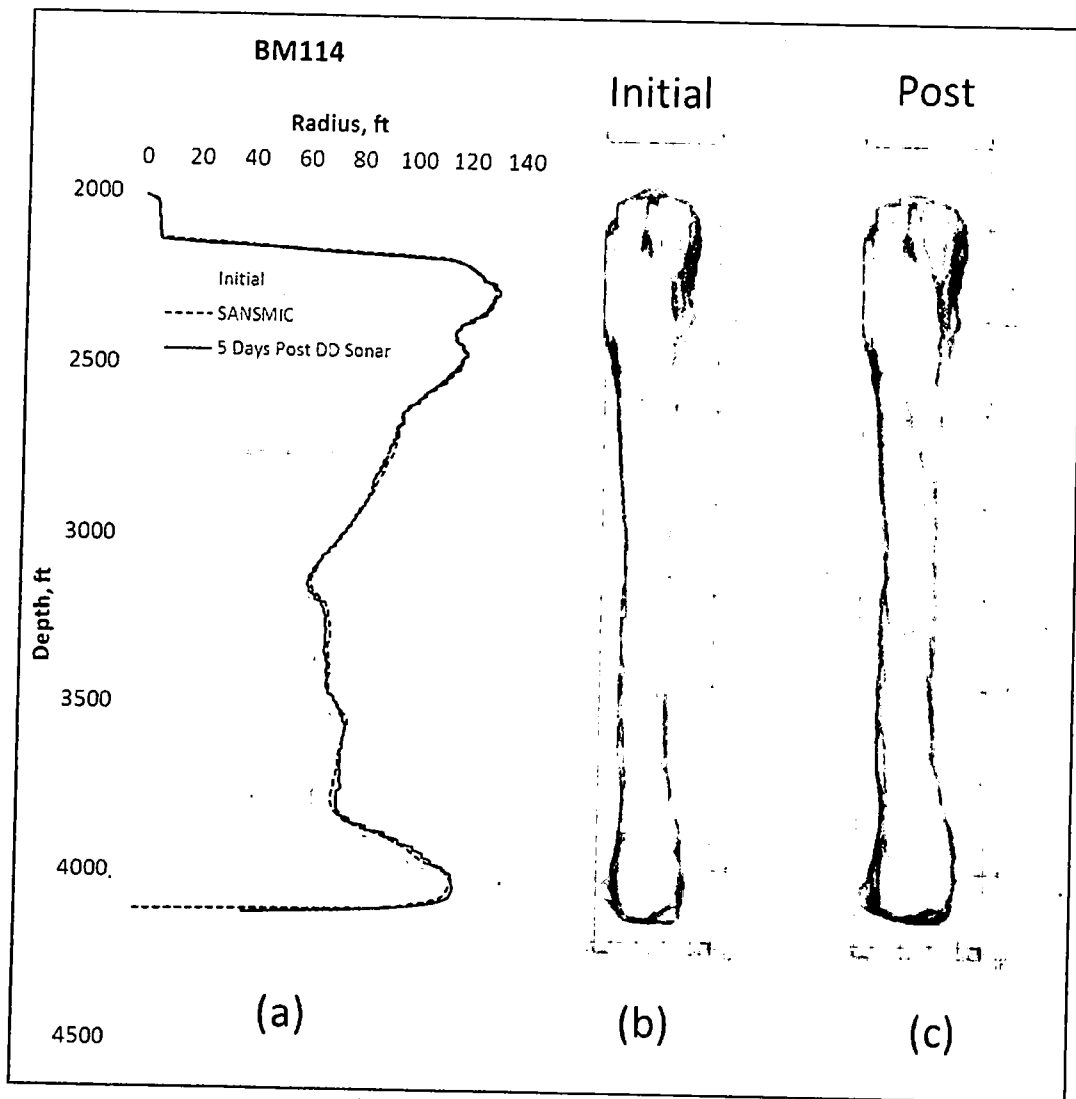


Figure 4. Comparison of BM114 initial and post-leach sonar surveys: (a) Axisymmetric representation (magnified radial axis) of cavern profiles with SANSMIC model overlay, (b) Isometric view of initial sonar survey, and (c) Isometric view of post-leach sonar survey.

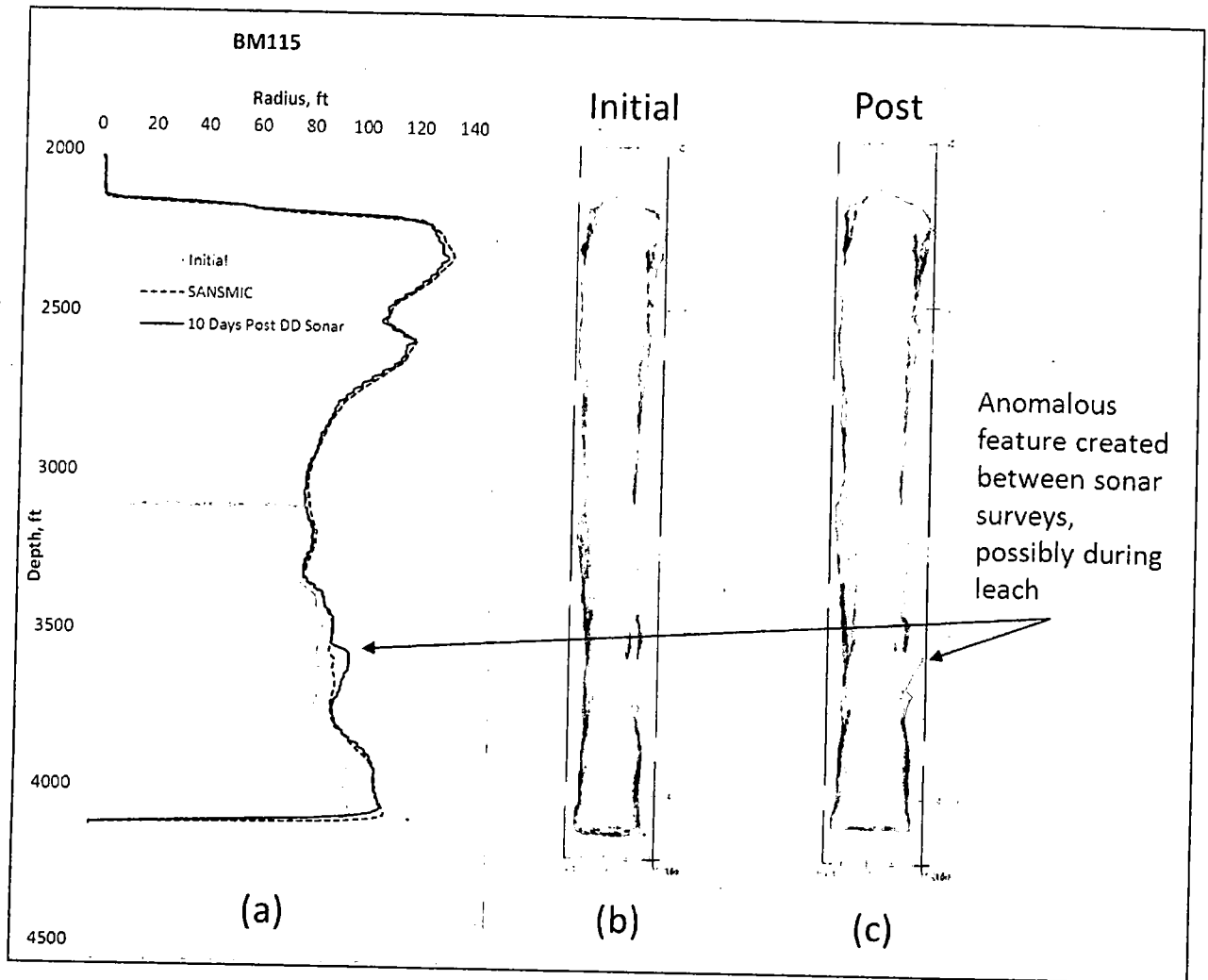


Figure 5. Comparison of BM115 initial and post-Leach sonar surveys: (a) Axisymmetric representation of profiles (magnified radial axis) with SANSMIC model overlay, (b) Isometric view of initial sonar survey, and (c) Isometric view of post-leach sonar survey showing anomalous feature at 3600 feet.

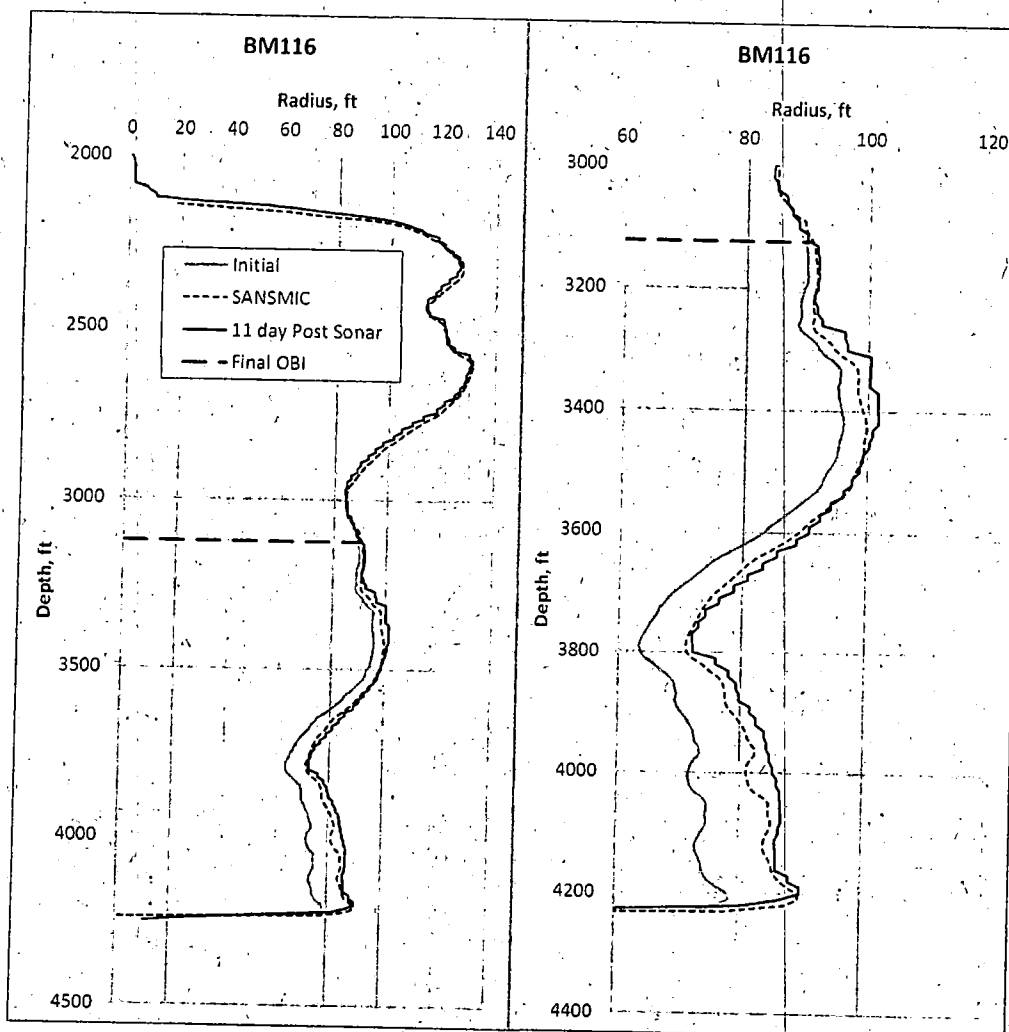


Figure 6. Overlay of BM116 axisymmetric profiles at expanded radial axis (left) and zoom of leach zone (right).

Big Hill Data-Model Comparisons

Two Big Hill caverns, BH101 and 104, were simulated with SANSMIC. Axisymmetric overlays of the model and sonar survey results are shown in Figure 7. The maximum radial growth was about 5-10 feet at the raw water injection point near the bottom of the cavern, and SANSMIC captured this value within several feet. The general shape, with greatest radial growth at the injection point, tapering to the final OBI, was also captured well.

Modeled Leach Efficiencies

Modeled leach efficiencies were computed using SANSMIC-calculated post-leach cavern volumes. Results are compared to measured leach efficiencies in Table 4. SANSMIC-calculated leach volumes, and hence SANSMIC leach efficiencies, were generally lower than the sonar-measured. In the case of BM116, the authors believe that the measured raw water injection volume was erroneously low, driving the measured leach efficiency erroneously high. Among the four other caverns where comparisons were drawn, three simulated efficiencies were lower and one was higher. If we recall that the sonar-related volume uncertainties lead to about $\pm 4\%$ uncertainty in measured leach efficiency (Table 3), the SANSMIC simulations perform within the accuracy of the sonar surveys.

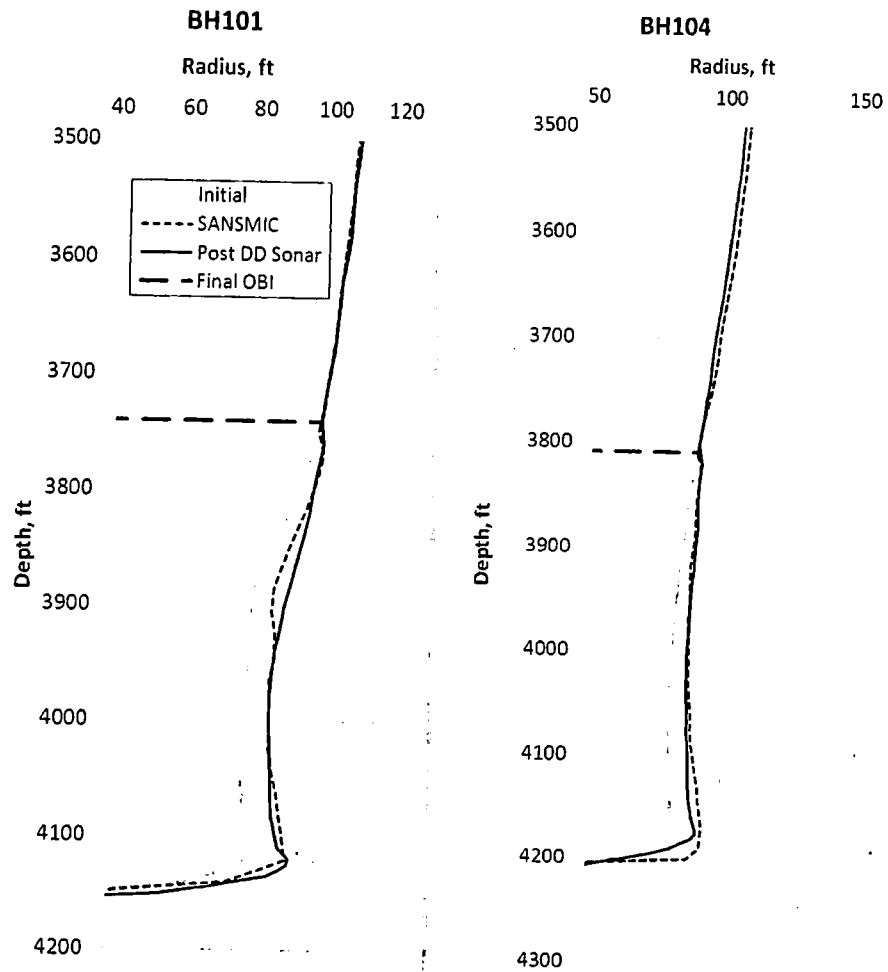


Figure 7. Axisymmetric overlays of SANSMIC results for BH101 (left) and BH104 (Right) drawdown-leach caverns. Images represent zoom of leach region.

Table 4. Comparison of measured and SANSMIC-modeled leach efficiencies.

Cavern	Raw Water Injected [MMB]	Sonar Δ Useable Ullage [MMB]	SANSMIC Δ Useable Ullage [MMB]	Measured Leach Efficiency [-]	SANSMIC Leach Efficiency [-]
BH101	1.515	0.256	0.211	0.17	0.14
BH104	1.438	0.193	0.221	0.13	0.15
BM114	4.208	0.586	0.559	0.14	0.13
BM115	4.380	0.640	0.589	0.15	0.13
BM116	3.735	0.810	0.626	0.22	0.17

Summary

SANSMIC was used to simulate leaching associated with crude oil drawdown at the SPR for selected caverns at the Big Hill and Bryan Mound sites. This is a moving boundary problem where the oil-brine interface climbs with raw water injection, and the leach interval grows in vertical extent with each time step. This is a unique opportunity on the SPR project to compare measured and modeled drawdown-leach for multiple caverns with a self-consistent set of pre-, during-, and post drawdown survey data.

Sonar and wireline surveys indicated that the raw water mixed completely with the brine during injection and affected leaching in a manner that was generally correlated to wall exposure time to a well-mixed unsaturated brine. Hence, radial expansion was greatest at the raw water injection point, and tapered to zero at the final oil-brine interface.

Simulated leach volumes and geometries compared well with images constructed from sonar surveys. Volume and radii generally agreed within the resolution of the sonar surveys. Some anomalous, non-axisymmetric structures were identified, indicating some level of localized preferential leach or possible salt falls. SANSMIC is not capable of predicting these features.

All caverns simulated in this exercise had similar starting geometry: nearly cylindrical with about 80-100 foot radius over the leaching zone, full of oil, and with raw water injection rates from 50-100 MBD. SANSMIC appeared to simulate these conditions fairly well. There are many possible operations scenarios that fall outside this parameter space, and the authors caution against setting performance expectations for SANSMIC in areas where it has not been tested. For example, many SPR caverns have much larger than 100 foot radius, along with lobe structures and non-cylindrical geometry. The complete raw water-brine mixing that appears to control the current leaching may not apply for the non-cylindrical geometry. Also, situations with low raw water injection rates (<25 MBD) or hanging strings broken many hundreds of feet above the cavern bottom, have not been tested.

Acknowledgements

Sandia National Laboratories is a multi-program laboratory managed and operated by Sandia Corporation, a wholly owned subsidiary of Lockheed Martin Corporation, for the U.S. Department of Energy's National Nuclear Security Administration under contract DE-AC04-94AL85000.

References

- Eyermann, T. J. 1984. Comparison of SANSMIC Simulation Results with Cavern Shapes on the SPR Project. Solution Mining Research Institute, Woodstock, Illinois.
- Khalil, I. and S. W. Webb. 2006. Numerical Simulations of Lab-Scale Brine-Water Mixing Experiments. SAND2006-5418, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Russo, A. J. 1981. A Solution Mining Code for Studying Axisymmetric Salt Cavern Formation. SAND81-1231, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Russo, A. J. 1983. A User's Manual for the Salt Solution Mining Code, SANSMIC. SAND83-1150, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

Van:
Verzonden: vrijdag 5 april 2013 17:02 @akzonobel.com>
Aan:
CC:

Onderwerp: RE: Uitlogen van met olie verzadigd zout

Beste

Julie voorkeur komt overeen met wat ik al had geconcludeerd uit ons telefoongesprek. Op dit punt lopen bij ons dan ook al de volgende acties:

- Ik heb gevraagd te zoeken naar een van onze eigen Hengelose cavernes waarin middels sonarmetingen is aangetoond dat het optrekken van een oliedek, dat lange tijd op hetzelfde niveau heeft gestaan, gevolgd wordt door onverstoord wegloging van het oorspronkelijke dak;
- Ik zal zelf kijken wat het naar voren halen van het vlaklogen van het dak van caverne 472 zou betekenen voor de (complexe) olielogistiek. 2000 m³ olie zijn toch 50 vrachtwagens en is een kostbare hoeveelheid om, buiten het onslancontract met Arros om, in een caverne te brengen. We zullen dus bekijken of dit binnen het

Met vriendelijke groet

From: (SODM) @minez.nl]
Sent: vrijdag 5 april 2013 16:08
To:)
Cc: (SODM); (SODM);
Subject: RE: Uitlogen van met olie verzadigd zout

Na intern beraad zijn we tot de conclusie gekomen dat

Een alternatief is dat

Daarom aan jullie het verzoek om hier op korte termijn (begin volgende week?) nog een keer naar te kijken.

Tenslotte:

en

Met vriendelijke groet / Kind regards,

Geo-Engineering

.....
Staatstoezicht op de Mijnen / State Supervision of Mines
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie / Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation
Henri Faasdreef 312 | 2492 JP | Den Haag / The Hague
Postbus / P.O. Box 24037 | 2490 AA | Den Haag
.....

T + 31

M + 31

F + 31

@minez.nl

<http://www.sodm.nl>

.....
Van: [mailto:@akzonobel.com]
Verzonden: vrijdag 5 april 2013 9:07
Aan:
Onderwerp: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

Dag

Ik ben de hele dag, m.u.v. de tijd tussen 2 en 4, telefonisch bereikbaar. Aangezien jij vermoedelijk een vollere agenda hebt, laat ik de keuze voor de tijd even aan jou.

Gr..

From: SodM) | @minez.nl
Sent: donderdag 4 april 2013 18:12
To:
Subject: Re: Uitloggen van met olie verzadigd zout

Het was een drukke dag. Ik probeer morgen te bellen.

Verstuurd vanaf mijn iPad

Op 4 apr. 2013 om 11:25 heeft ' geschreven:

" < @akzonobel.com > het volgende

Dag

Ik begrijp jullie zorgen omtrent het uitloggen van het dak na langdurige blootstelling aan olie. Inderdaad is er geen enkel artikel dat volledig dit aspect dekt, maar we kunnen denk ik wel concluderen dat er inderdaad een "shared understanding" is dat uitloggen van met olie verzadigde pekels mogelijk is.

Ik kwam bijgevoegd, zeer recent, artikel uit de VS ook nog tegen. In 2011 is daar de strategische olievoorraad aangesproken en zijn, voor het eerst sinds de aanleg van de opslagcavernes in de jaren '80 en '90, de cavernes met zoet water uitgedrukt t.b.v. de levering van zo'n 5 mln m³ olie. De sonarmetingen na afloop van de olieonttrekking zijn vergeleken met die van voor de onttrekking en tonen aan dat de met SANSMIC (paper van Reda en Russo) voorspelde cavernegroei goed overeenkomt met de praktijk. Wel wordt

opgemerkt dat de cavernegroei m.n. onderin plaatsvindt en het zoete water minder bovenop de pekels gaat drijven dan verwacht.

Hoewel dit denk ik het bewijs levert dat zout, ook na langdurige (20-30 jaar) blootstelling aan olie, nog altijd geloofd kan worden, moet ik ook wijzen op het verschil met onze werkwijze: wij gaan nooit uitdrukken met water maar doen dit altijd met pekels. Pas als alle, of in ieder geval zo veel mogelijk, olie middels de normale wijze uit de cavernes onttrokken is, gaan wij weer logen (indien nodig). Waar de in dit artikel beschreven uitloging dus het gevolg is van het inpompen van water om er zo snel mogelijk olie uit te krijgen, waarbij het olie-niveau continu omhoogschuift, zal ons uitloogprogramma gericht zijn op het gecontroleerd wegloggen van de dakpockets bij een min of meer constant olie-niveau. Daarbij hebben wij maar liefst 5 extra controlemechanismen vergeleken met het uitdrukken van de olie in het genoemde artikel:

- we kunnen daarvoor alle beschikbare putten gebruiken, terwijl in de beschreven opslagcavernes maar één put (met binnen- en buitenbuis) in gebruik was;
- we kunnen de diepte van de verbuizing aanpassen, terwijl in de beschreven opslagcavernes de diepte vast is;
- we kunnen de stroomrichting aanpassen, terwijl in de beschreven opslagcavernes de stroomrichting vast staat;
- we kunnen het debiet aanpassen, terwijl in de beschreven opslagcavernes het debiet vast staat (t.b.v. de olielevering),
- we kunnen het olieblanket aanpassen en zowel het niveau dieper als ondieper leggen, terwijl in de beschreven opslagcavernes het niveau continu naar boven toe schuift.

Hoe we die technieken/mechanismen gebruiken is gedetailleerd beschreven in Bijlage 18a-b van het Opslagplan (Leaching Recommendations for conversion of Akzo salt production caverns into oil storage caverns in the Clovis project).

Ik heb van DEEP gevraagd om inderdaad de gevraagde notitie op te stellen op basis van de verschillende artikelen, ervaringen in Duitsland en andere bruikbare, ondersteunende argumenten.

Prima om vanmiddag nog even te bellen om e.e.a. verder af te stemmen.
Groeten,

From: [redacted] de (SodM) [mailto:[redacted]@minez.nl]

Sent: woensdag 3 april 2013 16:29

To: [redacted]; [redacted] (SODM); [redacted] (SODM);

Cc:

Subject: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

In heb de aangeleverde artikelen inmiddels gelezen. Mijn commentaar heb ik hieronder ingevoegd. Mijn conclusie is dat

Het eerder opgestuurde US paper van

Het blijft daarbij natuurlijk de vraag in hoeverre deze laboratoriumexperimenten naar de veldsituatie kunnen worden opgeschaald (van het oplossen van een kleinschalige cilindervormige zoutwand naar het oplossen van richtels in een groot caverndak).

Wel lijken

-Een soort "shared understanding". Maar dat wordt vervolgens niet aangetoond (althans niet met deze papers). Zullen we morgenmiddag even bellen? Misschien dat we vrijdag met [redacted] moeten praten. Een formele notitie van de hand van DEEP met aanvullende informatie,

Van: @akzonobel.com>
Verzonden: dinsdag 9 april 2013 16:35
Aan:
CC:

Onderwerp: RE: Uitlogen van met olie verzadigd zout
Bijlagen: 20130409_Memo_uitlogen_oliedak_cav369_Hengelo.pdf

Beste en

Bijgevoegd treffen jullie een memo aan over de ontwikkeling van caverne 369, die gedurende 13 jaar (1991-2004) nauwelijks enige ontwikkeling omhoog heeft doorgemaakt vanwege een aanwezig oliedak en die na het millen van de verbuizing en het optrekken van het olieniveau in 5 jaar een zeer voortvarende verticale ontwikkeling heeft doorgemaakt.

Hoewel we meerdere voorbeelden hiervan hebben, hebben we deze caverne gekozen, omdat deze zich in het gebied van de opslagvergunning bevindt en nabij de andere opslagcavernes, zodat er geen twijfel kan bestaan over de vergelijkbaarheid van het zoutvoorkomen in de opslagcavernes.

Wel wil ik benadrukken dat dit voorbeeld bedoeld is om aan te tonen dat uitlogen van het dak van een relatief platte Hengelose caverne, waartegen lange tijd olie heeft gestaan, probleemloos mogelijk is. Het daadwerkelijk mooi vlak maken van het dak was niet beoogd in deze voorbeeldcaverne (hoewel er uiteindelijk een behoorlijk vlak dak is ontstaan).

Volgens ons doen we hiermee aan het door jullie aangegeven alternatief om op basis van sonarmetingen voor en na het omhoogbrengen van het oliedak aan te tonen dat het vlakken van het dak zal werken zoals voorgenomen. Parallel loopt ook nog de opstelling van de notitie door waarin dit eveneens aangetoond zal worden. Ik ga er

Met vriendelijke groet.

To Staatstoezicht op de Mijnen, Ministerie van Economische Zaken
From - AkzoNobel Industrial Chemicals BV
Date 09-04-2013
Subject Ervaringen met het uitloggen van een met olie verzadigd zoutdak in boorterrein Hengelo

Introductie AkzoNobel heeft op 16 januari 2013 het Opslagplan Gasolieopslag "Twente-Rijn De Marssteden" ingediend bij EZ. EZ heeft Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) om advies gevraagd. AkzoNobel heeft op 15 maart 2013 het Opslagplan aan de adviseurs van SodM toegelicht en daar een drietal vragen gekregen die nog beantwoord dienden te worden. Een van de vragen betreft de mogelijkheid om een zoutdak, dat 30 jaar in contact is geweest met olie, nog probleemloos te kunnen logen. Dit is een vereiste om in de cavernes met een onregelmatig dak (i.e. cavernes 372 en 472) na afsloop van de olieopslag de aanwezige dakpockets door middel van logen weg te krijgen en de hierin aanwezige olie terug te krijgen.

Over de mogelijkheid om met olie verzadigd zout nog te kunnen logen bestaan weinig twijfels. Zowel modelleringen als praktijkervaringen bij het uitdrukken van opgeslagen olie met water tonen aan dat het uitloogproces direct start. Het meest sprekende voorbeeld betreft de onttrekking van ca. 5 miljoen m³ olie uit een viertal opslagcavernes in de VS in 2011. Uit sonarmetingen uitgevoerd na de onttrekking van de olie blijkt dat de injectie van water leidt tot groei van de caveerne, ook na 20 tot 30 jaar olieopslag. Deze groei is het grootst onderin de caveerne, waar het water geïnjecteerd wordt, en neemt naar boven toe af. Bovendien geldt: hoe hoger in de caveerne, des te geringer de tijd dat het zout in contact is met het water. Het dak van de caveerne komt zelfs helemaal niet in contact met zoet water, enerzijds omdat er gestopt wordt met de injectie van zoet water als vrijwel alle olie eruit is, anderzijds doordat er meer menging van zoet water met verzadigde pekels plaatsvindt dan gedacht waardoor onverzadigde pekels minder bovenin de caveerne terechtkomt dan gedacht (zie: Lord et al., 2012).

In relatie tot het vlakloggen van het dak van olieopslagcavernes stelt SodM, naar aanleiding van dit artikel, de volgende vraag:

- Kan worden aangetoond dat het uitloggen van een dak waar gedurende lange tijd olie tegenaan heeft gestaan probleemloos kan, ook in een platte caveerne zoals de beoogde olieopslagcavernes?

In voorliggende memo beschrijven we de uitlooggeschiedenis van caveerne 369 in Hengelo, waarin lange tijd (>10 jaar) het olieniveau op dezelfde hoogte gestaan heeft, waarna dit niveau is opgetrokken en uitloging probleemloos is verder gegaan. Aanleiding voor het optrekken van de oliespiegel was de slechte ontwikkeling van de caveerne in verticale zin.

**Eisen en
wensen aan het
voorbeeld**

De volgende eisen zijn gesteld aan het voorbeeld, opdat het zo veel mogelijk de onzekerheden bij SodM over de toepassing van deze techniek wegneemt:

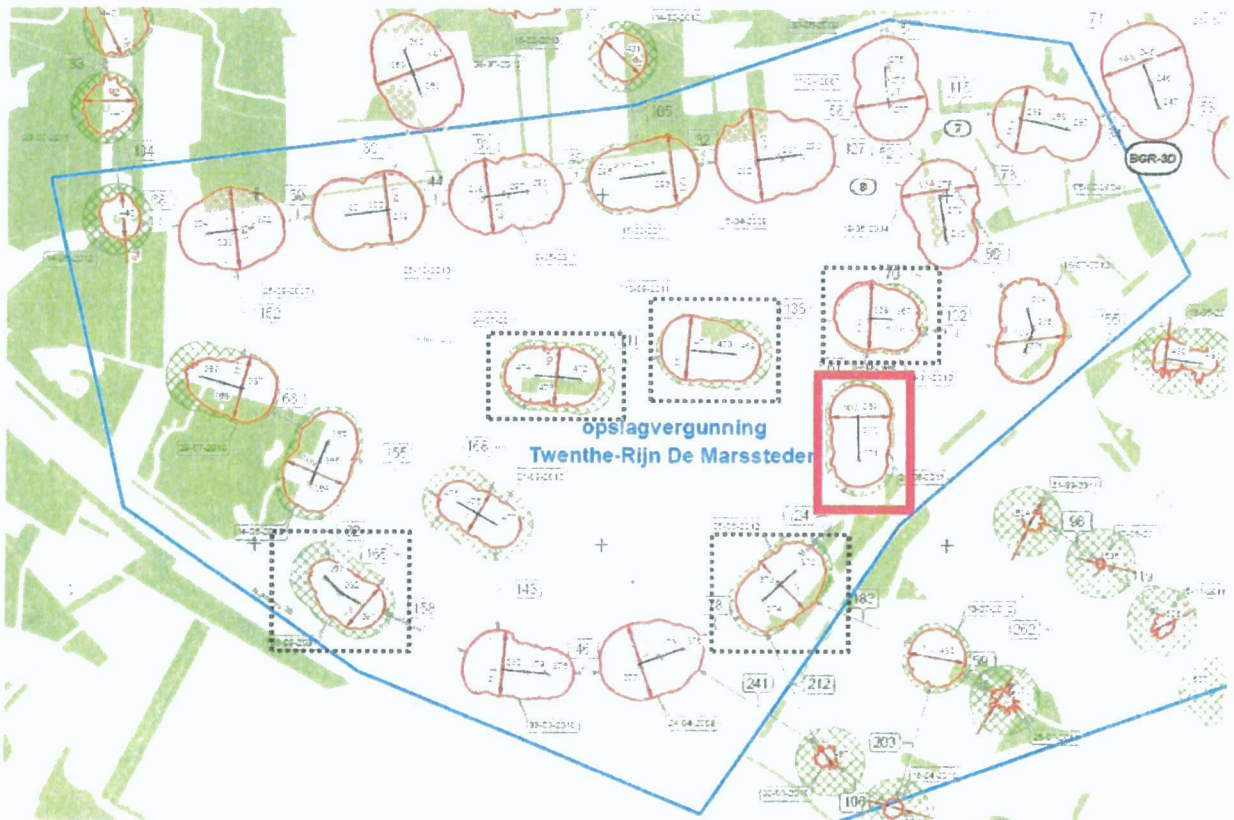
- Het olieniveau heeft eerst lange tijd op één en hetzelfde niveau gestaan, minimaal enkele jaren, maar hoe langer hoe beter;
- Er zijn sonarmetingen beschikbaar aan het einde van die uitloofase;
- Het olieniveau is opgetrokken naar een nieuw niveau, waarna is doorgegaan met uitloggen;
- Er zijn sonarmetingen beschikbaar van niet al te lang na het optrekken van het olieniveau waaruit blijkt dat het zoutdak, waar gedurende lange tijd olie tegenaan had gestaan probleemloos is weggelooft.

Daarnaast gelden de volgende wensen die het voorbeeld beter bruikbaar zouden maken:

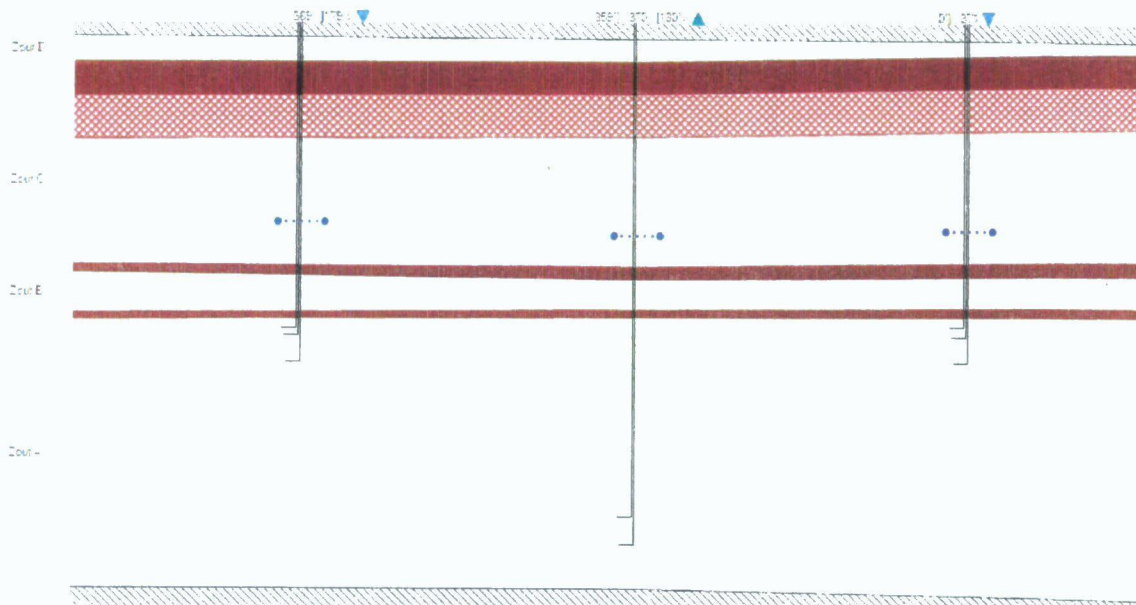
- De caveerne is bij voorkeur gelegen in de buurt van de beoogde opslagcavernes;
- Het weggelooft zoutdak betreft bij voorkeur dezelfde zoutlaag (i.e. Zout A) als het weg te logen zoutdak in de beoogde opslagcavernes.

**Beschrijving van
het voorbeeld:
caverne 369**

Een caverne die aan al deze eisen en wensen voldoet is caverne 369. Deze is, net als de beoogde opslagcavernes gelegen in De Marssteden, tussen de opslagcavernes 367 en 372 in (zie figuur 1). De boorgaten zijn eind 1990 geboord en de productie is gestart in maart 1991. Figuur 2 toont de resultaten van de eerste sonarmeting, uitgevoerd in juni 1992.

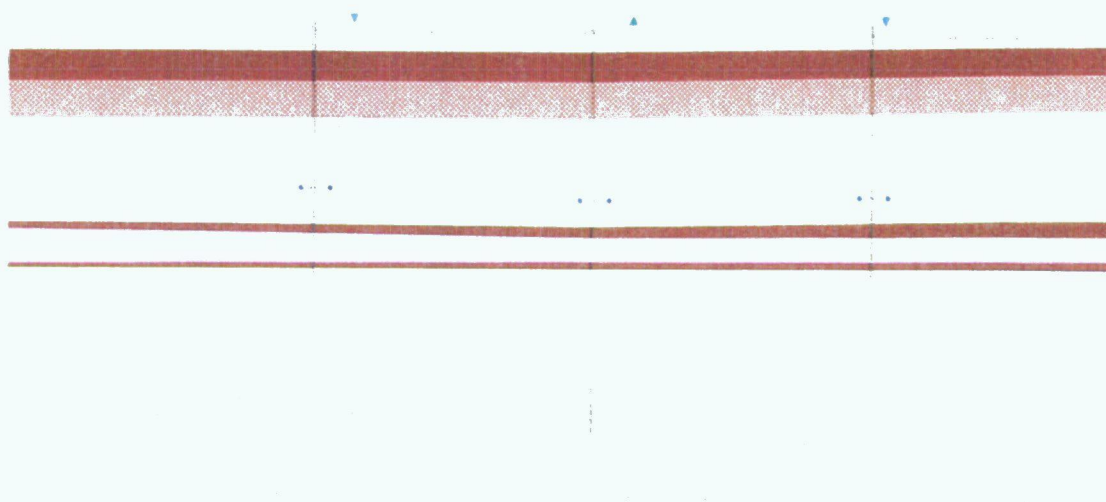


Figuur 1: Ligging van de beoogde opslagcavernes (zwart omkaderd). De voorbeeldcaverne betreft caverne 369 (rood omkaderd).



Figuur 2: Resultaten van de eerste sonarmeting in caverne 369, uitgevoerd in juni 1992. Let op: de getoonde afhangings is de actuele afhangings.

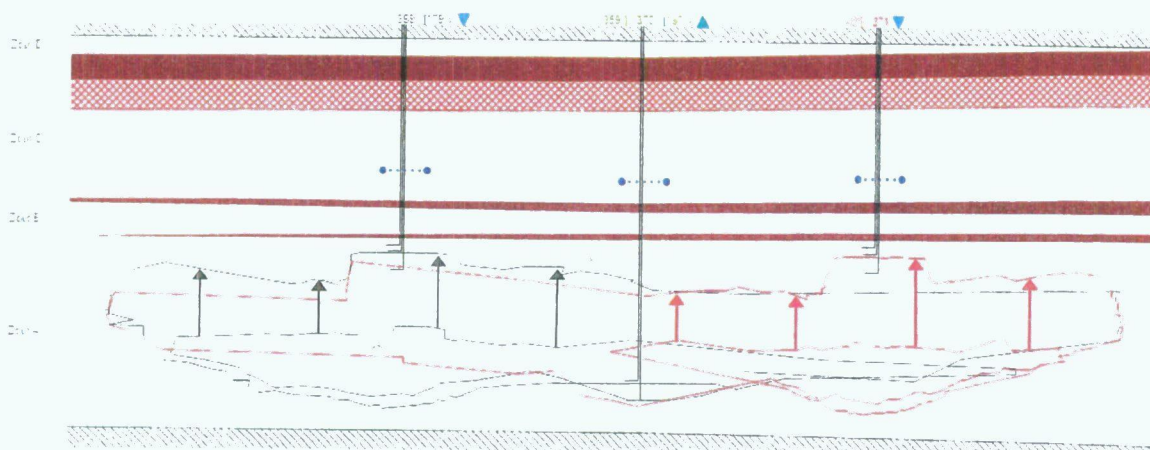
Na 13 jaar logen heeft de caveerne zich voornamelijk in de breedte ontwikkeld. Het aangebrachte oliedak blijkt te dik te zijn om voldoende ontwikkeling in de verticale richting toe te laten waardoor de caveerne zich in horizontale richting ontwikkelt. De caveerne is inmiddels ruim 150 meter breed en dreigt te dicht bij buurcavernes te komen. Figuur 3 toont de resultaten van de sonarmetingen van caveerne 369 van februari 2004.



Figuur 3: Resultaten van de sonarmetingen in caveerne 369, uitgevoerd in februari 2004. Let op: de getoonde afhangings is de actuele afhangings. Via boorgat 370 is in 2004 geen meting gedaan.

Om de groei in horizontale richting te stoppen en de caveerne te dwingen naar boven te ontwikkelen, is besloten de gecementeerde verbuizingen in boorgaten 369 en 371 weg te millen en de LCCS op een ondieper niveau opnieuw af te cementeren. Daarna is het uitlogen weer gestart. Figuur 4 toont de resultaten van de eerste sonarmetingen van caveerne 369 die hierna zijn uitgevoerd, namelijk in september 2009, geplot over de metingen uit 2004. De metingen via boorgat 369 zijn met zwart weergegeven, die via boorgat 371 in rood. Vanwege de grote diameter van de cavernes geldt dat een sonarmeting voornamelijk betrouwbare informatie geeft over de caveerne rondom het boorgat waardoor deze meting is uitgevoerd en minder betrouwbare informatie over het verst weggelegen boorgat. Door in de twee buitenste gaten te meten is toch een betrouwbaar beeld te krijgen van de vorm van de caveerne als geheel.

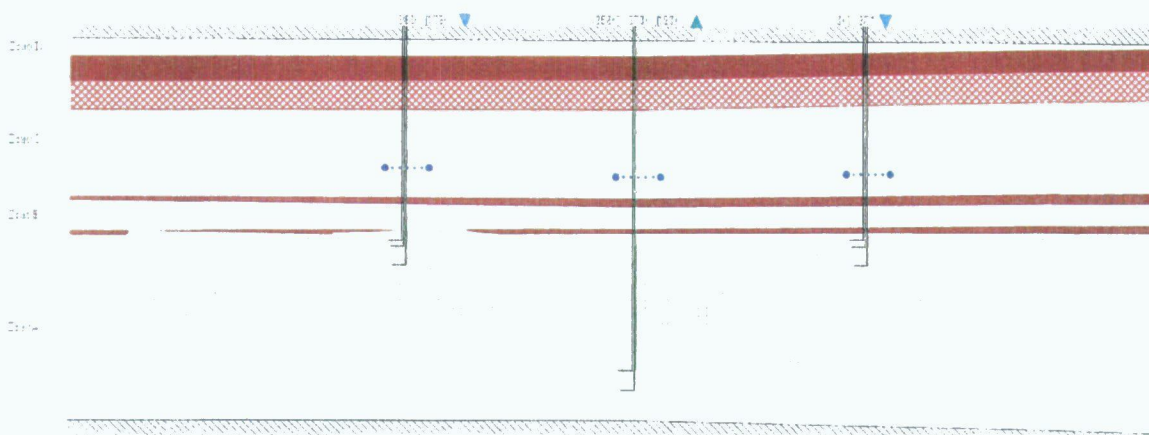
De verticale uitloging van het dak is met pijltjes weergegeven en is vrij groot vanwege het omhoog getrokken oliedak en de veel hogere flow (15-30 m³/uur).



Figuur 4: Resultaten van de sonarmetingen in caveerne 369, uitgevoerd in september 2009, geplot over de sonarmetingen uit februari 2004. De zwarte lijnen zijn de metingen via boorgat 369, de rode lijnen de metingen vanuit boorgat 371. De zwarte pijlen tonen de ontwikkeling van het cavernekak rond boorgat 369, de rode pijltjes rond boorgat 371. Via boorgat 370 is in 2009 geen meting gedaan.

Uit figuur 4 blijkt dat de caverne zich voortvarend in verticale richting heeft ontwikkeld. De ontwikkeling in horizontale richting is beperkt (ca. 20 meter, oftewel 13%) terwijl de ontwikkeling in verticale richting veel groter is (gemiddeld circa 15 meter, meer dan 100%).

Ook hierna is de ontwikkeling voorspoedig verder gegaan. Figuur 5 toont het resultaat van de meest recente metingen uit oktober 2012, waaruit o.a. blijkt dat het dak alsnog grotendeels geëgaliseerd is dankzij gecontroleerde uitlogging en een nauwkeurige controle van de oliespiegel met een BCS (Blanket Control System).



Figuur 5: Resultaten van de meest recente sonarmeting in caverne 369, uitgevoerd in oktober 2012.

Conclusies

Uit de ontwikkeling van caverne 369 na het millen van de gecementeerde verbuizing in boorgaten 369 en 371 in 2004 en het aansluitend optrekken van de oliespiegel blijkt dat een caverne waarin het olie dak langere tijd op dezelfde hoogte heeft gestaan en het oliedak dus verzadigd is geraakt met olie, na optrekken van het olieniveau probleemloos uitloogt. Daarbij moet worden opgemerkt dat het doel van de optrekking in deze caverne niet was om een zo vlak mogelijk dak te creëren met zo min mogelijk pockets, maar om de caverne zich in verticale richting te laten ontwikkelen en zo de gewenste zoutopbrengst uit deze caverne te halen, binnen de gesteentemechanisch omhullende. Daarom is relatief weinig olie gebruikt (veelal tussen de 50 en 150 m³), waardoor pockets niet volledig gevuld waren, en is na het optrekken met een erg hoge flow uitgelopen. Hierdoor heeft het dak zich niet altijd even regelmatig ontwikkeld.

In de beoogde olieopslagcavernes zal, ten tijde van het vlakloggen van de daken na afloop van de opslag, nadrukkelijk gestuurd worden op het wegloggen van de pockets en het vlakloggen van het dak, door:

- alle beschikbare putten te gebruiken voor het loggen;
- de diepte van de verbuizing zodanig aan te passen, dat deze de ideale stromingen genereert;
- de stroomrichting zodanig aan te passen, dat de ideale stromingen ontstaan;
- het debiet zodanig aan te passen, dat de ideale stromingen ontstaan;
- het olieblanketniveau zodanig aan te passen en te controleren dat de aanwezige pockets nét vol staan met olie en de ertussen gelegen 'dammen' wel in contact komen met water en dus worden weggevoerd.

Referenties

and , 2012. Solution mining characteristics of U.S. Strategic Petroleum Reserve oil drawdown. SMRI Spring 2012 Technical Conference.

Van: @akzonobel.com>
Verzonden: maandag 15 april 2013 16:40
Aan:
CC:
Onderwerp: Conclusies dakstabiliteit check IfG

Dag e.a.,

De memo van is zo goed als klaar. Ik heb een paar kleine opmerkingen gestuurd op hun eerste versie die ze nu verwerken, dus de definitieve versie komt eraan. Hieronder alvast de belangrijkste conclusies, gekopieerd uit de concept-memo van

Answer 1.

Answer 2.

Zoals gezegd komt de definitieve memo eraan.

Groeten,

From:
Sent: donderdag 11 april 2013 16:37
To:
Cc:
Subject: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

ljs en weder dienende zou het allemaal net kunnen nassen

Van:
Verzonden: donderdag 11 april 2013 16:07
Aan:
CC:

Onderwerp: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

Hoi

Dank!

Beleidsmedewerker

Directie Energiemarkt
Directoraat-Generaal Energie, Telecom en Mededinging
Ministerie van Economische Zaken
Bezuidenhoutseweg 73 | 2594 AC | Den Haag
Postbus 20101 | 2500 EC | Den Haag

T 070 :

inez.nl



Please consider the environment - do you really need to print this email?

Van:
Verzonden: donderdag 11 april 2013 14:30
Aan:
CC: H

onderwerp: RE: Uitloggen van met olie verzadigd zout

Hai

Nee, we wachten nog op een notitie van ... i welke pas begin volgende week gaat komen. Daarna zullen we ons advies afronden.

Groeten,

Van:
Verzonden: dinsdag 16 april 2013 16:52
Aan:
CC:

Onderwerp: RE: Adviesaanvraag Clovis

Dag

Dank voor dit nieuws. Met de voorwaarde m.b.t. het monitoringsplan kunnen wij instemmen:

Groeten,

From: [redacted]@minez.nl]
Sent: dinsdag 16 april 2013 16:47
To: [redacted]
Cc: [redacted]
Subject: Adviesaanvraag Clovis

De gecombineerde adviesbrief van SodM en TNO-AGE is klaar,

Wel willen we adviseren dat er een voorwaarde in het besluit wordt opgenomen dat Akzo voor eind 2013 een monitoringsplan met als onderdeel daarvan een voorstel voor een jaarlijkse monitoringsrapportage aan SodM aanlevert ten genoeg van de IGM. Als jullie daar nog commentaar op hebben dan graag voor morgenochtend 10 uur.

Met vriendelijke groet / Kind regards,

Deputy Head Department of Geo-Engineering

.....
Staattoezicht op de Mijnen / State Supervision of Mines
Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie / Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation
Henri Faasdreef 312 | 2492 JP | Den Haag / The Hague
Postbus / P.O. Box 24037 | 2490 AA | Den Haag

.....
T + 31 70
M + 31 6
F + 31 70

<http://www.sodm.nl>

Van: @akzonobel.com>
Verzonden: maandag 2 september 2013 14:10
Aan:
CC:
Onderwerp: Bespreken procedure voor de MITs in de olieopslagcavernes

Beste , en

Zoals vermeld in Bijlage 16 (Risicobeheersplan) van de olieopslag in zoutcavernes en zoals aangegeven tijdens de overleggen van 13 maart j.l. () en van 15 maart j.l. (), dienen voorafgaand aan de ingebruikname van de olieopslagcavernes nog Mechanical Integrity Tests (MITs) te worden uitgevoerd om de afsluiting van de onverbuide cavernenek (i.e. de aanhechting zout-cement-7"-casing) te testen. De exacte definitieve procedure voor de uitvoering van de MIT zouden wij nog aan jullie voorleggen.

Bij beide overleggen in maart hebben jullie aangegeven dat het noodzakelijk is om goed inzicht te hebben in de per caveerne te hanteren MIT-procedure, alsmede de per caveerne te bereiken MIT-druk, bij voorkeur te verkrijgen door het uitvoeren van een proef-MIT middels pekel. Deze proef-MITs, die wij 'druktesten' noemen om het onderscheid met de uiteindelijke MITs te maken, willen we in de 2^e helft van oktober uitvoeren in de drie opslagcavernes die als eerste gebruikt gaan worden (cavernes 367, 381 en 472). Zo snel mogelijk daarna willen we de resultaten daarvan in de MIT-procedures verwerken en deze met jullie bespreken, zodat we weten of jullie kunnen instemmen met de MIT-procedure voor het aantonen van de dichtheid van de cavernenek en de zout-cement-casing binding. Indien dat het geval is, zullen de MITs waarschijnlijk al begin 2014 kunnen worden uitgevoerd.

Graag zou ik dus een overleg met jullie inplannen:

-
-
-
-
-
-
-

Graag hoor ik van jullie

Met vriendelijke groeten,

Geologist / Project manager
Mining Technology Department (MTD), sBU Salt

T +31 74
F +31 74
M +31 6
E @akzonobel.com

Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.
Boortorenweg 27
7554 RS Hengelo (OV)
P.O. Box 25
7550 GC Hengelo (OV)
The Netherlands